



Ministério da Agricultura,  
Pecuária e Abastecimento

# Mudanças Climáticas Globais e a Agropecuária Brasileira

Editores:

Magda Aparecida de Lima  
Osvaldo Machado Rodrigues Cabral  
José Domingos Gonzalez Miguez



**Embrapa**

**República Federativa do Brasil**

Fernando Henrique Cardoso  
Presidente

**Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

Marcus Vinícius Pratini de Moraes  
Ministro

**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa**

**Conselho de Administração**

Márcio Fortes de Almeida  
Presidente

Alberto Duque Portugal  
Vice-Presidente

Dietrich Gehard Quast  
José Honório Accarini  
Sérgio Fausto  
Urbano Campos Ribeiral  
Membros

**Diretoria-Executiva da Embrapa**

Alberto Duque Portugal  
Diretor-Presidente

Dante Daniel Giacomelli Scolari  
José Roberto Rodrigues Peres  
Bonifácio Hideyuki Nakasu  
Diretores-Executivos

**Embrapa Meio Ambiente**

Bernardo Van Raij  
Chefe-Geral

Deise Maria Fontana Capalbo  
Chefe-Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento

Vander Roberto Bisinoto  
Chefe-Adjunto Administrativo

Nilce Chaves Gattaz  
Comunicação e Negócios

# **Mudanças Climáticas Globais e a Agropecuária Brasileira**

*Magda Aparecida de Lima  
Oswaldo Machado Rodrigues Cabral  
José Domingos Gonzalez Miguez*

*Editores Técnicos*

Embrapa Meio Ambiente  
Jaguariúna, SP  
2001

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

**Embrapa Meio Ambiente**

Rodovia SP- 340 km 127,5

CEP 13820-000 Jaguariúna, SP, Brasil

Fone: (019) 3867-8700

Fax: (019) 3867-8740

Home Page: [www.cnpma.embrapa.br](http://www.cnpma.embrapa.br)

E-mail: [sac@cnpma.embrapa.br](mailto:sac@cnpma.embrapa.br)

Supervisão editorial: Thelma Rosane P. de Souza

Normalização bibliográfica: Maria Amélia de Toledo Leme

Capa: Carlos Eduardo Felice Barbeiro (Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia)

**1ª edição**

1ª impressão (2001): 1.000 exemplares

**Todos os direitos reservados.**

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

**CIP-Brasil. Catalogação-na-publicação.  
Embrapa Meio Ambiente**

---

M943

Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira /  
Org.: Magda Aparecida de Lima, Osvaldo Machado Rodrigues  
Cabral, José Domingos Gonzalez Miguez - Jaguariúna, SP :  
EMBRAPA Meio Ambiente, 2001.  
397 p. : il. ; cm.

ISBN 85-85771-13-5

I. Climatologia agrícola - Brasil. 2. Agropecuária -  
Brasil. I. Lima, Magda Aparecida. II. Cabral, Osvaldo Machado  
Rodrigues. III. Miguez, José Domingos Gonzalez. IV. Título.

---

CDD: 630.2515

© Embrapa 2001

## **Autores**

Alfredo José Barreto Luiz - Pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Rodovia SP-340, km 127,5 CEP 13820-000, Jaguariúna, SP, Brasil.

Aloísio Torres de Campos – Pesquisador da Embrapa Gado de Leite, Rua Eugênio do Nascimento, nº. 610, Dom Bosco, CEP 36038-330, Juiz de Fora, MG, Brasil.

Alessandro Torres Campos – Professor Assistente, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, CEP 85960-000, Marechal, PR, Brasil.

Bernard J. Du Charme – Gerente de Negócios do The Global Livestock Group, Inc., 10521 Judicial Drive, Suite 305, Fairfax, VA 22030, USA.

Brigitte Josefine Feigl – Pesquisadora do Centro de Energia Nuclear na Agricultura – CENA, USP, Avenida Centenário, nº. 303, Caixa Postal 96, CEP 13400-970, Piracicaba, SP, Brasil.

Bruno José Rodrigues Alves – Pesquisador da Embrapa Agrobiologia, km 47, CP 74505, CEP 23890-000, Seropédica, RJ, Brasil.

Carlos Clemente Cerri – Pesquisador do Centro de Energia Nuclear na Agricultura – CENA, USP, Avenida Centenário, nº. 303, Caixa Postal 96, CEP 13400-970, Piracicaba, SP, Brasil.

Carlos Cláudio Perdomo – Pesquisador da Embrapa Suínos e Aves, BR 153, km 110, Vila Tamanduá, CP 21, CEP 89700-000, Concórdia, SC, Brasil.

Carlos E. F. Young – Professor do Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IE/UFRJ), Cidade Universitária, Ilha do Fundão, CEP 21949-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Cláudio Ferraz – Pesquisador do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), Avenida Presidente Antonio Carlos, nº. 51, 17º Andar, CEP 20020-010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Denisard Cnéio O. Alves – Professor da Faculdade de Economia e Administração – FEA, da Universidade de São Paulo – USP, Cidade Universitária Butantã, CEP 05508-900, São Paulo, SP, Brasil.

Dimas Vital Siqueira Resck – Pesquisador da Embrapa Cerrados, BR 020, km 18, Rodovia Brasília/Fortaleza, CEP 73301-970, Planaltina, DF, Brasil.

Eduardo Delgado Assad – Pesquisador da Embrapa Cerrados, BR 020, km 18, Rodovia Brasília/Fortaleza, CEP 73301-970, Planaltina, DF, Brasil.

Geraldo Stachetti Rodrigues – Pesquisador da Embrapa Meio Ambiente. Jaguariúna – SP, Rodovia SP-340, km 127,5 CEP 13820-000, Jaguariúna, SP, Brasil.

Gilberto Fisch – Pesquisador Titular do Centro Técnico Aeroespacial – CTA/IAE-ACA, Praça Marechal Eduardo Gomes, nº. 50, CEP 12228-904, São José dos Campos, SP, Brasil.

Gustavo J. M. M. de Lima – Pesquisador da Embrapa Suínos e Aves, BR 153, km 110, Vila Tamanduá, CP 21, CEP 89700-000, Concórdia, SC, Brasil.

Isaias de Carvalho Macedo - Gerente de Tecnologia do Centro de Tecnologia Copersucar - CTC. Bairro Santo Antonio, s/nº., Caixa Postal 162, CEP 13400-970, Piracicaba, SP, Brasil.

Jorge de Lucas Junior – Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – FCAV, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP, Campus de Jaboticabal, Rodovia Carlos Tonanni, km 05, CEP 14870-000, Jaboticabal, SP, Brasil.

José Antonio Marengo – Chefe do Grupo de Estudos de Clima do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Rodovia Presidente Dutra, km 40 SP-RJ, CEP 12630-000, Cachoeira Paulista, SP, Brasil.

José Domingos Gonzalez Miguez – Coordenador Geral de Pesquisa em Mudanças Globais, Ministério da Ciência e Tecnologia. Esplanada dos Ministérios, Bloco E, Sala 398, CEP 70067-900, Brasília, DF, Brasil.

José Francisco da Silva Martins – Pesquisador da Embrapa Clima Temperado, BR 392, km 78, 9º Distrito, CP 403, CEP 96001-970, Pelotas, RS, Brasil.

José Maurício Fernandes – Pesquisador da Embrapa Trigo, BR 285, km 174, CP 451, CEP 99001-970, Passo Fundo, RS, Brasil.

José Valente – Pesquisador da Embrapa Gado de Leite, Rua Eugênio do Nascimento, nº. 610, Dom Bosco, CEP 36038-330, Juiz de Fora, MG, Brasil.

Katia Nones – Bolsista da Embrapa Suínos e Aves, BR 153, km 110, Vila Tamanduá, CP 21, CEP 89700-000, Concórdia, SC, Brasil.

Luiz Antônio Benincá de Salles – Pesquisador da Embrapa Clima Temperado, BR 392, km 78, 9º Distrito, CP 403, CEP 96001-970, Pelotas, RS, Brasil.

Magda Aparecida de Lima – Pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Rodovia SP-340, km 127,5 CEP 13820-000, Jaguariúna, SP, Brasil.

Marco Antônio Vieira Ligo – Pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Rodovia SP-340, km 127,5, CEP 13820-000, Jaguariúna, SP, Brasil.

Marco Lorenzo Cunali Ripoli – Bolsista do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Avenida Pádua Dias, n°. 11, CP 09, CEP 13418-900, Piracicaba, SP, Brasil.

Maria Laura Turino Mattos – Pesquisadora da Embrapa Clima Temperado, BR 392, km 78, 9º Distrito, CP 403, CEP 96001-970, Pelotas, RS, Brasil.

Mark Orlic – U.S. Peace Corps. Post address: 2270 Libreville Pl, Washington DC 20521-2270, U.S.A.

Maria de Fátima Ávila Pires – Pesquisadora da Embrapa Gado de Leite, Rua Eugênio do Nascimento, n°. 610, Dom Bosco, CEP 36038-330, Juiz de Fora, MG, Brasil.

Maria Leonor R. C. Lopes Assad – Universidade de Brasília – UNB, Campus Universitário Asa Norte, CEP 70910-970, Brasília, DF, Brasil.

Marisa C. Piccolo – Pesquisadora do Centro de Energia Nuclear na Agricultura – CENA, USP, Avenida Centenário, n° 303, Caixa Postal 96, CEP 13400-970, Piracicaba, SP, Brasil.

Martial Bernoux – Pesquisador do Institut de Recherche pour le Développement (IRD), 213 Rue La Fayette, 75480 Paris Cedex 10, França. Atualmente no Centro de Energia Nuclear na Agricultura – CENA, USP, Avenida Centenário, n° 303, Caixa Postal 96, CEP 13400-970, Piracicaba, SP, Brasil.

Otávio Costa de Oliveira – Bolsista de Pós-Doutorado, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, BR 465, km 7, CEP 23890-000, Seropédica, RJ, Brasil.

Oswaldo Machado Rodrigues Cabral – Pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Rodovia SP-340, km 127,5, CEP 13820-000, Jaguariúna, SP, Brasil.

Otávio João Wachholz de Siqueira – Pesquisador da Embrapa Clima Temperado, BR 392, km 78, 9º Distrito, CP 403, CEP 96001-970, Pelotas, RS, Brasil.

Pedro Braga Arcuri – Pesquisador da Embrapa Gado de Leite, Rua Eugênio do Nascimento, n°. 610, Dom Bosco, CEP 36038-330, Juiz de Fora, MG, Brasil.

Renato Alas Martins – IAEP – International Activity for Environmental Protection – Rua Constâncio Martins Sampaio, 48, Estuário, CEP 11020-00, Santos, SP, Brasil.

Rita Carla Boeira – Pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Rodovia SP-340, km 127,5, CEP 13820-000, Jaguariúna, SP, Brasil.

Robert E. Evenson – Diretor do Centro de Desenvolvimento Econômico, Professor do Depto. de Economia da Universidade de Yale, 27 Hillhouse Avenue, P.O. Box 208269, New Haven, Connecticut, U.S.A.

Robert Michael Boddey – Pesquisador da Embrapa Agrobiologia, km 47, CEP 23890-000, CP 74505, Seropédica, RJ, Brasil.

Roberto Alves de Oliveira – Professor Assistente Doutor do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – FCAV, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP, Campus de Jaboticabal, Rodovia Carlos Tonanni, km 05, CEP 14870-000, Jaboticabal, SP, Brasil.

Ronaldo Seroa da Motta – Coordenador de Estudos de Meio Ambiente do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA, Avenida Presidente Antonio Carlos, nº. 51, 17º Andar, CEP 20020-010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Silvio Steinmetz – Pesquisador da Embrapa Clima Temperado, BR 392, km 78, 9º Distrito, CP 403, CEP 96001-970, Pelotas, RS, Brasil.

Segundo Urquiaga – Pesquisador da Embrapa Agrobiologia, km 47, CP 74505, CEP 23890-000, Seropédica, RJ, Brasil.

Tânia Mara Baptista dos Santos – Doutoranda em Produção Animal - Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – FCAV, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP, Campus de Jaboticabal, Rodovia Carlos Tonanni, km 05, CEP 14870-000, Jaboticabal, SP, Brasil.

Tomás Caetano Cannavam Ripoli – Professor Titular do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Avenida Pádua Dias, nº. 11, CP 09, CEP 13418-900, Piracicaba, SP, Brasil.

Vera Lúcia Scherholz Salgado de Castro – Pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente. Rodovia SP-340, km 127,5, CEP 13820-000, Jaguariúna, SP, Brasil.

Walter Francisco Molina Junior – Professor Assistente do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz-USP. Avenida Pádua Dias, nº. 11, CP 09, CEP 13418-900, Piracicaba, SP, Brasil.

## Prefácio

Estudos vêm mostrando a ocorrência de um aumento na concentração de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e ozônio ( $\text{O}_3$ ) na atmosfera. Acredita-se que esse acréscimo dos gases, originadas por fontes antrópicas, esteja promovendo o aquecimento adicional da superfície terrestre (efeito estufa não natural), e que, portanto, esforços devem ser dirigidos em âmbito global para a redução das emissões desses gases a partir das fontes causadoras, bem como estudos sobre a adaptação das atividades humanas às novas condições climáticas.

Estima-se que, se a taxa atual de aumento de gases de efeito estufa continuar pelo próximo século no planeta, as temperaturas médias globais subirão  $0,3^\circ\text{C}$  por década, com uma incerteza de  $0,2^\circ\text{C}$  a  $0,5^\circ\text{C}$  (Cotton & Pielke, 1995). É esperado para o ano 2100 um aquecimento global na faixa de  $1,0^\circ\text{C}$  a  $3,5^\circ\text{C}$ , e no ano 2050 em  $1,5^\circ\text{C}$  (European Commission, 1997).

A agricultura é uma atividade altamente dependente de fatores climáticos, cujas alterações podem afetar a produtividade e o manejo das culturas, além de fatores sociais, econômicos e políticos. As condições de adaptação de estabelecimentos agrícolas à mudança do clima podem ser bem variáveis, colocando-os em posições mais ou menos vulneráveis<sup>1</sup>, em função de diferentes cenários climáticos. Segundo as previsões de longo prazo, as regiões tropicais e sub-tropicais seriam as mais afetadas pela mudança do clima. Aponta-se também que países em desenvolvimento poderão ser mais vulneráveis às alterações climáticas, devido às economias de baixo capital, à deficiência de mercados, à predominância de atividades agrícolas, entre outros fatores. Entretanto, são raras as análises feitas sobre este tema no Brasil, para a verificação desses cenários e suas possíveis implicações na agricultura (Cooperação MCT/Embrapa/PNUD/U.S. Country Studies).

---

<sup>1</sup> Define-se como vulnerabilidade a extensão à qual a mudança climática pode danificar ou ameaçar um sistema, sendo função da sensibilidade do sistema e da sua habilidade em adaptar-se às novas condições climáticas (IPCC, 1996).

Em junho de 1999, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa e o Ministério da Ciência e Tecnologia organizaram o 1º Workshop<sup>1</sup> sobre Mudanças Climáticas Globais e a Agropecuária Brasileira, realizado em Campinas, Estado de São Paulo. Os objetivos desse workshop foram: (a) apresentar análises sobre a vulnerabilidade da agricultura brasileira à mudanças climáticas e sobre os processos e técnicas relacionados à redução e absorção de gases de efeito estufa em sistemas de produção agrícola, (b) difundir o inventário de emissões de gases de efeito estufa provenientes de atividades agrícolas no Brasil, (c) promover o intercâmbio de informações entre os diferentes setores relacionados à atividade agropecuária, e (d) estimular discussões sobre novas demandas de pesquisa. Grande parte dos trabalhos apresentados nesse workshop foram reunidos e transcritos na presente publicação.

O Capítulo 1 deste livro tem o papel de introduzir o leitor na temática de Mudança do Clima, apresentando um histórico da Convenção-Quadro sobre Mudança do Clima e os principais instrumentos de política global gerados desde a sua adoção em 1992, visando o efetivo comprometimento dos países-membros na estabilização das emissões de gases de efeito estufa, e com isso, evitar consequências mais negativas ao clima global.

Na seção *Vulnerabilidade da Agricultura Brasileira à Mudança do Clima*, apresentam-se trabalhos relativos aos efeitos potenciais das mudanças climáticas globais na agricultura brasileira (Capítulo 2) e sobre seus possíveis impactos na agricultura, tecnologia e preço da terra (Capítulo 3). A grande variabilidade climática observada em âmbito regional, deve ser considerada na avaliação de efeitos de uma mudança climática global. Para ilustrar esse aspecto, os efeitos de frentes frias sobre a cultura do café, com base nas tendências climáticas inter-anuais e de longo prazo, são apresentados no Capítulo 4. A influência do uso da terra em mudanças climáticas na Região Amazônica é analisada no Capítulo 5, com base em modelos de circulação geral e monitoramento de parâmetros meteorológicos. O último capítulo desta seção (Capítulo 6) analisa a influência de crescentes concentrações de ozônio troposférico na produtividade agrícola.

Segundo o IPCC (1996), 20% do aumento do forçamento radiativo global é atribuído ao setor agrícola. O uso intensivo dos solos, principalmente se mal manejados, a queima de resíduos agrícolas, a criação de ruminantes em

---

<sup>1</sup> O Workshop foi patrocinado pela Embrapa, U.S. Country Studies, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

grandes rebanhos, o cultivo de arroz em campos inundados são exemplos de atividades agrícolas que contribuem para as emissões antrópicas de gases de efeito estufa. Entretanto, esses gases podem vir a ser parcialmente absorvidos ou estocados em comunidades vegetais, solos e em alguns sistemas agrícolas. Experiências realizadas em cerrado, em floresta equatorial e em sistemas agrícolas brasileiros mostram o potencial de absorção de gases de efeito estufa, seja pela redução das emissões de gases pelas atividades-fontes, ou pelo potencial de estocagem e absorção de carbono que eles apresentam. A mitigação<sup>1</sup> das emissões de gases de efeito estufa é um tema ainda em debate no país, e é certo que para a sua implementação, pesquisas devem ser estimuladas com o objetivo de avaliar os potenciais de emissão e de absorção de carbono.

A Convenção Quadro de Mudança do Clima (United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC), criada em 1992, requer que os países signatários elaborem, atualizem periodicamente e divulguem os inventários das emissões de gases de efeito estufa geradas por atividades econômicas, bem como que sejam adotadas medidas de precaução para prevenir, evitar ou minimizar as causas da mudança do clima e mitigar seus efeitos negativos. No Brasil, o inventário nacional das emissões de gases de efeito estufa geradas por atividades industriais, urbanas e agrícolas à atmosfera está sendo coordenado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT, com o apoio de instituições brasileiras ligadas aos vários setores econômicos. A Embrapa Meio Ambiente, entre outras instituições participantes, contribuiu para a realização do inventário das emissões de gases provenientes de atividades agrícolas. Um resumo das estimativas das emissões de gases geradas por fontes agrícolas no Brasil é apresentado no Capítulo 7.

Esse capítulo abre a seção sobre as *Emissões de Gases de Efeito Estufa por Atividades Agrícolas no Brasil e Opções para Mitigação*, onde se apresentam experiências e análises sobre as oportunidades de redução das emissões de gases em diferentes segmentos do setor agropecuário. Exemplos seguem com as possibilidades de uso energético da biomassa de resíduos agrícolas (Capítulo 8 e 9), tendo como enfoque a atividade sucroalcooleira, e com experiências indicando o potencial de acúmulo de carbono em solos sob sistemas agrícolas, pastoris e naturais (Capítulos 10, 11 e 12). Uma análise de possíveis cenários de concentração de carbono na atmosfera em função da produção agrícola para a região do Cerrado, é apresentada no capítulo 13.

---

<sup>1</sup> Intervenção antrópica para reduzir as emissões ou aumentar os sumidouros de gases de efeito estufa (IPCC, 1996).

O tratamento e o aproveitamento de dejetos animais são abordados nos (Capítulos 14, 15 e 16), com implicações no potencial de mitigação de gases de efeito estufa. O melhoramento da eficiência produtiva na criação de bovinos pode representar uma estratégia para a redução das emissões de metano por unidade de produto, o que constitui uma especial oportunidade para o setor pecuário, como demonstrado no Capítulo 17.

Em uma última seção, discutem-se os incentivos econômicos para a implementação do *Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)*, criado no Protocolo de Quioto visando promover projetos de redução das emissões de gases de efeito estufa. O Capítulo 18 traz uma análise do papel do mercado do MDL nos países envolvidos.

Este livro não pretende esgotar os temas tratados nas seções que o compõem, mas sim difundir uma seleção de experiências e análises realizadas até o presente. Há no Brasil o desafio do desenvolvimento de projetos de pesquisa que caracterizem as influências da mudança de clima global sobre as atividades agrícolas, e sua contribuição para a mudança do clima, de modo a possibilitar que as futuras políticas agrícolas possam incorporar tal componente ambiental. Há também o compromisso global de se buscar práticas e processos agrícolas que promovam a redução das emissões de gases de efeito estufa ao mesmo tempo que se mantém a sustentabilidade das atividades agrícolas. Este livro tem como objetivo, neste contexto, estimular a formulação de novas ações de pesquisa nessa temática.

Esta publicação foi realizada com recursos do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento - PNUD e do U.S. Country Studies Program, no âmbito do Projeto de Cooperação Internacional denominado “Capacitação do Brasil para cumprir os compromissos assumidos no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima”, BRA/95/G31, que esteve em desenvolvimento até 31 de dezembro de 2000.

Os organizadores expressam seus agradecimentos a todos aqueles que colaboraram na constituição deste livro, em especial, a Paulo Choji Kitamura, pelo incentivo à organização deste documento, a Maria Amélia de Toledo Leme, pela revisão bibliográfica de grande parte dos capítulos, a Volker Kirchhoff, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Clayton Campanhola, Geraldo Stachetti Rodrigues, Marcos Antônio Vieira Ligo, João Fernando Marques (Embrapa Meio Ambiente) e a Gilberto Fisch (Centro Técnico Aeroespacial-CTA) pelo auxílio na revisão de trabalhos, e a Tarcízio Rego Quirino (Embrapa Meio Ambiente) pelas sugestões fornecidas ao escopo do livro.

## Referências Bibliográficas

COTTON, W. R.; PIELKE, R. A. *Human impacts on weather and climate*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 288p.

EMBRAPA - Meio Ambiente. *Vulnerabilidade da agricultura brasileira à mudança climática global e opções de mitigação das emissões de gases de efeito estufa provenientes de atividades agrícolas*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 1999. 35p. (relatório).

EUROPEAN COMMISSION. *Climate change and agriculture in Europe - assessment of impacts and adaptations: Summary report*. Luxembourg, 1997. 37p. (EUR 17470 EN).

IPCC. *Climate change 1994. Radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 339p.

IPCC. *Climate change 1995. Impacts, adaptations and mitigation of climate change: Scientific-technical analysis*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 878p.



## Sumário

- 1 A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima e o Protocolo de Quioto. José Domingos Gonzales Miguez, **17**

### **Seção I - Vulnerabilidade da Agricultura Brasileira à Mudança do Clima**

- 2 Efeitos Potenciais das Mudanças Climáticas na Agricultura Brasileira e Estratégias Adaptativas para Algumas Culturas. Otávio João Wachholz de Siqueira, Silvio Steinmetz, Luiz Antonio Benincá de Salles, José Maurício Fernandes, **33**
- 3 Tecnologia, Mudanças Climáticas, Produtividade e Uso da Terra na Agricultura Brasileira. Robert E. Evenson, Denisard Cnéio O. Alves, **65**
- 4 Impactos das Condições Climáticas e da Variabilidade e Mudanças de Clima sobre a Produção e os Preços Agrícolas: Ondas de Frio e seu Impacto sobre a Cafeicultura nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil. José Antonio Marengo, **97**
- 5 Mudanças Climáticas na Amazônia: Estudo de Caso de Substituição de Floresta Tropical por Pastagens. Gilberto Fisch, **125**
- 6 Efeitos Potenciais do Ozônio Troposférico sobre as Plantas Cultivadas e o Biomonitoramento Ambiental. Renato Alas Martins, Geraldo Stachetti Rodrigues, **143**

### **Seção II - Emissões de Gases de Efeito Estufa por Atividades Agrícolas no Brasil e Opções para Mitigação**

- 7 Estimativa das Emissões de Gases de Efeito Estufa Provenientes de Atividades Agrícolas no Brasil. Magda Aparecida de Lima, Rita Carla Boeira, Alfredo José Barreto Luiz, Vera Lúcia S. S. de Castro, Marco Antônio V. Ligo, Osvaldo Machado R. Cabral, Rosana Faria Vieira, **169**

- 8 Mitigação das Emissões de Gases de Efeito Estufa: Uso de Resíduos da Cana-de-Açúcar como Fonte de Energia: Situação Atual, Tecnologias, Legislação e Cenários. Isaias de Carvalho Macedo, **191**
- 9 Cana-de-Açúcar: Biomassa Energética. Tomás Caetano C. Rípoli, Walter F. Molina Jr., Marco Lorenzo C. Ripoli, **201**
- 10 Potencial para Acumulação e Seqüestro de Carbono em Pastagens de *Brachiaria*. Robert M. Boddey, Bruno J. R. Alves, Octavio C. de Oliveira, Segundo Urquiaga, **213**
- 11 Sistemas de Manejo do Solo e Balanço de Carbono no Cerrados. Dimas Vital Siqueira Resck, **231**
- 12 O Efeito da Sucessão Floresta/Pastagem sobre o Estoque de Carbono e o Fluxo de Gases em Solos da Amazônia. Brigitte J. Feigl, Martial Bernoux, Carlos Clemente Cerri e Marisa C. Piccolo, **257**
- 13 Zoneamento Agrícola e Balanço de Carbono. Eduardo Delgado Assad, Maria Leonor R.C. Lopes Assad, **273**
- 14 Manejo de Dejetos e de Alimentação da Pecuária Leiteira como Estratégia para a Redução das Emissões de Metano. Aloísio Torres de Campos, Pedro Braga Arcuri, Maria de Fátima A. Pires, José Valente, Alessandro Torres Campos, **285**
- 15 Possibilidades de Uso de Dejetos Animais no Meio Rural. Jorge de Lucas Júnior, Tânia M. Baptista dos Santos, Roberto A. de Oliveira, **303**
- 16 Suinocultura e Estratégias para a Redução de Gases e Poluentes. Carlos Cláudio Perdomo, Gustavo J.M.M. de Lima, Katia Nones, **325**
- 17 Melhorando a Eficiência da Produção Pecuária para a Proteção Ambiental e o Desenvolvimento Econômico. Bernard Du Charme, Mark Orlic, **347**
- 18 Cultivo de arroz irrigado por inundação como fonte de metano. Maria Laura Turino Mattos, José Francisco da Silva Martins, **367**

### **Seção III - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo**

- 19 Incentivos Econômicos para a Cooperação no Combate ao Aquecimento Global. Ronaldo Seroa da Motta, Cláudio Ferraz, Carlos E. F. Young, **383**

Índice de siglas, **397**

## A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima e o Protocolo de Quioto

JOSÉ DOMINGOS GONZALEZ MIGUEZ

*Coordenadoria de Pesquisa em Mudanças Globais, Ministério da Ciência e Tecnologia, Brasília, DF, Brasil*

**Resumo.** *As atividades do homem estão acentuando as concentrações dos gases que criam na atmosfera o efeito estufa ocasionando um aumento da temperatura da superfície terrestre. Devido a percepção da necessidade de se desenvolver políticas e instrumentos legais internacionais sobre a questão da mudança do clima, foi adotada a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. O objetivo central da Convenção é o de alcançar a estabilização das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera num nível que impeça uma interferência antrópica perigosa no sistema do clima. Na avaliação realizada na primeira Conferência das Partes da Convenção em Berlim, em 1995, foi constatado que os compromissos assumidos pelos países desenvolvidos não seriam cumpridos e foi adotada uma resolução com o objetivo de revê-los. Em dezembro de 1997, em Quioto, Japão, na terceira Conferência das Partes, foi adotado um Protocolo à Convenção sobre Mudança do Clima, que ficou conhecido como o Protocolo de Quioto. O Protocolo de Quioto estabelece compromissos para os países desenvolvidos de redução de pelo menos 5% em relação aos níveis de 1990 das emissões antrópicas combinadas de gases de efeito estufa para os períodos de 2008 a 2012. A grande inovação do Protocolo consiste na possibilidade de utilização de mecanismos de flexibilidade para que os países desenvolvidos possam atingir os objetivos de redução de gases de efeito estufa, de maneira mais eficiente do ponto de vista de custos de cada país, sem, no entanto, comprometer a meta ambiental em questão.*

## The United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol

***Abstract.** Man activities have enhanced the concentrations of gases responsible for the greenhouse effect in the atmosphere and, thus, increased the temperature on Earth's surface. As a result of the perception of the need to develop international policies and legal instruments concerning the climate change issue, the United Nations's Framework Convention on Climate Change was created with the main objective of pursuing the stabilization of greenhouse effect gases concentration in the atmosphere at levels that prevent a hazardous anthropogenic interference in the weather system. In the evaluation made during the first Conference of Convention Parties in Berlin, in 1995, it was clear that commitments of developed countries would not be met, and a resolution was agreed upon in order to review those commitments. In December 1997, in Kyoto, Japan, during the third Conference of Parties, it was adopted a Protocol to the Convention on Climate Change, which became known as the Protocol of Kyoto. It established as compromise for developed countries, for the period 2008 through 2012, a reduction in the combined anthropogenic emissions of greenhouse-effect gases of at least 5%, in relation to 1990 levels. The most important innovation of the Kyoto Protocol was the possibility of utilization of flexibilization mechanisms in order for the develop countries to reach their goals in reducing greenhouse effect gases with greater efficiency, concerning each country's costs, without nonetheless putting at risk the environmental target under concern.*

### Introdução

Existem naturalmente na atmosfera gases conhecidos como “gases de efeito estufa”. O vapor d'água, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o ozônio ( $\text{O}_3$ ), o metano ( $\text{CH}_4$ ), o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) retêm a energia da mesma forma que os vidros de um carro fechado ou uma estufa. Esse efeito estufa natural tem mantido a atmosfera da Terra por volta de  $30^\circ\text{C}$  mais quente do que ela seria na ausência dele, possibilitando a existência de vida no planeta.

Contudo, as atividades do homem (antrópicas) estão acentuando as concentrações desses gases na atmosfera, ampliando, assim, a capacidade que

esses gases possuem de absorver energia devido ao acúmulo de radiação. Os níveis de dióxido de carbono aumentaram em volume de 280 partes por milhão, antes da Revolução Industrial, para quase 360 partes por milhão atualmente. Além disso, novos gases com a mesma propriedade, mas criados artificialmente pelo homem, passaram a ser também lançados na atmosfera, como os hidrofluorcarbonos (HFCs), os perfluorcarbonos (PFCs), o hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ), os clorofluorcarbonos (CFCs) e os hidroclorofluorcarbonos (HCFCs).

A mudança do clima é comumente chamada de aquecimento global porque uma das conseqüências mais prováveis da existência de concentrações maiores de gases de efeito estufa na atmosfera são temperaturas médias altas. Mas outros efeitos poderiam ser igualmente importantes, podendo provocar novos padrões de ventos, chuvas e circulação dos oceanos. Os cientistas continuam examinando o problema em busca de respostas mais definitivas.

Percebe-se, portanto, a necessidade de se buscar a diminuição das emissões antrópicas líquidas dos gases de efeito estufa, pois a maior preocupação reside na acumulação progressiva desses gases. Os problemas relacionados à mudança do clima que se verificam no presente são a resposta do clima à ação do homem ocorrida há dezenas de décadas. Assim, para que se evite catástrofes futuras, é necessário tomar atitudes agora, tendo em vista que a permanência desses gases na atmosfera é longa (em alguns casos medidas em algumas centenas de anos) e seus efeitos serão sentidos a longo prazo.

Embora não seja um problema considerado urgente, revela-se como uma grande ameaça ao planeta num futuro próximo. Se não forem tomadas medidas para limitar as emissões de gases de efeito estufa, as temperaturas médias globais aumentarão entre 0,8°C e 4,5°C nos próximos cem anos, e os níveis dos mares elevar-se-ão entre 13 cm e 94 cm, conforme diferentes cenários futuros encontrados na literatura sobre mudança do clima.

## **A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**

Devido a percepção da necessidade de se desenvolver políticas e instrumentos legais internacionais sobre a questão da mudança do clima, a Assembléia Geral das Nações Unidas estabeleceu, em seu período de sessões de 1990, o Comitê Intergovernamental de Negociação para a Convenção-

Quadro sobre Mudança do Clima (CIN/CQMC), ao qual encomendou a redação de uma convenção-quadro, assim como de qualquer instrumento jurídico relacionado que fosse considerado necessário. Os representantes de mais de 150 países encontraram-se durante cinco reuniões celebradas entre fevereiro de 1991 e maio de 1992 e, finalmente, em 9 de maio de 1992, foi adotada a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima na Sede das Nações Unidas (Nova York).

A Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima foi assinada inicialmente pelo Brasil durante a “Cúpula da Terra”, a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, também conhecida como RIO-92, que foi realizada no Rio de Janeiro, Brasil, de 3 a 14 de junho de 1992.

Após a assinatura do Brasil vieram se somar, posteriormente, 175 países, o que demonstra o caráter praticamente universal da Convenção. A Convenção entrou em vigor em 21 de março de 1994, noventa dias após o depósito da quinquagésima ratificação pelo parlamento dos países. No Brasil, a mesma foi ratificada pelo Congresso em 28 de fevereiro de 1994 e entrou em vigor noventa dias após, em 29 de maio do mesmo ano.

### *Objetivos*

O objetivo central da Convenção, de acordo com o seu art. 2º, é o de alcançar:

*A estabilização das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera num nível que impeça uma interferência antrópica perigosa no sistema do clima. Esse nível deverá ser alcançado num prazo suficiente que permita aos ecossistemas adaptarem-se naturalmente à mudança do clima, que assegure que a produção de alimentos não seja ameaçada e que permita ao desenvolvimento econômico prosseguir de maneira sustentável.*

A própria redação do objetivo da Convenção já demonstra as dificuldades encontradas nas negociações. Pelo lado científico, destaca-se a incerteza sobre os efeitos futuros da mudança do clima ao se propor um nível que impeça uma interferência antrópica perigosa no sistema do clima, sem que

se saiba como definir este nível e o que seria uma interferência “perigosa”. Pelo lado político, destaca-se a incerteza com os prazos em que se devem adotar medidas e políticas de mitigação da mudança do clima ao se propor que o prazo seja suficiente para assegurar aos ecossistemas adaptarem-se naturalmente à mudança do clima, mas assegurando-se a produção de alimentos e permitindo o desenvolvimento econômico de forma sustentável.

### *Princípios*

A Convenção é baseada em dois princípios básicos.

O primeiro deles seria o princípio da precaução, segundo o qual a falta de plena certeza científica não deve ser usada como razão para que os países posterguem a adoção de medidas para prever, evitar ou minimizar as causas da mudança do clima e mitigar seus efeitos negativos

O segundo princípio, base para o estabelecimento de compromissos dos países, é o da responsabilidade comum, porém diferenciada. De acordo com esse princípio, a maior parcela das emissões globais, históricas e atuais, de gases de efeito estufa é originária dos países desenvolvidos. As emissões per capita dos países em desenvolvimento ainda são relativamente baixas e a parcela de emissões globais originárias dos países em desenvolvimento crescerá para que eles possam satisfazer suas necessidades sociais e de desenvolvimento.

### *Diferenciação dos Países*

No âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, com base no princípio da responsabilidade comum, porém diferenciada, foram estabelecidos, basicamente, dois grupos de países: as Partes do Anexo I, ou seja, países que são listados no Anexo I do texto da Convenção, e as Partes não-Anexo I, ou seja, que não são listadas no referido Anexo.

O chamado Anexo I da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima inclui os países industrializados que eram membros da OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômicos) em 1992 mais a Comunidade Européia e países industrializados da ex-União Européia e do Leste Europeu.

À lista original de países do Anexo I vieram-se somar dois novos países em 1997, resultantes do desmembramento da antiga Iugoslávia, ou seja, Croácia

e Eslovênia. A Checoslováquia, originalmente constante da lista do Anexo I foi substituída também em 1997 pelos dois novos países resultantes do seu desmembramento, ou seja, República Checa e Eslováquia (Decisão 4/CP3, tomada em Quioto).

São, portanto, Partes do Anexo I: Alemanha, Austrália, Áustria, Belarus, Bélgica, Bulgária, Canadá, Comunidade Européia, Croácia, Dinamarca, Eslováquia, Eslovênia, Espanha, Estados Unidos da América, Estônia, Federação Russa, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Irlanda, Islândia, Itália, Japão, Letônia, Liechtenstein, Lituânia, Luxemburgo, Mônaco, Noruega, Nova Zelândia, Países Baixos, Polônia, Portugal, Reino Unido da Grã-Bretanha e Irlanda do Norte, República Checa, Romênia, Suécia, Suíça, Turquia e Ucrânia.

Entre os países não-Anexo I estão incluídos todas as outras partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima que não estão listadas no Anexo I.

De acordo com a terminologia da Convenção, ainda há o chamado Anexo II, que inclui os mesmos países industrializados listados no Anexo I com exceção dos países em processo de transição para a economia de mercado. Adicionalmente aos compromissos de adotar políticas e medidas para reduzir a emissão de gases de efeito estufa, os países do Anexo II têm a obrigação de prover assistência financeira e técnica aos países em desenvolvimento para que estes possam promover medidas de mitigação, adaptar-se aos impactos da mudança do clima e avaliar suas vulnerabilidades particulares.

São as Partes do Anexo II: Alemanha, Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, Comunidade Européia, Dinamarca, Espanha, Estados Unidos da América, Finlândia, França, Grécia, Irlanda, Islândia, Itália, Japão, Luxemburgo, Noruega, Nova Zelândia, Países Baixos, Portugal, Reino Unido da Grã-Bretanha e Irlanda do Norte, Suécia, Suíça, Turquia.

A Turquia, entretanto, nunca ratificou a Convenção por discordar de sua inclusão como país do Anexo II, unicamente em virtude de ser país-membro da OCDE, quando seu governo considera o país em desenvolvimento sem condições de arcar com os custos inerentes ao grupo de países do Anexo II.

Deve finalmente observar que com a entrada de países em desenvolvimento na OCDE, como é o caso do México e da Coréia do Sul, e futuramente da Argentina (que já solicitou sua admissão), um novo impasse se estabeleceu na Convenção, uma vez que estes países não desejam ser membros do Anexo I pelo ônus da participação no Anexo II para os membros da OCDE.

### *Compromissos dos Países*

Assim, com base nesses princípios, a Convenção, em seu art. 4º, parágrafo 1º, estabelece obrigações comuns para todas as Partes, levando em conta as responsabilidades comuns, porém diferenciadas dos países e suas prioridades de desenvolvimento, objetivos e circunstâncias específicos, nacionais, regionais entre outros. São elas:

- elaborar, atualizar periodicamente, publicar e tornar disponível para a Conferência das Partes inventários de emissões antrópicas por fontes e de remoções por sumidouros de todos os gases de efeito estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal;
- formular, implementar, publicar e atualizar regularmente programas nacionais e, conforme o caso, regionais, que incluam medidas para mitigar a mudança do clima, bem como medidas para permitir adaptação adequada à mudança do clima;
- promover e cooperar para o desenvolvimento, aplicação e difusão, inclusive transferência, de tecnologias, práticas e processos que controlem, reduzam ou previnam as emissões antrópicas de gases de efeito estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal em todos os setores pertinentes, inclusive nos setores de energia, transportes, indústria, agricultura, silvicultura e tratamento de resíduos;
- promover e cooperar em pesquisas científicas, tecnológicas, técnicas, sócio-econômicas e outras, em observações sistemáticas e no desenvolvimento de bancos de dados relativos ao sistema climático, cuja finalidade seja esclarecer e reduzir ou eliminar as incertezas ainda existentes em relação às causas, efeitos, magnitude e evolução no tempo da mudança do clima e as consequências econômicas e sociais de diversas estratégias de resposta;
- promover e cooperar na educação, treinamento e conscientização pública em relação à mudança do clima, e estipular a mais ampla participação nesse processo, inclusive a participação de organizações não governamentais.

Deve-se ressaltar que de acordo com o princípio da responsabilidade

comum, porém diferenciada, apenas os países listados no Anexo I devem estabelecer medidas de redução de suas emissões. No âmbito da Convenção, os países não pertencentes a esse grupo não têm compromissos de redução ou limitação de emissões antrópicas de gases de efeito estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal. Afinal, reconhece-se que a parcela de emissões globais originárias desses países crescerá para que eles possam satisfazer suas necessidades sociais e de desenvolvimento.

Assim, de acordo com o art. 4.2 (a) e (b) da Convenção, os países pertencentes ao Anexo I têm compromissos adicionais de adotar políticas nacionais e medidas correspondentes para mitigar a mudança do clima, de forma a voltar em 2000 aos níveis de emissões antrópicas de gases de efeito estufa de 1990.

As políticas e medidas adotadas pelos países do Anexo I demonstrarão que esses países estão tomando a iniciativa no que se refere a modificar as tendências de mais longo prazo das emissões antrópicas em conformidade com o objetivo da Convenção e com o princípio da responsabilidade comum, porém diferenciada.

## **Mandato de Berlim**

De acordo com a própria Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, em seu Artigo 4.2 (d), a Conferência das Partes da Convenção, em sua primeira sessão, deveria examinar a adequação das alíneas (a) e (b) do mesmo artigo. Deve-se recordar que, de acordo com essas alíneas, os países pertencentes ao Anexo I tinham se comprometido a adotar políticas nacionais e medidas correspondentes para mitigar a mudança do clima, de forma a voltar em 2000 aos níveis de emissões antrópicas de gases de efeito estufa de 1990.

Na análise da adequação de tais compromissos constatou-se que as Partes do Anexo I não conseguiriam honrar seus compromissos, com exceção do Reino Unido (devido a significativas alterações na sua matriz energética, basicamente pela descoberta de grandes reservas de gás natural no Mar do Norte e a conseqüente desativação de minas de carvão mineral) e a Alemanha (pela reestruturação de seu parque industrial após a unificação com a ex-Alemanha Oriental). Os países industrializados da ex-União Soviética e maioria

dos países do Leste Europeu encontravam-se numa situação *sui generis* de redução de emissões devido à crise econômica que havia se abatido sobre esses países e os ajustes para a transição para uma economia de mercado. O processo de transição para economia de mercado resultou em quedas significativas dos produtos destes países em relação aos níveis de 1990 com conseqüente redução significativa de emissões sem que houvesse nenhuma medida de controle de emissões posta em prática.

Assim, avaliados que os compromissos assumidos pelas Partes do Anexo I não seriam cumpridos, foi adotada em Berlim, em 1995, na primeira Conferência das Partes da Convenção do Clima, uma resolução, denominada Mandato de Berlim, com o objetivo de rever os compromissos anteriormente assumidos na Convenção.

O Mandato de Berlim estabelece que os países desenvolvidos deveriam, com base no princípio da responsabilidade comum, porém diferenciada, definir num Protocolo ou num outro instrumento legal, limitações quantificadas e objetivos de redução dentro de prazos como 2005, 2010 e 2020 para suas emissões antrópicas por fontes e remoções por sumidouros de todos os gases de efeito estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal, bem como descrever as políticas e medidas que seriam necessárias para alcançar essas metas, com um prazo até a III Conferência das Partes.

## **Protocolo de Quioto**

Em dezembro de 1997, em Quioto, Japão, na III Conferência das Partes da Convenção, conforme estabelecido no Mandato de Berlim, foi adotado um Protocolo à Convenção sobre Mudança do Clima, resultado dos dois anos de negociação desde aquela resolução.

Tal Protocolo estabelece, em seu Artigo 3, compromissos para as Partes incluídas no Anexo I da Convenção (listadas como Anexo B no Protocolo) de redução de pelo menos 5% em relação aos níveis de 1990 das emissões antrópicas combinadas de gases de efeito estufa para os períodos de 2008 a 2012. Tais Partes devem, individual ou conjuntamente, assegurar que suas emissões antrópicas agregadas equivalentes de dióxido de carbono dos gases de efeito estufa não excedam as quantidades atribuídas pelo próprio Protocolo, calculadas em conformidade com sua limitação quantificada de emissões e compromissos de redução.

Por emissões antrópicas agregadas equivalentes de dióxido de carbono dos gases de efeito estufa entende-se o somatório das emissões antrópicas de todos os gases de efeito estufa, convertidos para equivalente em CO<sub>2</sub>, utilizando-se o potencial de aquecimento global (GWP) de cada gás para 100 anos, conforme definido no IPCC–Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima.

Deve-se observar que os países listados no Anexo B do Protocolo diferem da lista original de países listados no Anexo I da Convenção porque, conforme a Decisão 4 da 3ª Conferência das Partes, dois países anunciaram suas adesões ao Anexo I somente em 1997 (Croácia e Eslovênia) e um outro país, Tchecoslováquia, foi substituído pelas duas nações que o sucederam (República Tcheca e Eslováquia).

No Protocolo de Quioto não há compromissos adicionais para os países não-Anexo B do Protocolo, conforme disposto no Artigo 10 deste instrumento. Contudo, reafirmou-se no Protocolo os compromissos existentes no Artigo 4, parágrafo 1, da Convenção.

O Protocolo de Quioto entrará em vigor, de acordo com o seu Artigo 25, no nonagésimo dia após a data na qual pelo menos 55 Partes da Convenção, englobando Partes incluídas no Anexo I que contabilizarem no total pelo menos 55 por cento das emissões totais de dióxido de carbono em 1990 das Partes incluídas no Anexo I, tenham depositado seus instrumentos de ratificação, aceitação, aprovação ou adesão.

Para os fins deste Artigo, “as emissões totais de dióxido de carbono em 1990 das Partes incluídas no Anexo I” significa a quantidade comunicada anteriormente ou na data de adoção deste Protocolo por cada Parte incluída no Anexo I em sua primeira comunicação nacional, submetida em conformidade com o Artigo 12 da Convenção.

Na lista apresentada em anexo no documento oficial do texto do Protocolo, publicado pelo Secretariado, das emissões totais de dióxido de carbono em 1990 das Partes incluídas no Anexo I, de fato estão faltando quatro países do Anexo I da Convenção a saber Belarus, Lituânia, Ucrânia e Turquia que por diferentes motivos até a data de publicação do texto do Protocolo não haviam publicado seu primeiro inventário de emissões antrópicas de gases de efeito estufa de acordo com o Artigo 12 da Convenção. Adicionalmente, a tabela apresenta as emissões de CO<sub>2</sub> somente dos setores de energia e de cimento.

Por esta tabela Estados Unidos da América e Federação da Rússia soma 53,5% das emissões de CO<sub>2</sub>. Este valor nos faz observar que enquanto estas duas nações não ratifiquem o Protocolo, este não entrará em vigor.

## Mecanismos de Flexibilidade

A grande inovação do Protocolo de Quioto consiste na possibilidade de utilização de mecanismos de flexibilidade para que os países do Anexo B possam atingir os objetivos de redução de gases de efeito estufa.

Esses mecanismos de flexibilidade pretendem possibilitar que os objetivos de redução sejam atingidos de maneira mais eficiente do ponto de vista de custos de cada país, sem, no entanto, comprometer a meta ambiental em questão.

O termo “medidas de flexibilidade” foi criado pelos Estados Unidos. Refere-se aos mecanismos de implementação cooperativa estabelecidos no Protocolo de Quioto que são, basicamente, três: implementação conjunta (Artigo 6), comércio de emissões (Artigo 17), e o mecanismo de desenvolvimento limpo (Artigo 12); sendo os dois primeiros mecanismos a serem implementados entre os países desenvolvidos (países do Anexo B), que têm compromissos de redução, e o último a ser implementado entre países que têm compromissos de redução e países sem esses objetivos (países não-Anexo B, ou países em desenvolvimento).

Cabe ressaltar que a idéia é que não haja qualquer hierarquia entre tais mecanismos.

Os mecanismos de flexibilidade ainda não foram regulamentados, sendo que ainda resta às Partes elaborar uma série de regras sobre a implementação desses mecanismos.

### *Implementação Conjunta (Artigo 6 do Protocolo de Quioto)*

A Implementação Conjunta (*Joint Implementation*) consiste na possibilidade que um país tem em financiar projetos em outros países (apenas entre países do Anexo B) como forma de cumprir seus compromissos. A idéia consiste em que um projeto gere “unidades de redução de emissões” que poderão ser posteriormente utilizadas pelo país investidor para adicionar à sua quota de emissões, sendo deduzidas das quotas de emissão do país beneficiado.

### *Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL (Artigo 12 do Protocolo de Quioto)*

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL (*Clean Development Mechanism, CDM*) teve origem na proposta brasileira apresentada em maio de 1997 ao Secretariado da Convenção em Bonn com o objetivo de estabelecer elementos para a definição do Protocolo à Convenção. A proposta brasileira consistia na criação de um Fundo de Desenvolvimento Limpo que seria formado por meio de contribuições dos países desenvolvidos que não cumprissem suas metas de redução. Tal fundo seria utilizado para desenvolver projetos em países em desenvolvimento.

Em Quioto, a idéia do fundo foi transformada, estabelecendo-se o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, que consiste na possibilidade de um país que tenha compromisso de redução (Anexo B) financiar projetos em países de desenvolvimento como forma de cumprir parte de seus compromissos. A idéia consiste em que um projeto gere certificados de reduções de emissões. Tais projetos devem implicar reduções de emissões adicionais àquelas que ocorreriam na ausência do projeto, garantindo benefícios reais, mensuráveis e de longo prazo para a mitigação da mudança do clima.

### *Comércio de Emissões (Artigo 17 do Protocolo de Quioto)*

O Comércio de Emissões (*Emissions Trading*) ainda está sendo definido, de acordo com o próprio texto do Protocolo de Quioto.

O texto prevê que a Conferência das Partes deve definir os princípios, as modalidades, regras e diretrizes apropriados, em particular para a verificação, elaboração de relatório e prestação de contas do comércio de emissões e que as Partes incluídas no Anexo B podem participar do comércio de emissões com o objetivo de cumprir os compromissos assumidos no Artigo 3 do Protocolo. Prevê, ainda que tal comércio deve ser complementar às ações domésticas, objetivando o cumprimento dos compromissos assumidos da limitação e redução de emissões antrópicas de gases de efeito estufa.

Como se deduz do texto, este artigo está ainda como uma simples intenção de definição e é dentre os mecanismos o de maior controvérsia e talvez o de mais difícil implementação, dada a situação dos países em transição

para economia de mercado estarem atualmente em um nível de emissões anuais inferior ao de 1990, o que lhes permitiria um comércio de reduções de emissões que em verdade já havia ocorrido quando da negociação do Protocolo em 1997 e que é chamado ironicamente de comércio de “ar quente”.

## **Características do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)**

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo tem especial importância para os países em desenvolvimento, tendo em vista que é o único mecanismo estabelecido no âmbito do Protocolo de Quioto que permite a participação voluntária significativa dos países em desenvolvimento.

Assim, a introdução desses mecanismos de mercado no debate sobre a mudança do clima aumenta ainda mais a complexidade do assunto, introduzindo ainda novos atores no já intrincado cenário de negociações sobre o tema. Como os mecanismos de flexibilidade ainda não foram regulamentados, ainda resta às Partes elaborar uma série de regras sobre a implementação dos mesmos.

No entanto, já se pode inferir características gerais do MDL em particular que os projetos devem ser implementados em países em desenvolvimento e devem ser aprovados pelo país em desenvolvimento. Adicionalmente, os projetos devem contribuir para a redução das emissões, os benefícios devem ser reais, mensuráveis e de longo prazo e as reduções de emissões devem ser adicionais às que ocorreriam na ausência do projeto. As reduções de emissões devem ser certificadas, auditadas e monitoradas durante a vida útil do projeto e os certificados de redução de emissões poderão ser comercializados.

Os certificados serão utilizados pelos países desenvolvidos para cumprir parcialmente com suas obrigações de redução para o período de 2008-2012. A grande diferença do MDL para os outros mecanismos é que os projetos que reduzam emissões e que satisfaçam as exigências para ser elegível como um projeto do Mecanismo poderão emitir certificados para reduções de emissões obtidas já a partir do ano 2000. Este fato, previsto no parágrafo 10 do Artigo que cria o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo dá a vantagem de pronta entrada de operação do Mecanismo em comparação a eventuais créditos obtidos com projetos implementação conjunta que somente resultaram em unidades de redução de emissões a partir de 2008.

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo para ser eficaz deverá funcionar sob a autoridade da Conferência das Partes e ser supervisionado por um Conselho Executivo.

Grande dificuldade deverá ser enfrentada para a regulamentação desses mecanismos, considerando-se que há inúmeros pontos em aberto e que cada uma das Partes tem uma posição diferente sobre cada ponto.

As principais questões em aberto são referentes principalmente aos tipos admissíveis de projetos: admissibilidade global (definida pela Convenção) ou admissibilidade local (definida pelo país); ao critério de adicionalidade financeira ou de redução de emissões; à definição de linha de base, ou seja, o quanto o projeto reduz de emissões em relação a uma referência hipotética do que seriam as emissões na ausência do projeto; ao critério de complementariedade, ou seja, o percentual da obrigação de redução que um país desenvolvido pode cumprir por meio de projetos de MDL; e finalmente quanto a definição institucional, em especial dos órgãos de regulamentação e quanto ao estabelecimento de responsabilidades.

Embora muito ainda tenha que ser estabelecido em relação ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, por meio das características gerais acima assinaladas, percebe-se que há várias perspectivas de projetos de MDL no Brasil, principalmente nas áreas de energia renovável (biomassa, energia solar, eólica, hidroelétrica), aumento de eficiência energética, redução de emissões por substituição de fonte de energia com menor emissão específica de gases de efeito estufa, aproveitamento de metano de aterros sanitários, projetos agropecuários que reduzam emissões e florestas plantadas (plantações de florestas em áreas degradadas de florestas e em áreas onde não havia florestas anteriormente). Deve-se observar em relação a florestas que o Artigo 12 do Protocolo, que cria o MDL, apenas se refere à redução de emissões e não à remoção de gases de efeito estufa da atmosfera, o que será um ponto bastante polêmico quando da regulamentação do Mecanismo.

Muitas discussões e negociações ainda serão necessárias para o estabelecimento das regras sobre a implementação dos mecanismos de flexibilidade, principalmente sobre o MDL. Esse debate deve, portanto, envolver o setor privado, tendo em vista ser o destinatário direto dessas regras, que devem, por sua vez, ser fixadas com clareza, pois delas dependerá a credibilidade do sistema.

## **Seção I**

---

# **Vulnerabilidade da Agricultura Brasileira à Mudança do Clima**



## Efeitos Potenciais das Mudanças Climáticas na Agricultura Brasileira e Estratégias Adaptativas para Algumas Culturas<sup>1</sup>

OTÁVIO JOÃO WACHHOLZ DE SIQUEIRA

SÍLVIO STEINMETZ

LUÍZ ANTÔNIO BENINCÁ DE SALLES

*Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS, Brasil*

JOSÉ MAURÍCIO FERNANDES

*Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS, Brasil*

**Resumo.** *As evidências ambientais e as projeções sócio-econômicas acerca do efeito estufa ressaltam a importância do tratamento do tema no contexto da auto-sustentabilidade. Pesquisas sobre o efeito estufa para o Brasil, obtidas a partir de modelos de equilíbrio atmosférico projetam elevações de temperatura em torno de 3° a 5°C e um aumento médio no volume anual de chuvas em torno de 11%, com aumentos mais expressivos nas latitudes maiores. Projeções de aumentos no volume de chuvas para março a maio e setembro a novembro, podem representar maiores dificuldades na fase reprodutiva de cultivos de inverno, riscos de erosão e problemas na colheita de cultivos de verão. Os modelos assinalam reduções do volume de chuvas para o Nordeste, especialmente no inverno (21%) e para o mês de dezembro, na região Sul (extremo Sul), representando potencial para agravamento de conflitos quanto à disponibilidade de água. São analisados resultados obtidos através dos modelos de simulação da série IBSNAT e do sistema de suporte de decisão DSSAT, utilizando cenários ambientais gerados através dos modelos "GCMs" (General Circulation Models). São apresentadas projeções de encurtamentos do ciclo em torno de 15% para as culturas de trigo e milho e nenhum efeito para a soja e reduções da produtividade potencial média, em torno de 30 e 16%, para o trigo e milho, com reflexos positivos para a cultura da soja, em torno de 21%. Estimativas de mudanças na produção nacional de grãos de trigo e de milho, correspondem, respectivamente, a reduções em torno de 1 e 2,8 milhões de toneladas, em contraste com aumentos de 3,5 milhões de toneladas para a soja, sendo esta beneficiada pelo aumento da*

<sup>1</sup> Trabalho parcialmente associado ao CNPq (Contrato 520379/95)

concentração de  $CO_2$  na atmosfera. Modelos GCMs de avaliação progressiva do efeito estufa antecipam, para o trigo, efeitos depressivos lineares até cerca de 530 ppm  $CO_2$  (cerca de 2050), e uma redução de impacto para o período imediatamente posterior, provavelmente relacionada ao efeito benéfico do  $CO_2$ . Para as demais culturas as tendências são lineares para todo o período simulado (1990-2060). Em face dos impactos potenciais das mudanças climáticas sobre o desenvolvimento vegetal e a ocorrência de pragas e de doenças, foram avaliadas algumas alternativas tecnológicas. Destaca-se, para a região Sul, o melhoramento genético voltado a plantas tolerantes a temperaturas mais elevadas, complementado por manejo de irrigação e de nitrogênio; para o Nordeste a irrigação e o manejo da fertilização nitrogenada apresentam resultados promissores. Pesquisas relacionadas ao manejo de pragas, doenças de plantas e do solo, tornam-se cada vez mais importantes no contexto do efeito estufa, em face dos impactos ambientais esperados.

## Potential Effects of Climate Changes on Brazilian Agriculture and Adaptation Strategies for Some Crops

**Abstract.** Environmental evidence and socio-economic projections associated with the greenhouse effect require that the issue be considered in the context of sustainability. Projections of the greenhouse effect for Brazil using General Circulation Models estimate temperature increases at approximately 3-5°C. Projected rainfall increases for the periods March-May and September-November could result in higher disease pressure during the reproductive phase of winter cereals, erosion risks and harvesting problems for summer crops. Projected rainfall reduction during the winter in the Northeast region (21%) and in December in the southernmost region of the country could worsen water use conflicts. Simulation studies using the IBSNAT crop growth models and the DSSAT decision-making support system, as well as climate scenarios generated with General Circulation Models, are presented for wheat, maize and soybean. Wheat and maize cycles would be shortened by 15%, but soybean would not be affected. Grain yield decreases have been estimated at close to 30% for wheat and 16% for maize, with a positive effect for soybean (21%), the latter probably associated to the beneficial effect of increased  $CO_2$  concentration in the atmosphere. Given the current farmed area, the national grain supply would be reduced by almost one million tons for wheat and 2.8 million tons for maize. Soybean production would increase by approximately 3.5 million tons, despite differences between the cropped areas. The GCMS transient model

*estimates point to linear decreases in wheat yield of up to 530 ppm of CO<sub>2</sub> for the 2050s and lessened impact thereafter, probably associated to the "fertilisation" effect of CO<sub>2</sub>. Other crops also show a linear trend. Among the alternatives for diminishing the negative impacts of climate changes, plant breeding to high temperature tolerances, associated with irrigation and nitrogen management, hold promising results for the South region. Irrigation and nitrogen fertilisation would also have positive effects in the Northeast region. Future research projects should cover such strategic areas as integrated pest-disease and soil management.*

## **Introdução**

O efeito estufa e as perspectivas de aquecimento global, no futuro próximo, constituem-se em uma preocupação da atualidade, discutida mundialmente, especialmente a partir da última década. A intensidade e a frequência de eventos climáticos, conforme verificado nos últimos anos, requerem análises no contexto da sustentabilidade.

Este trabalho apresenta análises acerca do tratamento da questão do efeito estufa e uma revisão do conhecimento sobre as implicações associadas, ressaltando algumas questões agro-ambientais relevantes. São apresentadas projeções aplicadas a cenários agrícolas brasileiros e indicadas algumas estratégias mitigadoras. Antecipa-se que as questões gerais, abordadas na primeira parte, possam provocar, no leitor, análises complementares sobre o tema.

## **Revisão do Conhecimento e Análise Crítica**

### *A Questão do Efeito Estufa*

O efeito estufa e as perspectivas de aquecimento global no futuro próximo constituem-se uma preocupação da atualidade, discutida mundialmente. As evidências do problema estão embasadas em registros históricos, na experimentação em laboratório e em campo, no aprimoramento do conhecimento sobre a dinâmica da atmosfera e em medições que incluem o monitoramento global de condições atmosféricas.

Resultados de análises químicas do ar contido em camadas profundas de geleiras polares indicam, por exemplo, que a concentração atual de CO<sub>2</sub> é cerca de 30% mais elevada do que a existente em anos anteriores a 1800 (Barron, 1995). Entre os dados mais recentes a respeito do problema, incluem-se as medições realizadas em cerca de 2.000 estações meteorológicas espalhadas no globo, demonstrando elevações da temperatura do ar em torno de 1°C desde 1880 (Hillel & Rosenzweig, 1989). Estes autores apresentam evidências a respeito da década de 1980 como o período de maior aquecimento, sendo considerado o ano de 1987 como o ano mais quente até então registrado, ressaltando, no entanto, a possibilidade do fenômeno ser resultado de variações climáticas aleatórias.

### *Os Cenários Climáticos Globais “Virtualmente Certos”*

Atualmente existe consenso em torno do aquecimento global como o principal reflexo do efeito estufa. Segundo a European Commission (1997), o relatório do Segundo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) incorpora o consenso científico oficial no mundo sobre o tema e estima o aquecimento global em torno de 1°C e 3,5°C até o ano 2100. Persistem, no entanto, algumas diferenças entre autores, em relação à magnitude do efeito e o período. Segundo Barron (1995), por exemplo, as previsões de “consenso” são mais amplas, situando os aumentos globais de temperatura na faixa de 1,5°C e 4,5°C. De acordo com a revisão de literatura realizada por Hillel & Rosenzweig (1989), reunindo dados obtidos até o final da década de 1990, através de modelos de circulação atmosférica (GCMs), a faixa dos aumentos potenciais de temperatura pode ser ainda mais ampla, situando-se entre 1°C e 5,5°C, para o ano 2030, uma vez incorporadas variações regionais.

O impacto potencial do aquecimento global, dentro da faixa de 5°C pode ser muito elevado, comparando-se, por exemplo, com as temperaturas médias estimadas para a era glacial, ocorridas a cerca de 18.000 anos atrás. Embora as estimativas de temperatura para o período sejam de 3°C a 4°C inferiores às atuais, houve a cobertura permanente com gelo em boa parte da América do Norte (Barron, 1995).

### *A Postura Científica Perante o Problema*

O posicionamento em relação ao problema admite algumas possibilidades, conforme ressaltado por Titus (1990), incluindo-se a atitude de indiferença, a tomada de decisões antecipadas, o planejamento e o desenvolvimento de ações de pesquisa e de educação. Outras observações importantes são apresentadas por Hillel & Rosenzweig (1989). Referindo-se ao questionamento perante o efeito estufa, transcreve-se parte do texto e a essência da abordagem, apresentada pelos autores, pela forma pertinente de tratamento do tema:

*Alertas de cientistas são geralmente apresentados com cautela, cercados pelos limites de níveis de admissão de incerteza... menos restritivas são as expressões ou manifestações verbais e escritas daqueles dramatizadores do assunto. A tendência dos alarmistas no sentido do exagero não deve conduzir para a total inércia ou para a fatalística aceitação da calamidade. Por outro lado, não se pode dar ao luxo, fora de qualquer cepticismo, em ser complacente e ignorar o assunto. Em vez disto, deve-se direcionar para o aprendizado máximo a cerca dos processos envolvidos e para a consideração do que pode ser feito a cerca disto, em tempo e no tempo... de qualquer forma vale a pena prestar atenção às “previsões”, considerar suas limitações enquanto olhando para as evidências “empíricas” emergentes. Ao serem analisados os impactos na agricultura, no uso de energia e em outros aspectos, transparece a importância do melhor conhecimento dos efeitos potenciais das mudanças climáticas, como ponto de partida para o planejamento de políticas alternativas para os problemas decorrentes. Enfática é a referência de que o maior risco reside na total ignorância da possibilidade da mudança climática e na falha em considerar qualquer possibilidade de minimização e ou de adaptação em tempo.*

### *Alguns Impactos Potenciais no Agroecossistema*

Os impactos do aquecimento global, pela ampla possibilidade de reflexos no meio ambiente, ameaçam a preservação dos sistemas agrícolas atuais mas podem, também, tornarem-se indutores de oportunidades para o desenvolvimento agrícola sustentável. Neste contexto incluem-se as observações de Hillel &

Rosenzweig (1989), referindo-se às tendências dos impactos do aquecimento global, ao afetar os padrões regionais de precipitação e de evapotranspiração, podendo repercutir em todo o regime hidrológico, biológico e agrícola. Mais recentemente, os mesmos autores, voltando ao tratamento da questão (Rosenzweig & Hillel, 1995), passam a acrescentar relevância ao aumento da variabilidade climática, aos problemas relacionados à demanda e à disponibilidade de água, à fertilidade dos solos, à erosão, à dinâmica de pragas e doenças, à salinização dos solos em áreas costeiras, entre outros, com o foco na adaptabilidade de políticas técnicas, econômicas e sociais. Considerando que os efeitos do aquecimento global devem afetar questões relacionadas à vegetação, aos animais e aos microorganismos, torna-se importante considerar a questão dentro do enfoque da estabilidade ecológica (Bright, 1997). A seguir, são ressaltadas algumas abordagens a respeito do assunto, direcionadas ao contexto agrícola.

### *Alguns Efeitos Relacionados ao Solo*

Aumentos de temperatura decorrentes do efeito estufa, especialmente quando associados à maior umidade, podem alterar o equilíbrio químico, físico e biológico do solo, com reflexos na fertilidade e no potencial produtivo. Temperaturas mais elevadas podem aumentar a taxa de decomposição da matéria orgânica, embora aumentos na biomassa das raízes, decorrentes de uma maior atividade fotossintética, possam, potencialmente, exercer efeito compensatório. As expectativas são de que a reciclagem de nutrientes seja acelerada sob temperaturas mais elevadas e resultem alterações na fixação biológica do nitrogênio do ar (Kimball, 1985, citado por Hillel & Rosenzweig, 1989). Também são referidas possibilidades de serem intensificados os processos de acidificação dos solos e ocorrerem maiores perdas de nitrogênio por escoamento superficial (Bright, 1997).

Análise interessante, neste direcionamento, é apresentada recentemente por Bright (1997), ao referir que os cenários futuros, decorrentes do efeito estufa, direcionam-se, em geral, para ambientes mais chuvosos, devido à mudança de ciclos hídricos, representando maiores volumes de água. Manifesta-se, também, quanto à possibilidade do paradoxo da ocorrência de secas em algumas regiões, devido à irregularidade na distribuição das chuvas. Baseando-se em diversas referências, o autor menciona a possibilidade das chuvas tenderem a ser mais “concentradas”, representando maior potencial de erosão,

de inundações e de assoreamentos, entre outros prejuízos. Por outro lado, também menciona a possibilidade da diminuição da cobertura vegetal, em decorrência de secas, proporcionando maior exposição do solo aos processos erosivos e a riscos de deterioração, podendo induzir processos de desertificação, em algumas regiões. Outros aspectos a considerar resultam da possibilidade do aumento do nível dos oceanos e reflexos decorrentes na agricultura em terras baixas, em face do impedimento de drenagem de águas superficiais e subterrâneas, do aumento e frequência de inundações e dos riscos de intrusão de sais nos estuários e aquíferos, especialmente em áreas costeiras.

### *Alguns Efeitos Relacionados ao Componente "Planta"*

Baseado em análise de tendências, estima-se que a concentração de  $\text{CO}_2$  na atmosfera possa dobrar no decorrer da metade do próximo século, resultando em efeitos diretos e indiretos sobre as plantas. Os reflexos na fotossíntese deverão ser, em geral, positivos, embora as respostas possam variar entre as plantas (Hillel & Rosenzweig, 1989; Rosenzweig & Hillel, 1995). Os reflexos na produção agrícola poderão ser positivos em decorrência da estimulação da fotossíntese, especialmente para plantas com metabolismo tipo  $\text{C}_3$  (arroz, soja e trigo), e do melhoramento da eficiência do uso da água como resultado da redução da condutividade estomatal – fechamento dos estômatos (Reyenga et al., 1998; Hillel & Rosenzweig, 1989). Por conseguinte, as plantas tipo  $\text{C}_4$  (milho, sorgo, cana-de-açúcar e milheto), por serem menos responsivas aos aumentos de  $\text{CO}_2$ , poderão sofrer efeitos supressivos por competição com ervas daninhas tipo  $\text{C}_3$  (Hillel & Rosenzweig, 1989). Aspecto importante a ressaltar diz respeito à possibilidade de mudanças na relação C:N das plantas, especialmente sob disponibilidade de nitrogênio restrita, o que pode implicar na relação das plantas com o meio, em face da menor qualidade nutricional e desdobramentos em relação à populações de fungos, bactérias, entre outros microorganismos decompositores de matéria orgânica, com reflexos no enfraquecimento do ecossistema (Bright, 1997). Neste contexto, incluem-se também literaturas diversas, apresentadas por Reyenga et al. (1998), referentes ao trigo, entre outras.

Os reflexos do aquecimento global sobre as plantas são explicados a partir da aceleração das reações catalizadas enzimaticamente, podendo resultar na perda da atividade das enzimas, sendo este um fator associado à tolerância

das plantas ao calor (Bieto & Talon, 1996). A faixa ótima de temperatura varia entre as espécies e cultivares, e a vulnerabilidade a temperaturas elevadas depende, muitas vezes, do estágio de desenvolvimento, conforme abordado por autores diversos citados por Hillel & Rosenzweig (1989). Alguns padrões de comportamento têm sido ressaltados na literatura, incluindo-se, entre eles, referências a danos decorrentes de exposições longas à temperaturas superiores a 35°C por parte de cultivos agrícolas de origem temperada (Christiansen, 1978). Para o caso do arroz, existem referências de temperaturas ótimas na faixa de 15°C a 35°C, sendo muito prejudiciais as temperaturas superiores a 40°C na fase reprodutiva inicial (diferenciação da panícula e início da floração). Para o cafeeiro, as temperaturas ótimas situam-se entre 18°C e 21°C, sendo prejudiciais quando ultrapassam 24°C. Para forrageiras são citadas temperaturas entre 20°C - 35°C e 30°C-35°C, como ótimas para a fotossíntese, respectivamente para plantas C<sub>3</sub> (gramíneas temperadas e leguminosas temperadas e tropicais) e para plantas C<sub>4</sub> (gramíneas tropicais). Por outro lado, para a cultura de cana-de-açúcar o fator temperatura não é considerado muito relevante (Castro et al., 1987). Entre os reflexos dos aumentos de temperatura para as plantas, inclui-se o encurtamento do período vegetativo, resultante da aceleração da fenologia do crescimento, com desdobramentos no comprimento do período reprodutivo (enchimento de grãos), podendo resultar em menor potencial produtivo. Por outro lado, as temperaturas mais elevadas, enquanto aceleram os processos de crescimento, também aumentam a taxa de respiração das plantas, podendo este efeito suprimir as vantagens do efeito benéfico do aumento de CO<sub>2</sub> (Hillel & Rosenzweig, 1989). Entre os índices utilizados para quantificar as necessidades térmicas dos cultivos, incluem-se os denominados “graus-dia”, baseados em temperatura máximas e mínimas diárias ou mensais. Aumentos desses valores podem induzir mudanças em padrões de crescimento, podendo repercutir em termos de zoneamento geográfico (Hillel & Rosenzweig, 1989).

Outro componente ambiental importante, destacado por Hillel & Rosenzweig (1989), decorrente do efeito estufa, e que pode afetar a relação das plantas com o meio, refere-se a expectativas de mudanças no regime hídrico, decorrentes de alterações na precipitação sazonal, inter-sazonal e inter-anual ou da inter-relação com mudanças na taxa e na variação sazonal de evapotranspiração. Ressaltam os autores que, de uma forma geral, a expectativa de cenários de clima, decorrentes do aquecimento global, direciona-se a aumentos de precipitação, por maior demanda de evaporação devido à maior capacidade

do ar aquecido de reter maior volume de água, embora exista a possibilidade de efeitos localizados. No todo, o clima resultante decorre do balanço entre a precipitação e a evapotranspiração potencial, tendendo, em geral, para climas mais úmidos em áreas costeiras tropicais.

Interessante abordagem, complementar, apresentada recentemente por Bright (1997), refere-se à resposta de comunidades de plantas às mudanças do ecossistema, podendo, por um lado, contribuir para aumentar a biodiversidade, mas com possibilidade de efeitos negativos a longo prazo, com efeitos supressivos de espécies nativas. Outra questão relevante, tratada cada vez mais com maior ênfase, direciona-se à necessidade do tratamento dos impactos de cenários, de forma transcendente ao ponto de vista climático em si, e dentro de um contexto sistêmico, devido à questão do sinergismo de interações do mundo real e do *overlap* com outros componentes de pressão ambiental (Bright, 1997).

### *Algumas Expectativas em Relação a Insetos (Pragas Agrícolas)*

Os insetos-pragas consomem cerca de 40% a 50% da produção mundial de alimentos e de fibras, sendo responsáveis por perdas agrícolas da ordem de 30%, e 10% a 20%, respectivamente, nas etapas de pré e pós-colheita (Cammel & Knight, 1992). A faixa de temperatura ótima para os insetos pragas das principais culturas agrícolas situa-se entre 22°C e 38°C (Taylor, 1981). Temperaturas superiores a 40°C-50°C são fatais (Chapman, 1988; Wigglesworth, 1972) e existem consideráveis diferenças entre as espécies de insetos, especialmente com relação a mecanismos adaptativos a baixas temperaturas (Salt, 1961). Os insetos não possuem mecanismos fisiológicos para manutenção da temperatura do corpo, tendo sido reconhecido que a temperatura, isoladamente, é o fator mais importante para determinar taxas de desenvolvimento dos insetos (Haddad et al., 1998).

Existe consenso de que o metabolismo dos insetos é acelerado em temperaturas mais elevadas, podendo influenciar a sobrevivência, o desenvolvimento, a reprodução e os movimentos migratórios. Nessas regiões, a distribuição e a abundância dos insetos pragas encontra-se, normalmente, limitada pelas baixas temperaturas. Relatos do hemisfério norte (Europa, Estados Unidos e Canadá) têm demonstrado que, em anos mais quentes, os insetos apresentam maior crescimento, reprodução mais freqüente e antecipação de

processos migratórios e dispersivos (Bright, 1997). Assim, é possível antecipar o aumento e maior velocidade nos processos de expansão geográfica de algumas espécies de insetos pragas, especialmente aquelas com alta mobilidade, bem como repercussões na duração do ciclo de vida, possibilitando a ocorrência de gerações adicionais. Acredita-se que as mudanças assumam características adaptativas e evolucionárias (Gutierrez, 1987). Além destas mudanças potencializarem a influência das pragas já existentes, poderá haver expressão de novas espécies de pragas ou de pragas secundárias, atualmente restringidas pelas temperaturas mais baixas. Estas mudanças nos padrões de comportamento dos insetos podem ser muito expressivas, considerando o fato de apresentarem respostas à pequenas mudanças de temperatura, conforme evidências, por exemplo, registradas na América do Norte e na Costa Rica, com relação à populações de borboletas e de mosquitos (Bright, 1997).

Além das questões anteriormente referidas, relacionadas à antecipação da proliferação de insetos-pragas, devido a condições mais favoráveis de crescimento e de reprodução, não podem ser excluídas, do contexto, as relações diretas com os agentes de controle biológico ou inimigos naturais. A ação de inimigos naturais (predadores, parasitóides e patogênicos) é responsável pela diminuição em cerca de 30% do total das perdas causadas por insetos pragas, especialmente em relação a pré-colheita. Estes, sem dúvida, têm maior sensibilidade à mudanças de temperatura, havendo importantes efeitos interativos a considerar entre as espécies (Bright, 1997).

Entre outras questões abordadas na literatura, inclui-se a possibilidade de ocorrerem respostas seletivas para algumas espécies, em função da variação dos padrões de temperatura, podendo implicar padrões de sobrevivência e de multiplicação populacional (Bright, 1997). Outros trabalhos indicam, também, que alterações de padrões de circulação atmosférica podem afetar a dispersão de alguns grupos de inimigos naturais, especialmente daqueles cuja dispersão possa ser influenciada pela ação do vento (Hillel & Rosenzweig, 1989). Aspectos complementares, abordados por Bright (1997), referem-se à possibilidade de ocorrerem desdobramentos nas populações de insetos associados às mudanças dos padrões nutricionais das plantas, havendo possibilidade de que efeitos extensivos influenciem nos demais componentes do ecossistema. Por outro lado, existe a possibilidade de adaptação entre as espécies, fato este que deve ser considerado no seu conjunto e que pode resultar em efeitos regionais diferenciados (Bright, 1997).

Assim, torna-se importante considerar, no contexto do efeito estufa, o melhor conhecimento do impacto dos cenários decorrentes do efeito estufa nas populações dos insetos pragas e o monitoramento quanto ao desenvolvimento de novas pragas. A exploração do potencial do manejo integrado de pragas destaca-se como alternativa relevante para controlar as populações dos insetos-pragas, visando preservar o potencial produtivo dos cultivos, requerendo atenção redobrada a busca de práticas alternativas de controle de perdas pós-colheita.

### *Alguns Componentes Fitopatológicos Associados a Mudanças Ambientais*

A temperatura do ar e do solo pode influenciar as taxas de crescimento e de reprodução da maioria dos patógenos.

Os “fungos”, durante o seu desenvolvimento, passam por três fases distintas: latência, infecciosa e necrótica. O período latente, compreendido da penetração até a produção de novos esporos, é governado, basicamente, pela temperatura. A fase infecciosa, onde ocorre a dispersão dos esporos, é influenciada por fatores como chuva e vento, além da temperatura. A exaustão na capacidade de produzir novos esporos está relacionada com a disponibilidade de substratos e também com a temperatura. Diferentes espécies de fungos apresentam respostas distintas às condições ambientais. À medida que a temperatura se aproxima da condição ótima, para a espécie, menor será o ciclo de vida do patógeno, possibilitando, em alguns patossistemas, um aumento no número de ciclos durante uma mesma estação de cultivo do hospedeiro (Cambell & Madden, 1990).

As “bactérias” são microorganismos de organização celular simples, sendo a fase reprodutiva altamente influenciada pela temperatura e pela disponibilidade e qualidade do substrato. As bactérias são dependentes da existência de água livre no limbo foliar para a penetração no hospedeiro. Esta ocorre, em geral, através de aberturas naturais, como estômatos e ferimentos. Em condições ótimas de temperatura e de umidade as bactérias multiplicam-se rapidamente. Existem diferenças na taxa de crescimento entre espécies de bactérias fitopatogênicas; algumas apresentam exsudatos aos 2 a 3 dias após a penetração enquanto outras podem tardar de 4 a 14 dias antes que qualquer sinal possa ser observado. (Fahy & Persley, 1983).

A temperatura apresenta um efeito direto sobre a proporção de “nematódeos” do gênero *Meloidogyne spp.* que se diferenciam como machos. Em baixas temperaturas (15°C-20°C) mais do que 80% dos indivíduos se diferenciam como fêmeas enquanto o contrário é verdadeiro quando a temperatura é de 32°C (Bruehl, 1986).

Além do efeito direto da temperatura sobre os microrganismos patogênicos existe o efeito indireto sobre os vetores de agentes patogênicos, principalmente as “víroses” (Matthews, 1981). Os insetos são os principais vetores de viroses. Os fungos zoospóricos, os ácaros e os nematódeos têm importância secundária em relação aos insetos. Os vírus de plantas dependem, para a sua disseminação, da ação de vetores. A mosca branca (*Bemisia tabaci*), por exemplo, é considerada uma das mais importantes transmissoras de viroses, como no caso do mosaico dourado do feijão. Recentemente, uma nova espécie de mosca branca (*Bemisia argentifolii*), relatada no Brasil, também presente nas principais regiões agrícolas do mundo, adapta-se à temperatura e umidade elevadas. Nas faixas de temperatura adequadas ao desenvolvimento das plantas, mais calor invariavelmente resulta em uma maior multiplicação e no maior movimento das partículas do vírus. O período para o aparecimento dos primeiros sintomas também é reduzido à medida que a temperatura aumenta. Entretanto, de maneira similar a outros fenômenos biológicos, temperaturas acima de um determinado limite ocasionam declínio da taxa de multiplicação dos vírus embora também possam ser antecipados processos adaptativos quanto ao desenvolvimento de estirpes de vírus à nova condição.

De uma forma geral, entre os fatores ambientais mais importantes que podem influenciar o desenvolvimento de “agroepidemias” incluem-se a umidade e a temperatura, como parte de um cenário ambiental conjunto (Agrios, 1997). Considerando as perspectivas do aquecimento global e o fato da temperatura ser considerada fundamental no desenvolvimento de epidemias, existem perspectivas de mudanças significativas nas relações planta-patógeno. Entre as mudanças, visualizam-se questões associadas à abrangência geográfica e à dinâmica populacional. Assim sendo, todas as doenças não serão, ao mesmo tempo, severas em um hospedeiro geneticamente suscetível, devido às influências e ao efeito controlador do meio ambiente (Bruehl, 1986; Agrios, 1997). Bright (1997) ressalta a possibilidade da disseminação de novas doenças estar associada à migração de organismos patogênicos e de parasitas, em decorrência de alterações no equilíbrio ambiental. Refere-se sobre a possibilidade

da disseminação de novas doenças ou da alteração de taxas de infecção das já estabelecidas, citando, como exemplo, o caso do fungo *Phytophthora cinnamomi*, causador de doenças de plantas da flora nativa na Tasmânia.

### *Algumas Questões Agroclimáticas Adicionais*

Apesar dos avanços tecnológicos, as previsões relativas ao clima futuro ainda são consideradas imperfeitas. Conforme ressaltado por Barron (1995), as incertezas estão associadas à variabilidade natural do clima, às dificuldades quanto a previsão acurada de emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa e aos efeitos potenciais de outros fatores. Entre estes incluem-se os impactos decorrentes de erupções vulcânicas, os causados por ações antrópicas e os associados ao incompleto conhecimento do sistema climático global. O entendimento atual quanto às tendências do aquecimento global, conforme apontado por Bright (1997), é no sentido dos reflexos serem mais expressivos nas latitudes maiores do que nos trópicos. Como parte dos cenários de variabilidade climática, inclui-se a elevação do nível dos oceanos, decorrente principalmente do efeito de expansão das águas pelo calor mas também pelo degelo polar. Há também expectativa de que os furacões tornem-se mais fortes e freqüentes em resposta ao aumento de energia resultante do aquecimento dos oceanos e do ar. De forma geral, são esperados cenários de clima mais extremos, onde secas, inundações e ondas de calor serão mais freqüentes. Muitos cientistas argumentam que o aquecimento dos oceanos e da atmosfera pode aumentar a quantidade de energia disponível para desenvolver tempestades severas, cujos impactos sobre os sistemas naturais ainda não estão bem avaliados (Bright, 1997).

As questões relacionadas à variabilidade climática têm merecido muita atenção nos últimos anos, em face da tendência do aumento na freqüência de eventos climáticos severos e seus impactos sociais agregados. Do ponto de vista agrícola, o crescimento das culturas e a qualidade da produção podem ser muito sensíveis à variações extremas de ambiente, mesmo que de curta duração, especialmente quando associadas à temperaturas muito elevadas (golpes de calor), ao congelamento severo e à secas persistentes (European Commission, 1997). A magnitude dos efeitos depende, no entanto, da associação da ocorrência dos eventos com o grau de susceptibilidade das plantas, estando este associado a estádios de desenvolvimento, os quais variam entre as espécies.

Conforme ressaltado por Hillel & Rosenzweig (1989), o gradiente em temperatura entre os trópicos, mais aquecidos, e as regiões frias polares constitui-se na principal causa da variabilidade climática. Para a agricultura, este problema agrava-se na medida que mudanças na incidência ou na severidade de fenômenos extremos podem ter um efeito magnificado. Uma chuva torrencial, por exemplo, pode destruir totalmente a colheita, ainda que as condições ambientais possam ser consideradas favoráveis em termos médios, sem considerar a possibilidade de efeitos indiretos associados, como por exemplo o desenvolvimento de uma infestação relâmpago de determinada praga, podendo afetar uma região inteira. Essas questões requerem maior estudo, implicando em pesquisas que transponham o enfoque tradicional do “tratamento de médias”, o que tem acontecido somente recentemente, conforme ressaltam Parry & Carter (1985), também referidos por Hillel & Rosenzweig (1989). Interessantes resultados neste contexto, também citados por Hillel & Rosenzweig (1989), constituem os obtidos por Mearns et al. (1984), tendo sido encontrada uma tendência não linear na relação entre mudanças em temperaturas médias com a probabilidade de ocorrência de temperaturas extremas. Assim, pequenas mudanças em temperatura média podem resultar em mudanças relativamente grandes na frequência de eventos extremos. Reforçam estas observações os resultados obtidos por Waggoner (1986), citado por Hillel & Rosenzweig (1989). Demonstram, por exemplo, que um aumento relativo na probabilidade de seca e menores rendimentos agrícolas decorrentes, associados a diminuições no volume de chuvas pode ser maior que a mudança relativa da precipitação em si. Estas questões são ainda mais relevantes em regiões onde as culturas crescem sob condições próximas da faixa de tolerância à temperaturas máximas, onde pequenas mudanças na temperatura podem resultar em efeito restritivo muito significativo à produção, tornando determinadas regiões altamente sensíveis à mudanças em componentes climáticos.

Entre os estudos aplicados à análises de risco da atividade agrícola, associados a cenários climáticos decorrentes do aquecimento global, incluem-se os recentemente conduzidos na Europa (European Commission, 1997), abrangendo diversos países e várias espécies agrícolas (milho, trigo, cevada, cana-de-açúcar, girassol, uva e hortaliças). Comprovam que os impactos na agricultura apresentam contexto regional, ressaltando, por exemplo, aumentos na probabilidade de risco em partes do Sul da Europa, em decorrência do aumento da temperatura para faixas superiores às toleradas pelas culturas. Os estudos

mostraram, também, que a variabilidade interanual na produção agrícola tende a intensificar-se, em proporção direta a aumentos de temperaturas médias, especialmente no Sul da Europa, sob efeito de períodos de secas, em adição às estimativas de queda na produção agrícola.

### *Modelagem como Ferramenta de Análise*

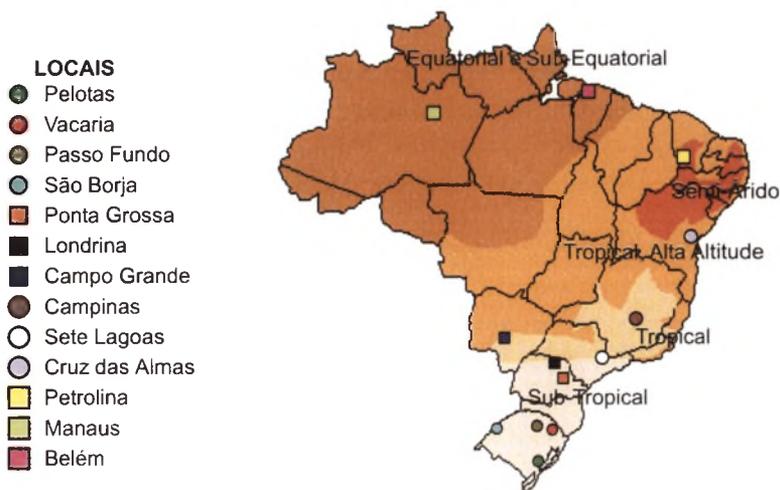
Estudos utilizando modelagem, simulação e sistemas de suporte de decisão, voltados a incerteza climática, com aplicações direcionadas à agricultura, são relativamente recentes. Entre outras referências, neste contexto, incluem-se: EPA (1989, 1994), Siqueira et al. (1994), European Commission (1997), Reyenga et al. (1998).

Conforme apontado por Barron (1995) e Reyenga et al. (1998), entre as principais ferramentas utilizadas para estimar cenários climáticos associados ao efeito estufa, incluem-se os modelos de equilíbrio atmosférico (“General Circulation Models-GCMs”), ressaltando que as previsões do clima futuro são, por outro lado, imperfeitas. Importantes considerações sobre o uso de modelos teóricos para integrar processos e projetar cenários futuros, são apresentadas por Hillel & Rosenzweig (1989), ressaltando como ponto forte o fato de integrarem uma base qualificada do conhecimento e, como ponto fraco, de incorporarem, também, a nossa ignorância. Especificamente, com relação aos modelos GCMs, ressaltam limitações diversas, incluindo-se, principalmente as associadas à baixa resolução espacial e a deficiências em reproduzir cenários regionais. Os modelos GCMs, incorporam, ainda, muita incerteza, resultante, entre outros fatores, da dificuldade em simular, adequadamente, pela sua complexidade, os processos biológicos superficiais, como os associados à umidade do solo e à cobertura vegetal.

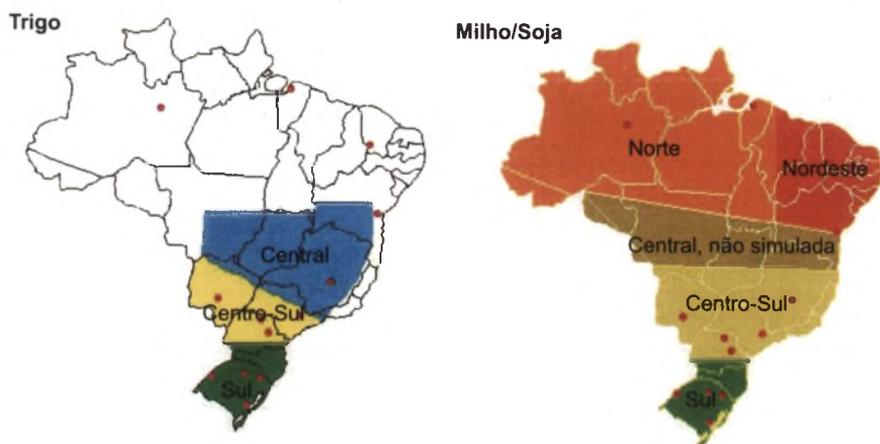
### **Resultados Obtidos no País, Discussão e Implicações**

As pesquisas voltadas ao efeito de mudanças climáticas globais e seus desdobramentos na agricultura brasileira são muito restritas. Neste trabalho, centraliza-se a discussão em torno de resultados de pesquisa obtidos de projetos na área de modelagem e de simulação, conduzidos na última década pela

Embrapa (Siqueira et al., 1994a,b; Siqueira et al., 1997). Esses estudos apresentam abrangência nacional e foram baseados em simulações conduzidas em 13 locais, ressaltando-se, conforme destacado pelos autores, o caráter genérico do tema abordado e dos resultados alcançados. Para esses trabalhos foram utilizadas séries históricas de clima diário, disponíveis para o período 1951 a 1980, e consideradas as especificidades regionais de solo e de manejo de cultivos. Para a análise de dados foi utilizado o sistema de suporte de decisão DSSAT, os modelos de simulação CERES e SOYGRO e os modelos de circulação atmosférica GFDL, UKMO e GISS (versões tradicional e “transient”), como parte de um projeto de cooperação internacional. Na Figura 1 estão representados os locais e seu posicionamento em relação às principais regiões climáticas. As distintas regiões produtoras dos cultivos incluídos nesses estudos (trigo, milho e soja) e os locais estudados, encontram-se representados na Figura 2. Observa-se uma maior concentração de locais de produção nas regiões Sul e Centro-Sul, pelo fato dessas regiões concentrarem cerca de 80% da produção nacional de milho e superarem em 95% a produção de trigo e em 60% a produção nacional de soja (IBGE, 1966).



**Figura 1** - Regiões climáticas (IBGE) e locais estudados



**Figura 2** - Representações das regiões de produção e distribuição dos locais

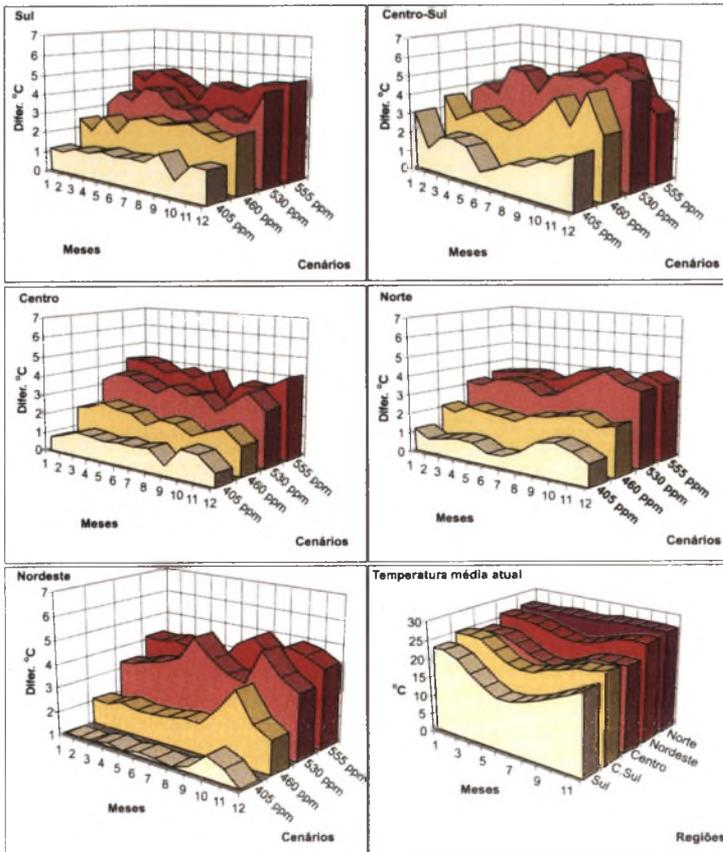
### *Temperatura*

As projeções dos aumentos de temperatura para o Brasil, obtidas a partir dos modelos de simulação GISS, GFDL e UKMO, situam-se em torno de 3°C e 5°C, com tendência de maiores efeitos para as regiões centrais, Sul e Centro-Sul (Tabela 1). As elevações de temperatura previstas pelo modelo GISS “transient” (Siqueira et al., 1997) apresentam uma tendência aproximadamente quadrática, implicando em maiores efeitos até cerca do ano 2050 e redução dos impactos entre 2050 e 2060 (Figura 3). São estimados aumentos de temperatura a curto prazo, com projeções de elevação de cerca de 1°C a partir do ano 2010. Projetando-se esses aumentos de temperatura sobre os padrões de distribuição das normais para todo o país (INPE, 1999), não se exclui a possibilidade de que as temperaturas médias de inverno (julho) das regiões subtropicais (temperadas) possam, no futuro próximo, corresponder às presenciadas hoje nas regiões tropicais (Figura 4).

**Tabela 1** - Diferenciais médios de temperatura do ar projetados pelos modelos de equilíbrio atmosférico GISS, GFDL e UKMO

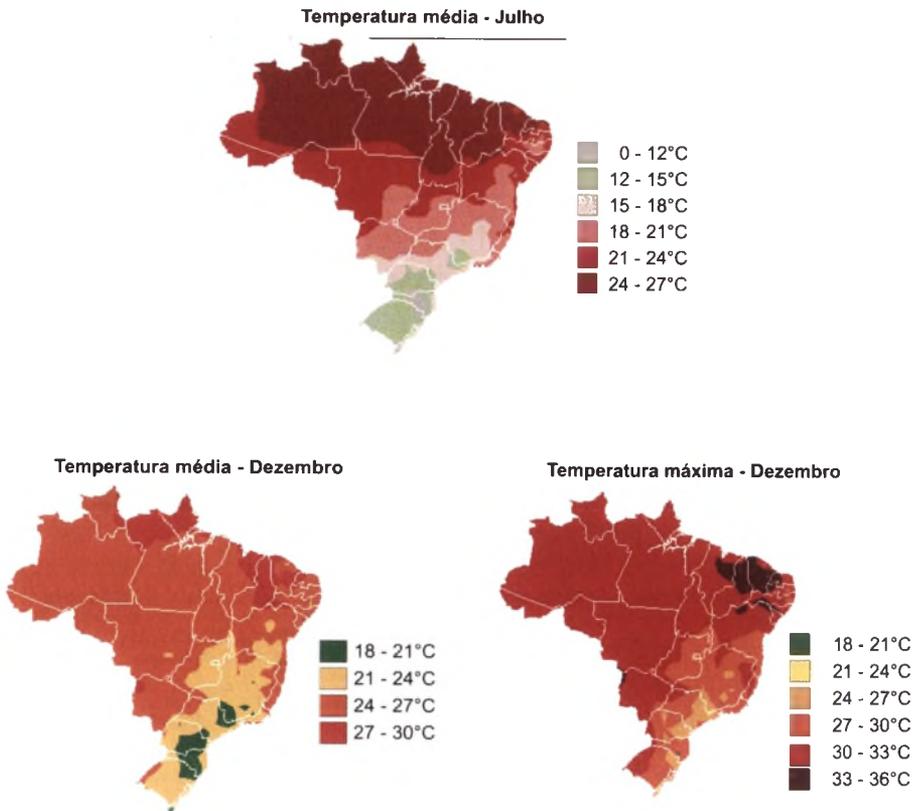
Regiões	Dez - Fev	Mar - Mai	Jun - Ago	Set - Nov	Média
Temperatura média superficial do ar (diferença, projeções GCMs/BASE, em Graus Celsius):					
Sul	+5,1	+4,2	+4,4	+4,5	+4,5
Centro-Sul	+3,9	+3,7	+4,4	+4,9	+4,6
Central	+4,7	+5,0	+4,7	+4,6	+4,8
Norte	+3,4	+3,4	+3,5	+3,7	+3,5
Nordeste	+3,4	+3,4	+4,1	+4,0	+3,7
Média	+4,1	+3,9	+4,2	+4,3	+4,2

Fonte: Siqueira et al. (1994b)



**Figura 3** - Mudanças graduais de temperatura projetadas pelo modelo de equilíbrio atmosférico GISS “transient” (Siqueira et al., 1997)

Tomando-se como referência as temperaturas médias de dezembro (Figura 4), infere-se sobre a possibilidade de temperaturas entre 27°C -30°C, hoje restritas ao extremo Norte e às regiões mais áridas do Nordeste, de expandirem-se para a maior parte do país, com o semi-árido atingindo temperaturas médias superiores a 30°C. Ao Sul, temperaturas médias superiores a 25°C são projetadas para a maior parte das regiões tropicais e temperadas. Com relação às temperaturas máximas, conforme ilustrado na Figura 4, para o mês de dezembro, os modelos antecipam temperaturas superiores a 35°C para a maioria das regiões equatoriais, subequatoriais e para o semi-árido, com possibilidade de ocorrência de máximas em torno de 40°C, especialmente nas regiões áridas do Nordeste.



**Figura 4** - Temperaturas médias de julho e dezembro e máximas de dezembro, normais para o período (INMET, 1999)

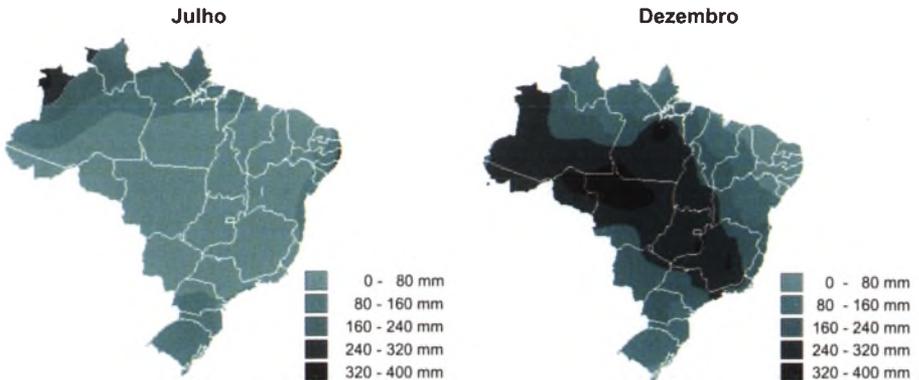
## Chuvas

As mudanças de precipitação projetadas pelos modelos são menos consistentes, sendo reflexo das restrições atuais quanto à simulação de alguns componentes importantes do balanço hídrico, incluindo a cobertura vegetal e a influência do componente solo, entre outros, conforme discutido anteriormente. Os modelos projetam aumentos médios de precipitação para o Brasil em torno de 11% (Tabela 2). Os impactos são mais expressivos nas latitudes maiores, com maiores aumentos no volume das chuvas para os meses de março a maio e setembro a novembro, períodos estes que atingem as lavouras de verão na fase de colheita e os cultivos de inverno em plena fase reprodutiva, respectivamente. Para a região Nordeste, excluindo-se os aumentos de 15% no volume de chuvas previstos para o trimestre de março a maio, para os demais meses do ano são projetadas reduções do volume de chuvas, especialmente nos meses de inverno (-21%), situando-se, o decréscimo anual, em torno de 2%. Comparando estas projeções com a distribuição dos valores médios de precipitação para todo o país e as ilustrações apresentadas na Figura 5, para os meses de julho e dezembro, é possível inferir sobre agravamentos de conflitos associados à disponibilidade de água para o Nordeste. Os aumentos no volume mensal de chuvas para a primavera podem representar maiores dificuldades quanto ao manejo dos cultivos, maior probabilidade de incidência de doenças nos cultivos de inverno (trigo) e maiores riscos de erosão hídrica do solo, considerando concentrarem-se nesta época, os preparos do solo para a instalação dos cultivos de verão.

**Tabela 2** - Precipitação mensal, projeções pelos modelos de equilíbrio atmosférico GISS, GFDL e UKMO, em relação a cenários históricos, por trimestre e valores médios

Regiões	Dez - Fev	Mar - Mai	Jun - Ago	Set - Nov	Média
Precipitação pluviométrica mensal média (relação, projeções GCMs/BASE, %):					
Sul	+7%	+17%	+4%	+25%	+14%
Centro-Sul	+27%	+40%	+3%	+19%	+22%
Central	+17%	+11%	+13%	+14%	+14%
Norte	+2%	0%	+10%	+10%	+5%
Nordeste	-4%	+15%	-21%	+3%	-2%
Média	+8%	+17	+2%	+14%	+11

Fonte: Siqueira et al. (1994ab)



**Figura 5** - Precipitação média mensal, para os meses de julho e dezembro (1931-1990)  
**Fonte:** INMET (1999)

Projeções complementares, individuais, dos modelos de simulação GISS, GFDL e UKMO sobre os padrões de distribuição mensal de chuvas e a tendência central dos dados, são apresentadas na Figura 6, possibilitando análises mais detalhadas dos padrões de distribuição de chuvas. Para as regiões Sul, Centro-Sul e Central, os modelos projetam aumentos consistentes no volume de precipitações para os quatro primeiros meses, com projeções de aumentos de 50% nos meses de março a abril nas regiões Sul e Centro-Sul e de 15%-20% nos meses de fevereiro a março, na região Central, declinando nos meses posteriores, tendendo a cenários de maior equilíbrio, ressaltando-se as dificuldades anteriormente mencionadas quanto a problemas de aumentos de precipitação nos meses de primavera na região Sul. As implicações são no sentido da maior disponibilidade hídrica e maior dificuldade na colheita dos cultivos de verão, entre outros aspectos. A confirmarem-se as projeções de declínio no volume de chuvas para o mês de dezembro, deverão agravarem-se os conflitos para o extremo Sul, em face dos atuais padrões de chuvas regionais. Ao Norte destaca-se a tendência de aumento nas precipitações nos meses de junho e julho e decréscimos para o mês de setembro. Para o Nordeste, há tendência de aumento no volume de precipitações em abril-maio (inferior a 25%) e decréscimos consistentes nos meses posteriores, com projeções de equilíbrio somente nos meses de novembro e dezembro.

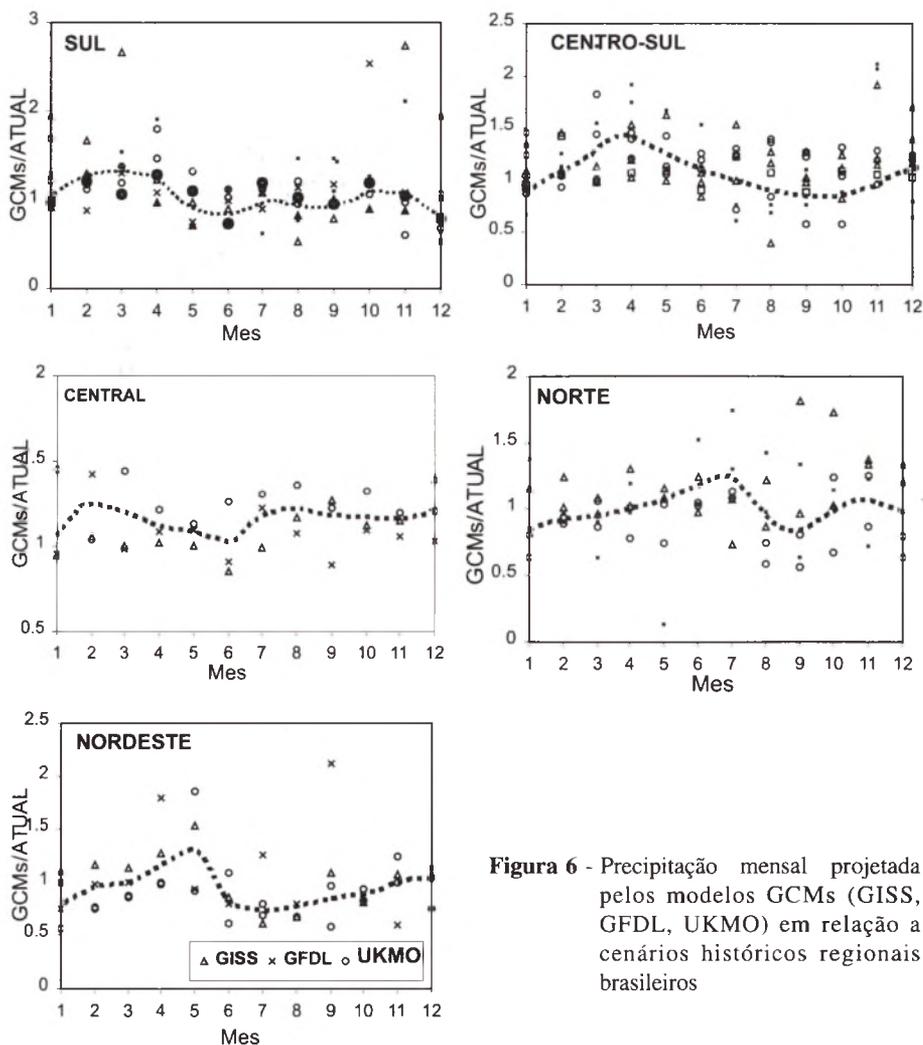


Figura 6 - Precipitação mensal projetada pelos modelos GCMs (GISS, GFDL, UKMO) em relação a cenários históricos regionais brasileiros

## Produção Agrícola

Estimativas de produção agrícola, baseadas em modelos de simulação que integrem os componentes solo-planta-clima, têm se mostrado eficientes instrumentos para a avaliação de estratégias tecnológicas e de impactos ambientais, conforme abordado anteriormente. Neste contexto, incluem-se

os resultados obtidos por Siqueira et al. (1994a,b), direcionados aos reflexos do efeito estufa sobre a agricultura brasileira, com projeções para os cultivos de trigo, milho e de soja (Tabelas 3 e 4). Os resultados referidos, apresentados a seguir, constituem-se em análises baseadas em diferenciais climáticos aplicados a cenários atuais, considerando padrões tecnológicos atualmente adotados e não incluem possíveis efeitos decorrentes de uma maior variabilidade climática.

**Tabela 3** - Projeções médias de três modelos GCMs (GISS, GFDL, UKMO), relativas a produção, comprimento de ciclo e demanda de irrigação, para os cultivos de trigo, milho e soja, nas diversas regiões produtoras brasileiras, em relação a cenários atuais (BASE)

CENÁRIOS		Sul	Centro	Central	Norte	Nordeste	Média
		Sul					
Trigo, grãos:	BASE, t/ha	2,30	2,36	2,93	NS	NS	2,53
	GCMs, %	-22%	-33%	-33%	NS	NS	-30%
Trigo, ciclo:	BASE, dias	124	103	100	NS	NS	109
	GCMs	-14%	-14%	-15%	NS	NS	-14%
Trigo, irrigação:	BASE, mm	-	186	281	NS	-	234
	GCMs	-	-13%	-17%	NS	-	-16%
Milho, grãos:	BASE, t/ha	7,78	6,66	NS	4,87	4,39	5,92
	GCMs	-17%	-33%	NS	-33%	-14%	-15%
Milho, ciclo:	BASE, dias	134	117	NS	106	104	115
	GCMs	-21%	-33%	NS	-14%	-11%	-15%
Soja, grãos:	BASE, t/ha	2,91	3,10	NS	3,26	2,17	2,86
	GCMs	+25%	+27%	NS	+5%	+34%	+21%
Soja, ciclo:	BASE, dias	143	123	NS	100	91	117
	GCMs	-6%	0	NS	-14%	0	0

NS: Não Simulado

**Tabela 4** - Produção nacional de grãos de trigo, milho e soja e projeções médias de três modelos GCMs (GISS, GFDL, UKMO), em 1.000 toneladas, em relação a cenários atuais, nas diversas regiões produtoras brasileiras

CENÁRIOS		Sul	Centro	Central	Norte	Nordeste	Média
		Sul					
<b>Trigo</b>	<b>Produção atual:</b>	1.573	2.028	24	0	0	3.625
	<b>Projeção:</b>	1.222	1.359	16	NS	NS	2.596
	<b>Impacto:</b>	-351	-669	-8	NS	NS	-1.029
<b>Milho</b>	<b>Produção atual:</b>	6.695	11.131	2.495	1.126	330	21.778
	<b>Projeção:</b>	5.602	9.684	NS	938	285	19.005
	<b>Impacto:</b>	-1.093	-1.447	NS	-188	-45	-2.773
<b>Soja</b>	<b>Produção atual:</b>	6.408	6.943	2.135	96	0	15.582
	<b>Projeção:</b>	8.010	8.841	NS	91	NS	19.077
	<b>Impacto:</b>	+1.602	+1.898	NS	-5	0	+3.495

NS: Não Simulado

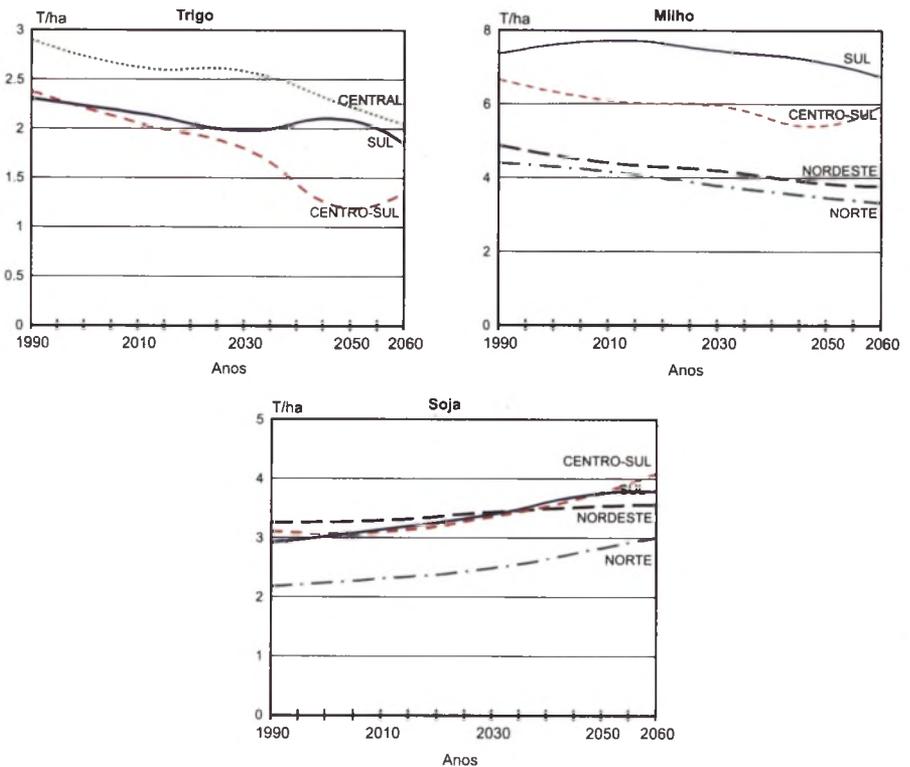
Fonte: Siqueira (1994a,b)

Para o cultivo do trigo, os modelos projetam uma redução na produtividade em torno de 30%, acompanhada de encurtamentos do ciclo de crescimento entre 14% e 15%, sendo os maiores efeitos previstos para a região Centro-Sul, lembrando incluir-se esta região em zona climática de transição entre clima tropical e temperado. Em contrapartida, as demandas de irrigação projetadas pelos modelos são 16% inferiores às atuais, representando maior eficiência no uso da água, podendo constituir-se em cenário favorável à produção agrícola de cereais de inverno para as regiões centrais do país. Considerando a distribuição atual das áreas de cultivo no país, projetam-se reduções na produção nacional de grãos de trigo em torno de 1,2 milhões de toneladas anuais, sendo a região Centro-Sul responsável por quebras na produção de cerca de 669 mil toneladas.

As projeções para o cultivo de milho, no país, também não são favoráveis, sendo estimadas reduções na produtividade entre 14% e 33% (16% em média), sendo maiores os efeitos para as regiões Centro-Sul e Norte, com correspondentes encurtamentos de ciclo entre 33% e 21%. Esses efeitos, quando agregados à distribuição das áreas de cultivo no país, resultam em projeções de queda na produção nacional em torno de 2,8 milhões de toneladas anuais, projetando-se para a região Centro-Sul reduções em torno de 1,4 milhões de toneladas.

As projeções do efeito estufa para a cultura da soja, no país, são favoráveis, em contraste com os resultados para o milho e o trigo, estando previsto aumento médio na produtividade nacional entre 5% a 34% (21% em média). Os efeitos no comprimento do ciclo são variáveis entre as regiões e inexpressivos nacionalmente. As estimativas de aumento na produção nacional de grãos de soja situam-se em torno de 3,5 milhões de toneladas anuais, com maiores impactos nas regiões Centro-Sul e Sul.

Através de modelos matemáticos, que simulam cenários com modificações graduais de concentrações de  $\text{CO}_2$ , torna-se possível avaliar os impactos, no decorrer dos anos, sobre a produção agrícola. Estudos neste sentido foram realizados por Siqueira et al. (1997), utilizando o modelo de equilíbrio atmosférico GISS "transient", fornecido pela NASA, como parte de um projeto de cooperação internacional. Resultados deste trabalho encontram-se representados na Figura 7.



**Figura 7** - Projeções de mudanças graduais na produção de grãos de trigo, milho e soja em decorrência de aumento da concentração de  $\text{CO}_2$  na atmosfera projetados pelos modelos de equilíbrio atmosférico GISS e GISS "transient"

As projeções de declínio da produção de trigo e de milho, ao longo do período (1990-2060), mostram-se mais expressivas na região Centro-Sul, especialmente após a década de 2030. As projeções de aumentos da produção de soja são aproximadamente lineares, sendo menos intensas para o Nordeste.

## **Impactos e Estratégias de Adaptação**

Os efeitos negativos na produção agrícola são devidos, principalmente, ao aumento de temperatura projetado pelos modelos de equilíbrio atmosférico para as diversas regiões produtoras brasileiras, sobrepondo qualquer efeito positivo do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Para o cultivo da soja, as projeções de aumentos na produção estão associados ao efeito benéfico, denominado, por muitos autores, como *efeito fertilizante* do CO<sub>2</sub>, contrabalançando os aumentos de temperatura.

Os modelos utilizados no presente trabalho, para simular o desenvolvimento dos cultivos (IBSNAT, 1990), nas versões atuais, ainda não incorporam os efeitos de pragas e doenças e os decorrentes da variabilidade climática, entre outros. Isto leva à pressuposição de que as projeções apresentadas sejam otimistas, visto a maior probabilidade de ocorrência de pragas e de doenças e o aumento do risco associado à variabilidade climática, conforme discutido anteriormente.

Na Tabela 5 são apresentados resultados de algumas simulações de cenários que foram selecionados por refletirem possibilidades de amenização dos impactos do efeito estufa. Entre as alternativas estudadas, ressaltam-se como importantes o desenvolvimento de novos genótipos tolerantes à temperaturas mais elevadas, destacando-se esta orientação para todas as regiões produtoras brasileiras, conforme ilustrado para a região Sul para os cultivos de trigo e milho. As práticas de manejo, representadas por irrigação e fertilização nitrogenada apresentam efeito adicional compensatório, mostrando-se promissoras como parte de aprimoramentos tecnológicos integrados. O manejo da irrigação e do nitrogênio para o cultivo do milho, bem como o manejo da irrigação para os cultivos de soja, mostram potencial para amenizar os efeitos negativos previstos para a região Nordeste.

**Tabela 5** - Cenários atuais de produção de trigo, milho e soja, projeções dos modelos de equilíbrio atmosférico (UKMO) para cerca de 2050 e indicações de estratégias de adaptação para a agricultura brasileira



Regiões	Sistemas	Cenários		
		Atual ☹️	2050... ☹️	2050... 😊
Sul	Trigo, grãos:	2,7 t/ha	60 %	100 % ( $G_t + M_{in}$ )
Sul	Trigo, ciclo:	124 dias	84 %	97 % ( $G_t$ )
Sul	Milho, grãos:	8,3 t/ha	≤80 %	104 % ( $G_t$ )
Nordeste	Milho, grãos:	4,6 t/ha	86 %	137 % ( $M_{in}$ )
Nordeste	Soja, grãos:	3,4 t/ha	78 %	124 % ( $M_t$ )

$G_t$ : Genótipos tolerantes a temperaturas mais elevadas

$M_{in}$ : Manejo (irrigação, nitrogênio)

Fonte: Siqueira et al (1994b)

Entre as ações de pesquisa e desenvolvimento, apresentadas por Siqueira et al. (1994b), cujo potencial deve ser explorado, com vistas aos cenários climáticos futuros decorrentes do efeito estufa, e reflexos potenciais para a agricultura brasileira, incluem-se:

- (1) genótipos tolerantes à temperaturas mais elevadas (nacional);
- (2) genótipos tolerantes à seca (regiões Sul e Nordeste);
- (3) potencialização do efeito benéfico do  $CO_2$  (nacional);
- (4) manejo de nitrogênio (nível nacional, com ênfase para o Nordeste);
- (5) manejo de solos/erosão hídrica (regiões Sul, Centro-Sul);
- (6) manejo de irrigação (regiões Central e Nordeste);
- (7) manejo de ecossistemas (nacional, com ênfase para o Norte);
- (8) manejo integrado de pragas e de doenças (nacional).

Ressaltam os autores sobre a necessidade de mais estudos, conduzidos nos países nacionais, voltados à melhor avaliação de impactos sócio-econômicos e análises de risco, no sentido de melhor direcionar ações prioritárias.

Como informação complementar, torna-se importante ressaltar a afinidade dos resultados disponíveis no país, relativo ao contexto do efeito estufa na agricultura, com os obtidos recentemente em outros países. Entre esses incluem-se alguns estudos conduzidos na Europa (European Commission, 1997), os quais reforçam a necessidade de serem intensificadas as pesquisas para a busca de novos genótipos e projetos voltados ao manejo dos agroecossistemas. Entre outras importantes referências, nesta área, inclui-se o trabalho coordenado por Downing (1992), com abrangência em quatro países (África e América do Sul), além dos trabalhos resultantes de projetos de cooperação internacional, coordenados pela Agência de Proteção do Meio Ambiente dos Estados Unidos (EPA, 1989, 1994) e os realizados através do Programa Internacional voltado à Geosfera e Biosfera (International Geosphere..., 1990).

## Referências Bibliográficas

- AGRIOS, G. N. *Plant pathology*. 4. ed. San Diego: Academic Press, 1997. 635 p.
- BARRON, E.J. *Climate models: how reliable are their predictions?* Disponível: World.voila.com (1995) URL: <http://www.gcric.org/CONSEQUENCES/fall95/mod.html>. Consultado em março 1999.
- BIETO, J.A.; TALON, M. *Fisiologia y bioquímica vegetal*. Madrid: Interamericana/McGraw-Hill, 1996. p. 537-553.
- BRIGHT, C. Tracking the ecology and climate change. In: STARKE, L. (ed.), *State of the world – a worldwatch institute report on progress toward a sustainable society*. London: Norton, W.W., 1997. p. 78-94.
- BRUEHL, G.W. *Soilborne plant pathogens*. New York: MacMillan Company, 1986. 368 p.
- CAMBELL, C.L.; MADDEN, L.V. *Introduction to plant disease epidemiology*. New York: J. Wiley & Sons, 1990. 532 p.
- CAMMEL, M.E.; KNIGHT, J.D. Effects of climate change on the population dynamics of crop pests. *Advances in Ecological Research*, New York, n. 22, p. 117-162, 1992.
- CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. *Ecofisiologia da produção agrícola*. Piracicaba: POTAFOS, 1987. 249 p.

CHAPMAN, R.F. *The insects: structure and function*. Sevenoakes: Hodder & Stoughton, 1988. 267 p.

CHRISTIANSEN, M.N. *The physiology of plant tolerance to temperature extremes*. Madison: American Society of Agronomy, 1978. p. 173-191.

CURRY, R.B.; PEART, R.M.; JONES, J.W.; BOOTE, K.J.; ALLEN, L.H.Jr. Simulation as a tool for analysing crop response to climate change. *American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, v. 33, n. 3, p. 981-990, 1990.

DOWNING, T.E. *Climate change and vulnerable places: global food security and country studies in Zimbabwe, Kenya, Senegal and Chile: a preliminary report*. Oxford: University of Oxford, 1992. 69p.

EPA. *The potential effects of global climate change on the United States*. In: SMITH, J.B.; TIRPACK, D. A. (ed.), Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 1989. v. 1-2. Appendix C.

EPA. Implications of climate change for international agriculture: crop modeling study. In: ROSENZWEIG, C.; IGLESIAS, A. (ed.), *Implications of climate change for international agriculture: crop modeling study*. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 1994. 437 p.

EUROPEAN COMMISSION *Climate change and agriculture in Europe: assessment of impacts and adaptations*. Luxemburg: Office for Official Publications of the European Communities, 1997. 37 p.

FAHY, P.C.; PERSLEY, G.J. *Plant bacterial diseases – A diagnostic guide*. New York: Academic Press, 1983. 393 p.

GUTIERREZ, A.P. *Analysing the effects of climate and weather on pests*. Cesena: Agrometeorology, 1987. p. 203-223.

HADDAD, M.L.; PARRA, J.P.; MORAES, R.C.B. *Métodos para estimar os limites térmicos inferior e superior de desenvolvimento de insetos*. Piracicaba: FEALQ-USP, 1998. 29p.

HILLEL, D.; ROSENZWEIG, C. *The greenhouse effect and its implications regarding global agriculture*. Amherst: Massachusetts Agricultural Experiment Station/University of Massachusetts, 1989. 36 p. (Research Bulletin, 724).

INTERNATIONAL GEOSPHERE - BIOSPHERE PROGRAMME. *The initial core projects*. Stockholm, 1990. 330 p.

IBGE. *Censo agropecuário 1995-1996*. Rio de Janeiro, 1996. 323 p. (Número 2, Rio Grande do Sul).

IBSNAT. *Progress report – 1, September 1987 – 30 June 1990*. Honolulu: University of Hawaii, 1990. 55 p.

INMET. Disponível: site INMET, Climatologia, Mapas URL: [www.inmet.gov.br](http://www.inmet.gov.br). Consultado em 10 abr. 1999.

MATTHEWS, R. E. E. *Plant virology*. New York: Academic Press, 1981. 897 p.

REYENGA, P.J.; WOWDEN, S.M.; MEINKE, H.; MCKEON, G.M. Modelling global change impacts on wheat cropping in south-east Austrália. *Environmental modelling & software*. Queensland: Elsevier, 1998. 10 p.

ROSENZWEIG, C.; HILLEL, D. Potential impacts of climate change on agriculture and food supply. *Consequences*, Miami, v. 1, n. 2, p. 22-32, 1995.

SALT, R.W. Principles of insect cold hardness. *Annual Review of Entomology*, Palo Alto, n. 6, p. 55-74, 1961.

SIQUEIRA, O. J. F. de; FARIAS, J.R.B. de; SANS, L.M.A. Potential effects of global climate change for brazilian agriculture: applied simulations studies for wheat, maize and soybeans. In: ROSENZWEIG, C., IGLESIAS, A. (org.), *Implications of climate change for international agriculture: crop modeling study*. Washington, DC: EPA, 1994a. p. 117-135.

SIQUEIRA, O.J.F. de; FARIAS, J.R.B. de; SANS, L.M.A. Potential effects of global climate change for brazilian agriculture and adaptive strategies for wheat, maize and soybean. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 2, p. 115-129, 1994b.

SIQUEIRA, O.J.W. de; STEINMETZ, S.; COSTA, A.A.; WOZNIAC, M.A. Mudanças climáticas projetadas através dos modelos GISS e avaliação de reflexos na produção agrícola brasileira, via modelos de simulação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10. *Anais...* Piracicaba: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1997. p. 167-169.

TAYLOR, F. Ecology and evolution of physiological time in insects. *American Naturalist*, Chicago, n. 117, p. 1-23, 1981.

TITUS, J.G. Strategies for adapting to the greenhouse effect. *Journal of the American Planning Association*, East Lansing, v. 66, p. 311-323, 1990.

WIGGLESWORTH, V.B. *The principles of insect physiology*. London: Champman & Hall, 1972. 368 p.



## Tecnologia, Mudanças Climáticas, Produtividade e Uso da Terra na Agricultura Brasileira<sup>1</sup>

ROBERT E. EVENSON

*Economic Growth Center, Yale University,  
New Haven, Connecticut, U.S.A.*

DENISARD ALVES

*Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, USP,  
São Paulo, SP, Brasil*

**Resumo.** *Este trabalho analisa os impactos de mudanças climáticas sobre a agricultura brasileira, ao mesmo tempo em que procura verificar até que ponto a pesquisa agropecuária pode contrabalancear eventuais efeitos negativos desses impactos. Para isso, usa-se um modelo ricardiano onde são estimados os efeitos das variáveis climáticas (temperatura, pluviosidade etc) sobre o preço da terra, usando observações ao nível dos municípios brasileiros. São incluídos com variáveis explicativas do modelo os gastos com a pesquisa pública e privada e a interação dos mesmos com as variáveis climáticas. A partir dessas estimativas são feitas simulações que visam analisar o impacto de eventuais modificações climáticas sobre a agricultura brasileira, assim para verificar se a pesquisa agrícola poderia vir a ser um factor que mitigaria os eventuais impactos negativos das mudanças climáticas.*

## Technology, Climate Change, Productivity and Land Use in Brazilian Agriculture

**Abstract.** *This study analyzes the impact of climate changes on Brazilian agriculture. It also seeks to shed light on agricultural research as a factor that could counterbalance the possible negative effects of such impacts. To this end, a Ricardian model was used to estimate the effects*

---

<sup>1</sup> Esse projeto foi financiado pelo projeto NEMESIS do PRONEX-CNPq, do Ministério de Ciência e Tecnologia do Brasil.

*of climate variables (temperature and rainfall) on land price, using municipal (local) data. Other variables included are expenses with official and private research and interaction of the latter with climate variables. On this basis, simulations were made to assess the impact of possible climate changes on Brazilian agriculture, as well as possible changes in agricultural-research funding patterns that would possible mitigate such an impact.*

## **Introdução**

O modelo “ricardiano” de impactos da mudança climática foi aplicado originalmente ao setor agrícola dos EUA (Mendelsohn et al., 1994). Esse modelo avalia as relações entre o clima e o valor da terra. Como o valor da terra é baseado em capitalizações de receitas futuras provenientes do uso atual e também do uso futuro da terra, as estimativas refletem o impacto do clima sobre as opções de seu uso futuro. Esse modelo foi aplicado ao Brasil (Sanghi et al., 1997).

O modelo, na aplicação americana, resulta em efeitos de temperatura e chuva menores do que os encontrados pelos modelos de simulação de produção agrícola. Isso ocorre porque os modelos de cultivo (consulte Siqueira et al., 1994 para ver uma aplicação brasileira) não prevêm efeitos adaptativos nem alterações na composição de culturas ou de variedades. As estimativas apresentadas neste estudo não incluem efeitos da fertilização de CO<sub>2</sub> (que Siqueira et al., 1994, dizem ser significativos). Tal como no estudo americano, nossos efeitos ricardianos sobre a produtividade são muito menores do que os calculados a partir de modelos de cultura.

Neste estudo desenvolvemos duas extensões do modelo ricardiano e relatamos aplicações para a agricultura brasileira. A primeira extensão consiste em incluir variáveis que medem serviços tecnológicos no modelo. O Brasil vem realizando diferentes níveis e tipos de serviços tecnológicos, provenientes de programas de pesquisa agrícola privados e públicos, em várias regiões e em várias décadas. Um estudo recente de produtividade agrícola (Avila & Evenson, 1995) fornece medidas desses serviços. Essas medidas são utilizadas no presente estudo.

A segunda extensão consiste em modificar o modelo para admitir impacto da mudança de clima em grandes categorias de uso da terra (culturas

anuais, culturas perenes, pastagens e áreas florestais) na agricultura brasileira. Relatamos neste estudo as estimativas das relações entre clima e seis categorias de uso da terra.

As estimativas dos vínculos entre clima – valor da terra, clima – uso da terra, tecnologia – valor da terra e tecnologia – uso da terra permitem-nos simular tanto os impactos da mudança de clima como os decorrentes dos serviços tecnológicos. Essas estimativas são baseadas em dados de estabelecimentos agrícolas extraídos dos Censos Agropecuários Brasileiros de 1975, 1980 e 1985, complementados por dados climáticos, institucionais e tecnológicos.

Na seção Metodologia revisamos os métodos relacionados às nossas especificações empíricas. Na seção Dados descrevemos os dados e as variáveis utilizadas. A seção Estimativas apresenta os cálculos sobre os efeitos de mudanças climáticas e de serviço tecnológico sobre o valor da terra (produtividade) de estabelecimentos agrícolas no Brasil. A seção Estimativas da Influência das Mudanças Climáticas e Tecnológicas sobre Valores de Terra e Produtividade da Terra apresenta estimativas comparáveis das alterações do clima e de serviços tecnológicos sobre o uso agrícola das terras. Na seção final discutimos as implicações políticas de nossas estimativas.

## Metodologia

Descrevemos opções de produção para cada uso da terra com uma função geral de transformação:

$$(1) \mathbf{G}_i = (\mathbf{Y}_i, \mathbf{X}_i, L_i, \mathbf{C}, \mathbf{G}, \mathbf{E}, \mathbf{T}, \mathbf{I}, \mathbf{W})$$

onde:

$\mathbf{Y}_i$  é um vetor de produtos gerados no uso de terra  $i$

$\mathbf{X}_i$  é um vetor de insumos variáveis utilizados no uso de terra  $i$

$L_i$  é área de terra sob uso da terra  $i$

$\mathbf{C}$  é um vetor de variáveis climáticas normais ou esperadas (temperatura, chuva etc.)

$\mathbf{G}$  é um vetor de variáveis geográficas (altitude etc.)

$\mathbf{E}$  é um vetor de variáveis edáficas

$\mathbf{T}$  é um vetor que descreve a tecnologia disponível

$\mathbf{I}$  é um vetor que descreve a infraestrutura de mercado

A função lucros maximizados associada a (1) para cada categoria de uso da terra é:

$$(2) \pi_i^* = \Sigma P_{yi} Y_i^* - \Sigma P_{xi} X_i^* = \pi_i (P_y, P_x, L_i, C, G, E, T, I, W)$$

e o sistema de equações de suprimento de produto a “curto prazo” e exigência de insumo é<sup>1</sup>:

$$(3) \begin{aligned} \partial \pi_i^* / \partial P_{yi} &= Y_i = Y_i (P_y, P_{xi}, L_i, C, G, E, T, I, W) \\ \partial \pi_i^* / \partial P_{xi} &= X_{ij} = X_{ij} (P_{yi}, P_{xi}, L_i, C, G, E, T, I, W) \end{aligned}$$

Observe que as expressões (2) e (3) estabelecem que os agricultores escolhem combinações de produção e insumo mais lucrativas em resposta ao clima (e outras variáveis).

Definimos as categorias de uso da terra como segue:

- APC: Área de culturas perenes
- AAC: Área de culturas anuais
- ANP: Área de pastagem natural
- APP: Área de pastagem cultivada
- ANP: Área de floresta natural
- APF: Área de floresta cultivada

Argumentamos que, dentro de cada uma dessas categorias de uso da terra, os agricultores podem substituir áreas plantadas com outras culturas ou outros tipos de pastagem e floresta a baixo custo. Converter a terra de uma categoria a outra, no entanto, exige investimento significativo<sup>2</sup>.

A área agrícola total em um município brasileiro é relativamente fixada e determinada por investimentos feitos em construção de estradas, desenvolvimento industrial e infraestrutura, assim como por fatores geológicos. Uma parte considerável das terras rurais no Brasil está incluída na categoria de uso florestal (ver abaixo). A área agrícola total inclui também terras em repouso e terras improdutivas. Esses usos são tratados como categoria residual em nosso trabalho empírico.

O sistema (3) descreve decisões de uso de fator e oferta de curto prazo para uma determinada categoria de uso da terra. A alocação da terra dentro da categoria (cultura anual, por exemplo) está inclusa nas funções de oferta.

<sup>1</sup> O uso da terra está implícito nos sistemas de oferta do produto e na demanda pelo fator de produção. Isto é, a escolha de oferta do produto e demanda por insumos pressupõe uma alocação de uso da terra. Consulte Merrick (1978) para ver um estudo pioneiro sobre uso da terra no Brasil.

<sup>2</sup> Estamos assim reconhecendo que dentro de cada categoria de uso da terra os agricultores alternam entre diferentes cultivos, de ano para ano.

Sustentamos que existe uma versão de longo prazo do sistema (3) em que a terra cultivada total em um município é fixa, mas o uso da terra pode mudar de uma categoria para outra. Os agricultores consideram as oportunidades de lucro a longo prazo e investem na mudança da categoria de uso da terra. Utilizando o argumento de que a área cultivada total em um município é relativamente fixa, propomos que as parcelas de uso da terra em cada município estão relacionadas às variáveis C,G,E,T e I.

$$(4) S_i = S_i(C, G, E, T, I)$$

onde  $S_i$  é a parcela do total de terras cultivadas na categoria de uso de terra  $i$ . Usamos também o argumento de que diferenciais relativos de preço entre regiões são efetivamente determinados pelas variáveis C,G,E,T e I, e portanto são endógenos em (4). Na próxima seção definimos as variáveis utilizadas para estimar (4). Observamos aqui que embora existam, em princípio, restrições de equações inter cruzadas associadas aos preços dos produtos e preços de bens de investimento, não os utilizamos em razão do argumento de endogeneidade do preço<sup>1</sup>.

A relação entre a produtividade da terra e o clima, a tecnologia e a infraestrutura baseia-se essencialmente nos mesmos argumentos. O lucro médio por hectare de terra será refletido em (2), a curto prazo, para cada uso da terra. Em um prazo maior, o uso da terra reagirá às mudanças na tecnologia, clima e infraestrutura. Compradores e vendedores potenciais de terra capitalizarão lucros futuros esperados a partir do uso da terra de maior valor, e, assim, esperamos que os valores de terra sejam relacionados, em seção cruzada, às variáveis C,G,E,T e I.

$$(5) \text{Valor/Hectare} = V_L(C, G, E, T, I)$$

Propomos, tal como Mendelsohn et al. (1994), que as diferenças de *cross-section* no uso da terra e no valor da terra podem ser utilizadas para estimar (4) e (5) e para identificar os efeitos do clima no uso e no valor da terra, possibilitando que computemos as seguintes expressões:

$$(6) \partial S_i / \partial C, \partial S_i / \partial T \text{ e } \partial^2 S_i / \partial C \partial T$$

e

$$(7) \partial V_L / \partial C, \partial V_L / \partial T \text{ e } \partial^2 V_L / \partial C \partial T$$

A expressão (6) mostra o impacto do clima e da tecnologia na distribuição do uso da terra. Mostra ainda o efeito interativo da tecnologia no impacto do clima.

<sup>1</sup> O sistema de equações de lucros (3) apresenta restrições de "simetria de preço".

A expressão (7) mostra os impactos do clima e da tecnologia sobre os valores da terra e, indiretamente, na sua produtividade.

As expressões (4) e (5) admitem a adaptação do agricultor a mudanças no clima e na tecnologia. Essa adaptação inclui investimentos em irrigação e drenagem no estabelecimento agrícola e em práticas de cultivo. Devem ser consideradas, entretanto, as potenciais adaptações por parte das organizações geradoras de tecnologia e infraestrutura para agricultores, criando interações tecnologia – clima. As organizações de tecnologia e infraestrutura incluem empresas particulares que conduzem pesquisa e desenvolvimento (P&D) para desenvolver insumos aperfeiçoados destinados ao setor agrícola, e organizações de extensão e pesquisa agrícola do setor público, que também desenvolvem tecnologia aperfeiçoada para a agricultura. Estas incluem unidades do setor público que fornecem e mantêm infraestrutura.

Sabemos que os pesquisadores levam as condições climáticas em consideração em sua programação de pesquisa. Melhoristas de plantas buscam continuamente atributos genéticos para alterar o período das estações de crescimento e dotar as plantas de “tolerância da planta hospedeira” em relação a frio ou calor, estresses de seca ou encharcamento, e efeitos climáticos associados. Sua motivação para tentar incorporar esses atributos em cultivares de plantas consiste em permitir que certo material genético superior (p.ex., variedades semi-anãs de trigo e arroz) supere as barreiras climáticas e edáficas que impedem sua “migração” para novas áreas. A abordagem via cross-section provavelmente constitui uma boa *proxy* para uma análise com base em séries temporais, i.e., responde a aumentos de temperatura<sup>1</sup>.

Isso sugere, implicitamente, que podem existir importantes interações “esperadas” de  $C \times T$  e  $C \times I$ , em (4) e (5). É possível argumentar que, como o clima pouco mudou nos últimos 25 anos aproximadamente, os produtores de tecnologias (tanto públicos como privados) e os investidores em infraestrutura não responderam às mudanças de clima. Entretanto, a premissa básica das estimativas obtidas a partir dos dados cross-section no modelo ricardiano, em que  $C$  varia conforme a localização, é a de que eles na verdade medem as respostas dos agricultores a  $C$ . De forma semelhante, pode-se sustentar que  $T$  e  $I$  refletem respostas a  $C$  e que as interações  $C \times T$  e  $C \times I$  em (4) e (5) fornecem estimativas de efeitos líquidos futuros do clima sobre o uso e a produtividade da terra.

Suponhamos, por exemplo, que temos duas regiões (1 e 2) que diferem em temperatura ( $t_1, t_2$ ) e em fatores edáficos ( $E_1, E_2$ ). Suponhamos que também

<sup>1</sup> Essas composições não são necessariamente as mesmas que aquelas que seriam geradas por um reconhecimento explícito de que as temperaturas estão se elevando e as estações de crescimento mudando, mas as técnicas de pesquisa para desenvolver cultivares tolerantes ao calor etc. seriam semelhantes às empregadas por motivos de migração de culturas.

uma elevação na temperatura prejudica as colheitas em ambas as regiões, se as culturas não forem deslocadas de uma região para a outra. Se  $t_1$  aumentar até o nível anterior de  $t_2$ , a região 1 pode evitar esse dano se as culturas apropriadas à região 2 forem instaladas na região 1. Esse deslocamento será afetado por barreiras edáficas. Os melhoristas de plantas dedicam-se ao desenvolvimento da tolerância da planta hospedeira a estresses edáficos para facilitar essa adaptação<sup>1</sup>.

## Dados

A Tabela 1 fornece uma visão geral dos dados nos quais se baseia o estudo (ver o Apêndice para obter mais detalhes).

Foram utilizados na análise dados de cross-section de três censos (1975, 1980 e 1985). As variáveis dependentes (endógenas) compreendem as parcelas de uso da terra e as estimativas de valor de terra em cada município, segundo os agricultores.

Estimamos um sistema único e específico para as parcelas de uso da terra e valores da terra, com base em (4) e (5). Dessa maneira, temos seis equações de uso da terra e uma equação de valor da terra. Utilizamos os procedimentos OLS (Ordinary Least Square), já que temos um conjunto comum de variáveis exógenas para as equações de uso da terra. As estimativas de regressão são ponderadas pelo total de terras dos estabelecimentos agrícolas.

As variáveis exógenas compreendem variáveis climáticas, geográficas, edáficas, de tecnologia e de infraestrutura. As variáveis climáticas, geográficas e edáficas são as mesmas utilizadas na análise Ricardiana original (Sanghi et al., 1997). O clima foi medido pelos níveis normais (média de 30 anos) de chuva e temperatura. Essas medidas foram disponibilizadas pelas estações climáticas e previstas para cada município (ver Sanghi et al., 1997). Foram incluídas as não-linearidades originadas dos valores quadrados de cada variável de interação de chuva e temperatura e chuva-temperatura.

As variáveis edáficas foram obtidas de várias fontes. Essas variáveis representam as propriedades físicas de solos, propriedades aquíferas e de topografia. Um dos maiores desafios em estudos desse tipo é distinguir os efeitos do clima sobre valores de terra decorrentes de efeitos edáficos. É importante também que essas variáveis edáficas não sejam variáveis de clima (ou que sejam mascaradas pelo clima)<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Ver Ávila & Evenson (1995).

<sup>2</sup> Variáveis de solo que refletem o clima podem ser altamente correlacionadas com variáveis climáticas e gerar estimativas tendenciosas dos seus efeitos.

As variáveis tecnológicas compreendem uma variável de “estoque” de pesquisa do setor público e uma variável de estoque de pesquisa do setor privado.

A Tabela 1 fornece uma visão geral dos dados nos quais se baseia o estudo (ver o Apêndice para obter mais detalhes).

**Tabela 1** - Descrição e significados de variáveis: 1985

	Descrição	Participação
<b>I. Variáveis Endógenas</b>		
AAC/LIF	Área de cultivos anuais	0,07
ARC/LIF	Área de cultivos perenes	0,22
ANP/LIF	Área de pastagem natural	0,30
APP/LIF	Área de pastagem plantada	0,19
ANF/LIF	Área de florestas naturais	0,17
APF/LIF	Área de florestas plantadas	0,02
LIF = APC + AAC + ANP + APP + ANF + APF áreas em descanso + áreas improdutivas VLNA = VLAND/LIF		
<b>II. Variáveis Exógenas</b>		
(A) Clima (C)		
RN DEC	Norma de precipitação em dezembro	172,9
RN JUN	Norma de precipitação em junho	73,6
RN MAR	Norma de precipitação em março	173,1
RN SEP	Norma de precipitação em setembro	64,5
TN DEC	Norma de temperatura em dezembro	24,4
TN JUN	Norma de temperatura em junho	20,0
TN MAR	Norma de temperatura em março	24,3
TN SEP	Norma de temperatura em setembro	22,2
Nota: Valores quadrados e interações de precipitação e temperatura estão incluídas na estimativa		
(B) Variáveis Geográficas (G)		
ERS1* - ERS5*	Variáveis simuladas para dois índices simulados de predisposição à erosão nos municípios	
ALTM	Altitude, em metros	428,9
LATMN	Latitude, em graus	-16,2
DSEAM	Distância do mar	230,9

Tabela 1 continuação

	Descrição	Participação
(C) Variáveis Edáficas (E)		
SCCB* - STBR*	Variáveis simuladas para dois tipos de solos nos municípios	
DCATION	Simulado quanto à restrição do solo a cation	0,93
DORG	Simulado quanto à restrição de matéria orgânica	0,45
DSAL	Simulado quanto à restrição por salinidade	0,30
DTEXT	Simulado quanto à restrição de textura do solo	0,78
(D) Variáveis de Tecnologia (T)		
S_R	Disponibilidade de pesquisa do setor público	
S_R_SC	Disponibilidade de pesquisa pública vezes o tamanho do Estado	
PRIVT	Disponibilidade de pesquisa do setor privado relevante para a agricultura)	352,6
(E) Variáveis de Infraestrutura (I)		
POP_ARE*	1980 População / km quadrado	128,20
POPSQ*	POP_ARE ao quadrado	-
URB_TOT*	População urbana (1980) / população total (1980)	0,37
POPDEN85	População rural (1980) / Área de terra agrícola total (1980)	0,37
ROADS70*	km de estradas (1970) / Área de terra agrícola total (1970)	0,02
(F) Interações		
C x G	ERS1TEMP -+ ERS5TEMP, ERS1RAIN - ERS5RAIN	
C x E	TEMPSCrB - TEMPSTBR, RAINSCrB --- RAINSTBR	
C x T	ST_RDEC2 -- ST_RSEO2, ST_TDEEC2 --- ST_TDEC2 (Pesquisa Pública) PRTRDEC2 - PRTRSEP2, PRTTDEC2 - PRTTDEC2 (Pesquisa privada)	

Tabela 1 continuação

	Descrição	Participação
T x G	STATERS1 – STATERS5, PRTERS1 -- PRTERS5	
T x E	STATSCCB – STATSTBR, PRTSCCB – PRTSTBR	

Nota: C x G, C x E com média de 4 meses de precipitação e temperatura  
C x T com valores quadrados de precipitação e temperatura mensais

O Brasil tem um amplo sistema de centros de pesquisa agrícola do setor público. Tem também P&D industrial que produz tecnologia a ser utilizada no setor agrícola. Ávila & Evenson (1995) e Cruz et al. (1997) conduziram estudos de produtividade dos sistemas de pesquisa do setor público e do setor privado. O setor público consiste de centros de pesquisa e estações experimentais estaduais e de um sistema federal coordenado pela Embrapa. Nesses estudos anteriores, foram construídas variáveis de “estoque” de pesquisa, para refletir as dimensões regionais e temporais dessa pesquisa. Os estoques de P&D do setor privado foram construídos a partir de dados de invenção (consultar Cruz et al., 1997, e o Apêndice para obter mais detalhes.) Essas variáveis tecnológicas são adequadas não apenas para as análises de produtividade conduzidas por Cruz et al. (1997), mas também para o presente estudo<sup>1</sup>.

A infraestrutura é estabelecida por densidade populacional, urbanização e densidade viária<sup>2</sup>. A Tabela 1 também descreve as variáveis de interação utilizadas no estudo. Deve-se observar que definimos as interações C x G, C x E e C x T, assim como as interações T x G e T x E. Isso é feito para que se incluam os efeitos do “deslocamento” de culturas. À medida que ocorre a mudança de clima, essas interações limitam o movimento de culturas de uma região para outra.

<sup>1</sup> As variáveis reais são variáveis de “estoque de capital” construídas para refletir as contribuições de produtividade em cada região.

<sup>2</sup> Essas variáveis foram desenvolvidas para os estudos de produtividade de Cruz et al. (1997).

## Estimativas

Evenson & Alves (1997) apresentam coeficientes estimados e erros padrão corrigidos para heterocedasticidade, para as equações de uso da terra (observar que as terras em descanso e improdutivas constituem a parcela residual) e as equações de valor da terra.

Todas as equações têm bons ajustes estatísticos, conforme indicado pelos testes F. Todos os grupos de variáveis climáticas, geográficas e edáficas são, em conjunto, significativos em todas as equações. Todos os grupos de termos de interação são também significativos em todas as equações. Devido à grande quantidade de variáveis de interação, é difícil fazer interpretações sobre qualquer coeficiente isolado. Nas seções seguintes apresentamos efeitos “parciais” de variáveis-chaves avaliados para cada ponto de dados e resumidos em tabelas para o Brasil como um todo e para os estados brasileiros.

Esses efeitos são computados conforme apresentado a seguir. As derivadas parciais (equação 6) a partir das estimativas são avaliadas para cada município utilizando valores em nível municipal para todos os termos da interação. Esses efeitos parciais podem ser interpretados como simulações. O efeito parcial da elevação de um grau de temperatura é a mudança na variável dependente que ocorreria se todas as variáveis de temperatura nas equações estimadas fossem aumentadas de um grau Celsius.

Para os efeitos de clima calculamos os efeitos da mudança nas precipitações pluviométricas e na temperatura. Para as precipitações computamos os efeitos do aumento de cada uma das 4 variáveis mensais de chuva em 3 por cento (i.e., 3% da precipitação mensal normal no município). Para efeitos de temperatura computamos os efeitos do aumento de um grau Celsius sobre a temperatura normal de cada mês em todos os municípios.

Para os efeitos de pesquisa e desenvolvimento, computamos os impactos da duplicação dos investimentos em P&D tanto no setor privado como no público. Dado o nível relativamente baixo dos investimentos em P&D no Brasil, esse cálculo presume que o Brasil expandiria seus investimentos até, aproximadamente, o nível encontrado na América do Norte.

## **Estimativas da Influência das Mudanças Climáticas e Tecnológicas sobre Valores de Terra e Produtividade da Terra**

Dedicamo-nos primeiro aos efeitos estimados da mudança climática e tecnológica sobre os valores da terra. Eles estão resumidos nas Tabelas 2 e 3, e são aproximadamente comparáveis às estimativas de mudança do clima apresentadas por Sanghi et al. (1997).

Conforme observado na Tabela 2, os efeitos estimados da chuva e da temperatura sobre os valores da terra são significativos para todas as médias do Brasil. Estimamos que um aumento de 3% nas chuvas teria um impacto positivo de 4,59% no valor da terra. Estimamos ainda que um aumento de um grau Celsius sobre a temperatura normal teria um efeito negativo de 5,36% no valor da terra. O efeito combinado chuva-temperatura é de 1,23% negativo (deve-se observar que, como os insumos variáveis representam aproximadamente metade dos custos de produção dos bens agrícolas no Brasil, o efeito esperado da mudança de clima sobre a produtividade da terra é aproximadamente metade do efeito estimado sobre os valores da terra.)

Antes de passarmos para a avaliação das dimensões espaciais ou regionais dos efeitos da mudança climática, discutiremos os efeitos da alteração de tecnologia sobre os valores da terra. Esses efeitos são positivos tanto para a P&D pública como privada. É difícil relacioná-los à alterações absolutas na produtividade porque as estimativas de coeficiente são baseadas em diferenças relativas dos valores da terra (como ocorre na alteração de clima). Como os preços de equilíbrio são afetados por alterações tecnológicas (e climáticas), essas estimativas atenuam os efeitos reais da mudança tecnológica sobre a produtividade total dos fatores (PTF) (verificar em Cruz et al. (1997) as estimativas de impacto de P&D sobre a PTF). Como as mudanças climáticas e tecnológicas têm efeito semelhante sobre o preço, podemos comparar o aumento de 2,98% nos valores de terra para a mudança tecnológica com a diminuição de 1,23% para a mudança climática. Parece que os efeitos negativos da alteração climática podem ser e serão compensados pela futura mudança tecnológica na agricultura brasileira.

Notamos ainda, a partir da Tabela 2, que a mudança tecnológica é favorável em relação às mudanças de chuva e de temperatura, na medida em que esses efeitos se tornam mais positivos pela alteração tecnológica.

A Tabela 3 mostra os efeitos espaciais de um aumento de 3% nas chuvas e de um grau Celsius na temperatura.

**Tabela 2** - Efeitos parciais estimados das mudanças climática e tecnológica sobre o preço da terra no Brasil (expresso em porcentagem)

<b>Efeitos do clima</b>	<b>%</b>
Aumento de 3% na Precipitação	4,59
Aumento de 1°C na Temperatura	-5,36
Aumento combinado na Precipitação e Temperatura	-1,23
<b>Efeitos da tecnologia</b>	
Duplicação da Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) privados	1,40
Duplicação da Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) públicos	1,58
Duplicação combinada da Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) privados e públicos	3,98
<b>Efeitos secundários da tecnologia sobre os efeitos climáticos</b>	
Aumento de 3% na Precipitação	0,01
Aumento de 1°C na Temperatura	0,001
Aumento combinado na Precipitação e Temperatura	0,011

Os efeitos da chuva, embora positivos para todo o Brasil, são na verdade negativos para muitos municípios. O efeito líquido positivo para o país resulta dos impactos positivos relativamente altos para alguns municípios, e impactos negativos relativamente baixos em muitos municípios. Os estados nos quais os efeitos da chuva são mais positivos são os das regiões Sul e Nordeste.

Os impactos da temperatura também têm efeitos espaciais relevantes. O aumento da temperatura terá efeito negativo no Norte, no Nordeste e boa parte do Centro-Oeste. Quanto à Minas Gerais e região Sul, os efeitos da elevação de temperatura são positivos.

Os impactos de pesquisa são positivos em quase todos os estados. Os efeitos da pesquisa privada são mais significativos no Norte e no Centro-Oeste. O mesmo se dá com a pesquisa pública.

Essas estimativas não consideram os efeitos “fertilizantes” de níveis mais elevados de CO<sub>2</sub>. Considera-se, geralmente, que sejam positivos. As estimativas indicam que é provável um impacto regional significativo sobre a produtividade da terra, como resultado das mudanças no clima. Os estados das regiões Sul e Sudeste ganharão com isso; outros estados perderão.

**Tabela 3** - Efeito parcial do clima e da pesquisa sobre o valor da terra

Estado	Clima		Pesquisa	
	Precipitação	Temperatura	Privada	Pública
11 Acre	0,03717	-0,12487	0,01757	0,00969
12 Rondônia	-0,03054	-0,11462	0,01239	0,00991
13 Amazônia	0,07182	-0,08180	0,01268	0,03259
14 Roraima	-0,04688	-0,19564	0,01694	0,03032
15 Pará	0,00934	0,02341	0,02527	0,01832
16 Amapá	0,05431	-0,13871	0,02542	0,00826
17 Tocantins	0,02011	-0,18689	0,01836	0,00951
21 Maranhão	0,02633	-0,16141	0,02752	0,01081
22 Piauí	-0,01996	-0,22164	0,02416	0,01293
23 Ceará	0,00667	-0,22108	0,02138	0,01797
24 Rio Grande do Norte	-0,00616	-0,15364	0,01612	0,01663
25 Paraíba	0,01644	-0,23543	0,01603	0,01851
26 Pernambuco	0,02342	-0,21521	0,01241	0,01949
27 Alagoas	0,01973	-0,12013	0,00632	0,02794
28 Sergipe	0,00565	-0,19742	0,00721	0,02433
29 Bahia	0,01630	-0,15765	0,01250	0,01459
31 Minas Gerais	0,01577	0,08209	0,01221	0,00966
32 Espírito Santo	0,04045	0,13694	0,01021	0,01605
33 Rio de Janeiro	0,02820	0,04010	0,00541	0,01770
34 São Paulo	0,01979	-0,06273	0,00774	0,01287
41 Paraná	0,00791	0,00109	0,00485	0,00999
42 Santa Catarina	0,03605	0,06448	0,00598	-0,00044
43 Rio Grande do Sul	0,01106	0,21140	0,00186	0,00542
50 Mato Grosso do Sul	-0,01380	-0,09654	0,00599	0,02336
51 Mato Grosso	-0,00453	-0,14810	0,01050	0,02688
52 Distrito Federal		-0,03271	0,02045	0,01429
53 Goiás	0,01585	-0,06266	0,01764	0,01141
<b>Brasil</b>	0,01387	-0,08775	0,01389	0,01589

## Estimativas do Efeito da Alteração Climática e Tecnológica sobre o Uso da Terra

As estimativas médias nacionais dos efeitos da mudança de clima sobre a distribuição de uso da terra estão apresentadas na Tabela 4. Observe que estimamos 6 equações de distribuição de uso da terra. A categoria residual de uso, responsável por 3% das terras de estabelecimentos agrícolas, é representada por terras aradas em descanso e terras consideradas improdutivas. A primeira linha da Tabela 4 apresenta as participações, em porcentagem, das seis classes de uso da terra. As linhas seguintes apresentam os efeitos parciais de mudança climática ou tecnológica sobre as parcelas de uso da terra (como essas alterações totalizam zero, os efeitos sobre a categoria residual podem ser inferidos a partir dos efeitos estimados).

Começamos por observar que o termo “terras de cultivo” no Brasil tem um alcance maior do que em muitos outros países: ele cobre plantações, terras de pastagem e florestas. Os 19% em florestas constituem parte significativa das terras florestadas do Brasil, e representam a porção de floresta que é ameaçada pela expansão das plantações e pastagens (as terras de floresta não cultivadas são ameaçadas pelo corte de madeira e pelo uso industrial e urbano).

Consideramos primeiro o efeito de um aumento de 3% nas chuvas sobre as categorias de uso da terra. Os efeitos médios para o Brasil são apresentados na Tabela 4 (linha 2). Calcula-se que um aumento das chuvas leve a um aumento das terras de culturas anuais e uma diminuição das terras de culturas perenes, mas a um aumento líquido nas parcelas de terras cultivadas (de 29% para 29,3%). Um aumento nas chuvas levaria ainda à uma diminuição das pastagens naturais, a um aumento das pastagens cultivadas e a um decréscimo líquido nas parcelas de pastagem (de 49% para 48,5%). Levaria também a um aumento das terras de uso florestal (de 19% para 19,1%). Esses efeitos podem ser considerados modestos em magnitude e não representam ameaça ao habitat florestal.

Não se pode dizer o mesmo dos efeitos calculados para o aumento de um grau Celsius na temperatura (Tabela 4, linha 3). Projeta-se que um aumento na temperatura leve a um aumento nas parcelas de terras cultivadas, tanto anuais como perenes. O maior efeito dá-se sobre as terras de pastagem, sendo projetado um aumento na parcela de pastagem natural de 30% para 33,5%.

Este é apenas parcialmente compensado pela diminuição projetada para a parcela de pastagens cultivadas. O aumento induzido pela temperatura nas terras cultivadas e de pastagem ocorre às expensas das terras de floresta. Tanto a parcela de florestas naturais como a de florestas cultivadas diminuem, tal que a parcela total de terras florestadas decresce de 19% para menos de 17%. Esse efeito estimado da elevação de temperatura suscita de fato preocupações quanto à perda, em termos de biodiversidade e habitat, associada à conversão de terras de floresta em pastagens e terras cultivadas.

**Tabela 4** - Efeitos parciais estimados da mudança climática e tecnológica sobre o uso da terra agrícola no Brasil

	Parcelas de uso da terra					
	Lavouras		Pastagens		Florestas	
	Anual	Perene	Natural	Plantada	Natural	Plantada
Porcentagem de tipos de uso da terra, em 1995	22	7	30	19	17	2
<b>Efeitos do clima</b>						
Aumento de 3% na precipitação	0,35	-0,09	-0,78	0,33	0,14	-0,04
Aumento de 1°C na temperatura	0,50	0,17	3,54	-1,07	-1,98	-0,14
Aumentos combinados na precipitação e temperatura	0,85	0,08	2,76	-0,73	-1,84	-0,18
<b>Efeitos da tecnologia</b>						
Duplicação de P&D privados	0,04	0,07	-0,006	-0,002	-0,10	-0,01
Duplicação de P&D públicos	0,22	0,08	-0,55	0,07	0,14	-0,01
Duplicação de P&D privados e públicos combinados	0,26	0,15	-0,56	0,07	0,04	-0,02
<b>Efeitos secundários da tecnologia sobre os efeitos climáticos</b>						
Aumento de 3% na precipitação	-0,0019	0,0062	-0,0088	0,0031	0,0018	-0,0024
Aumento de 1°C na temperatura	-0,001	-0,0153	0,0152	0,0338	-0,0037	0,0058
Aumento combinado na precipitação e temperatura	-0,0029	-0,0091	0,0064	0,0369	-0,0019	0,0034

Os efeitos combinados de chuva e de temperatura são dominados pelos efeitos da temperatura. Conforme a projeção, a pequena alteração climática correspondente a um aumento de 3% nas chuvas e/ou aumento de um grau Celsius na temperatura aumentaria as terras cultivadas de 29% para 30%, e as pastagens de 49% para 51%. O percentual de florestas declinaria de 19% para pouco mais de 17%.

Consideramos a seguir os efeitos da tecnologia sobre o uso da terra. Os efeitos de P&D de origem privada são menores que os de P&D de origem pública, mas ambos são positivos sobre as parcelas das terras cultivadas. Como boa parte das ações de P&D do setor público é dirigida ao melhoramento de culturas (especialmente culturas anuais), esses efeitos são esperados.

As ações de P&D do setor privado têm efeito mínimo na expansão das áreas de pastagens. As pesquisas do setor público levam à uma redução das pastagens naturais e a um aumento das pastagens cultivadas.

Os efeitos de P&D sobre terras de floresta são pequenos. A pesquisa do setor privado tem efeito negativo, e a do setor público tem efeito positivo. Nenhuma delas tem efeito sobre florestas plantadas.

O impacto geral da expansão dos investimentos em P&D agrícola é aumentar a participação das plantações, em grande parte às expensas da pastagem natural. Espera-se, portanto, que a melhoria da tecnologia agrícola amplifique os efeitos da mudança do clima sobre as terras cultivadas. A fração das terras cultivadas crescerá de 29% para 31,4%. Os efeitos de uma melhor tecnologia agrícola compensarão os efeitos climáticos sobre as terras de pastagem. A tecnologia melhora as pastagens cultivadas e compensa a conversão, induzida pelo clima, de florestas naturais em pastagens naturais. A tecnologia tem pequenos efeitos positivos sobre as terras ocupadas com floresta natural. Nem a mudança climática nem a tecnológica influenciam positivamente os reflorestamentos.

O terceiro conjunto de cálculos da Tabela 4 apresenta os efeitos secundários, ou de interação entre a alteração climática e a tecnológica. Esses efeitos podem ser interpretados como a modificação que haveria sobre os efeitos climáticos se ocorressem tanto mudanças de clima como de tecnologia. Eles são em geral pequenos, exceto pelos efeitos da temperatura sobre a parcela de terras de pastagem. O maior efeito dá-se sobre as pastagens cultivadas, sendo a tecnologia favorável a esta.

As dimensões espaciais das alterações de uso da terra induzidas pelo clima são mostradas nas Tabelas 5 a 10.

A Tabela 5 mostra os efeitos espaciais do clima e da pesquisa sobre as parcelas de culturas anuais. Notamos aqui que os efeitos das chuvas são positivos, exceto em alguns estados de elevado índice de precipitação pluviométrica, na região Norte. Os efeitos da temperatura são positivos, mas variam significativamente por estado, sendo mais favoráveis ao Estado do Rio Grande do Sul. Os efeitos da pesquisa são geralmente favoráveis às culturas anuais, em todas as regiões.

**Tabela 5** - Efeito parcial do clima e da pesquisa

Estado	Área de Cultivo Anual			
	Clima		Pesquisa	
	Precipitação	Temperatura	Privada	Pública
11 Acre	0,00017	-0,00015	0,00061	-0,00202
12 Rondônia	0,00111	-0,05374	0,00048	0,00204
13 Amazonas	-0,00027	0,03519	0,00051	0,00058
14 Roraima	-0,00010	-0,01356	0,00014	0,00533
15 Pará	0,00009	0,02558	-0,00155	0,00298
16 Amapá	-0,00130	0,05369	-0,00215	0,00387
17 Tocantins	0,00093	0,00968	0,00047	0,00129
21 Maranhão	0,00001	0,02780	-0,00159	0,00240
22 Piauí	-0,00010	0,00965	-0,00125	0,00241
23 Ceará	0,00076	0,01668	-0,00019	0,00339
24 Rio Grande do Norte	0,00109	-0,00119	0,00008	0,00349
25 Paraíba	0,00157	-0,00066	0,00080	0,00397
26 Pernambuco	0,00171	0,00609	0,00086	0,00409
27 Alagoas	0,00161	0,00094	0,00067	0,00503
28 Sergipe	0,00159	0,00104	0,00063	0,00457
29 Bahia	0,00100	0,01111	0,00034	0,00227
31 Minas Gerais	0,00124	-0,00844	0,00070	0,00057
32 Espírito Santo	0,00129	0,00895	0,00114	0,00094
33 Rio de Janeiro	0,00183	-0,00105	0,00172	0,00169
34 São Paulo	0,00072	-0,00609	0,00067	0,00133
41 Paraná	0,00171	0,00792	-0,00004	0,00121
42 Santa Catarina	0,00098	0,00968	-0,00069	0,00054
43 Rio Grande do Sul	0,00182	0,03849	-0,00022	0,00033
50 Mato Grosso do Sul	0,00204	-0,05615	0,00034	0,00486
51 Mato Grosso	0,00019	-0,00457	0,00129	0,00134
52 Distrito Federal		-0,01002	0,00143	0,00181
53 Goiás	0,00154	-0,00249	0,00123	0,00246
<b>Brasil</b>	<b>0,00089</b>	<b>0,00387</b>	<b>0,00024</b>	<b>0,00232</b>

A Tabela 6 apresenta estimativas para as parcelas de terras com culturas perenes. Notamos aqui que os efeitos da chuva são pequenos. Os efeitos da temperatura são grandes e variam significativamente por região, sendo muito negativos nas regiões Centro-Oeste e Sul. Os efeitos da pesquisa são pequenos e geralmente positivos.

**Tabela 6** - Efeito parcial do clima e da pesquisa

Estado	Área de Cultivo Permanente			
	Clima		Pesquisa	
	Precipitação	Temperatura	Privada	Pública
11 Acre	0,00019	0,43371	0,00043	0,00313
12 Rondônia	-0,00030	0,23769	0,00101	0,00368
13 Amazonas	0,00094	0,57145	0,00033	0,00369
14 Roraima	0,00122	0,49040	0,00010	0,00376
15 Pará	0,00016	0,53583	0,00090	0,00229
16 Amapá	0,00100	0,85861	0,00097	0,00413
17 Tocantins	-0,00086	0,65442	0,00062	0,00197
21 Maranhão	-0,00060	0,50751	0,00086	0,00041
22 Piauí	-0,00053	0,45789	0,00042	0,00019
23 Ceará	-0,00065	0,29835	-0,00005	-0,00017
24 Rio Grande do Norte	-0,00003	0,18429	-0,00015	-0,00001
25 Paraíba	-0,00035	0,03071	-0,00017	-0,00053
26 Pernambuco	-0,00015	-0,06429	0,00001	-0,00013
27 Alagoas	0,00061	-0,07145	-0,00001	0,00031
28 Sergipe	0,00018	-0,08716	0,00035	-0,00007
29 Bahia	-0,00040	0,00953	0,00058	0,00007
31 Minas Gerais	-0,00100	-0,25400	0,00077	0,00139
32 Espírito Santo	-0,00014	-0,25051	0,00041	0,00127
33 Rio de Janeiro	-0,00056	-0,34370	0,00052	0,00118
34 São Paulo	0,00054	-0,38663	0,00117	0,00028
41 Paraná	-0,00018	-0,71846	0,00082	-0,00008
42 Santa Catarina	0,00034	-0,90415	0,00070	0,00099
43 Rio Grande do Sul	-0,00029	-1,11273	0,00004	0,00028
51 Mato Grosso do Sul	-0,00052	-0,45618	0,00031	0,00058
52 Mato Grosso	-0,00054	0,16762	0,00028	0,00189
52 Distrito Federal		0,34966	0,00080	0,00295
53 Goiás	-0,00153	0,26650	0,00060	0,00247
<b>Brasil</b>	-0,00013	0,05203	0,00047	0,00133

A Tabela 7 apresenta os efeitos sobre pastagens naturais. Os impactos negativos da chuva são razoavelmente uniformes em todas as áreas, assim como os efeitos positivos da temperatura. Os efeitos negativos da pesquisa são bem uniformes espacialmente. Os efeitos positivos da chuva sobre pastagens plantadas (Tabela 8) estão geralmente relacionados aos efeitos negativos da chuva sobre pastagens naturais. Os efeitos da temperatura são negativos para pastagens cultivadas e positivos para pastagens naturais.

**Tabela 7** - Efeito parcial do clima e da pesquisa

Estado	Área de Pastagens Naturais			
	Clima		Pesquisa	
	Precipitação	Temperatura	Privada	Pública
11 Acre	-0,00204	0,01127	0,00011	-0,00710
12 Rondônia	0,00002	0,01757	-0,00208	-0,00597
13 Amazonas	-0,00025	0,03301	-0,00079	-0,00673
14 Roraima	-0,00200	0,07282	-0,00169	-0,00522
15 Pará	-0,00319	0,03302	-0,00295	-0,00232
16 Amapá	-0,00200	0,07560	-0,00113	-0,00735
17 Tocantins	-0,00295	0,04397	-0,00041	-0,00518
21 Maranhão	-0,00296	0,02775	-0,00148	-0,00166
22 Piauí	-0,00336	0,04901	-0,00014	-0,00313
23 Ceará	-0,00410	0,02677	-0,00019	-0,00214
24 Rio Grande do Norte	-0,00480	0,03719	0,00041	-0,00254
25 Paraíba	-0,00474	0,02974	0,00020	-0,00201
26 Pernambuco	-0,00431	0,03604	0,00031	-0,00245
27 Alagoas	-0,00469	0,05422	0,00023	-0,00268
28 Sergipe	-0,00457	0,04673	-0,00009	-0,00162
29 Bahia	-0,00246	0,05315	0,00030	-0,00306
31 Minas Gerais	-0,00186	0,03690	-0,00044	-0,00660
32 Espírito Santo	-0,00340	0,03131	-0,00094	-0,00343
33 Rio de Janeiro	-0,00310	0,02500	-0,00010	-0,00392
34 São Paulo	-0,00205	0,05043	-0,00033	-0,00426
41 Paraná	-0,00217	0,02183	0,00051	-0,00533
42 Santa Catarina	-0,00310	0,00525	0,00201	-0,00810
43 Rio Grande do Sul	-0,00235	-0,02586	0,00133	-0,00590
50 Mato Grosso do Sul	-0,00065	0,03422	-0,00023	-0,00511
51 Mato Grosso	-0,00044	0,03870	0,00034	-0,00607
52 Distrito Federal		0,07539	-0,00111	-0,00959
53 Goiás	0,00028	0,05119	-0,00106	-0,00764
<b>Brasil</b>	-0,00259	0,03675	-0,00035	-0,00471

Tabela 8 - Efeito parcial do clima e da pesquisa

Estado	Área de Pastagens Plantadas			
	Clima		Pesquisa	
	Precipitação	Temperatura	Privada	Pública
11 Acre	-0,00038	0,00464	0,00269	-0,00088
12 Rondônia	-0,00176	0,07403	0,00273	-0,00303
13 Amazonas	-0,00107	-0,02015	0,00357	-0,00237
14 Roraima	-0,00029	-0,03894	0,00290	-0,00415
15 Pará	0,00263	-0,02327	0,00596	-0,00697
16 Amapá	0,00181	-0,06947	0,00514	-0,00675
17 Tocantins	0,00329	0,00891	0,00099	-0,00220
21 Maranhão	0,00405	-0,02467	0,00395	-0,00569
22 Piauí	0,00453	-0,06345	0,00229	-0,00296
23 Ceará	0,00377	-0,05284	0,00171	-0,00265
24 Rio Grande do Norte	0,00267	-0,05520	0,00071	-0,00160
25 Paraíba	0,00296	-0,04046	0,00000	-0,00117
26 Pernambuco	0,00225	-0,03958	-0,00073	-0,00038
27 Alagoas	0,00096	-0,04082	-0,00078	0,00011
28 Sergipe	0,00039	-0,04168	-0,00112	0,00001
29 Bahia	0,00178	-0,04457	-0,00062	-0,00008
31 Minas Gerais	0,00283	0,01469	-0,00061	0,00272
32 Espírito Santo	0,00089	0,01859	-0,00046	0,00103
33 Rio de Janeiro	-0,00048	0,01159	-0,00181	0,00138
34 São Paulo	0,00009	0,01175	-0,00126	0,00214
41 Paraná	-0,00117	0,00475	-0,00067	0,00269
42 Santa Catarina	-0,00273	-0,00485	-0,00025	0,00219
43 Rio Grande do Sul	-0,00339	-0,00877	-0,00014	0,00278
50 Mato Grosso do Sul	-0,00076	0,03827	-0,00016	0,00088
51 Mato Grosso	0,00135	0,00326	-0,00003	-0,00046
52 Distrito Federal		0,03339	0,00092	-0,00045
53 Goiás	0,00296	0,03347	0,00017	0,00050
<b>Brasil</b>	0,00104	-0,01153	0,00093	-0,00094

As Tabelas 9 e 10 mostram os efeitos sobre florestas naturais e plantadas. A Tabela 9 mostra que o efeito da temperatura no desflorestamento nas áreas de cultivo é mais forte no Norte, no Sudeste e no Sul.

**Tabela 9** - Efeito parcial do clima e da pesquisa

Estado	Área de Florestas Naturais			
	Clima		Pesquisa	
	Precipitação	Temperatura	Privada	Pública
11 Acre	0,00074	-0,03892	-0,00579	0,00738
12 Rondônia	-0,00035	-0,03136	-0,00363	0,00506
13 Amazonas	0,00019	-0,06147	-0,00583	0,00696
14 Roraima	0,00065	-0,03512	-0,00248	0,00189
15 Pará	0,00008	-0,03646	-0,00362	0,00588
16 Amapá	0,00059	-0,05283	-0,00350	0,00494
17 Tocantins	-0,00108	-0,04604	-0,00296	0,00350
21 Maranhão	-0,00101	-0,03566	-0,00294	0,00426
22 Piauí	-0,00061	0,01143	-0,00214	0,00213
23 Ceará	-0,00040	0,00931	-0,00188	0,00146
24 Rio Grande do Norte	0,00048	0,01977	-0,00125	0,00090
25 Paraíba	-0,00033	0,02101	-0,00090	0,00057
26 Pernambuco	-0,00007	0,00607	-0,00028	-0,00026
27 Alagoas	0,00111	-0,00821	0,00012	-0,00120
28 Sergipe	0,00188	-0,00040	-0,00015	-0,00105
29 Bahia	-0,00001	-0,00702	-0,00058	0,00024
31 Minas Gerais	-0,00101	-0,02572	-0,00026	0,00083
32 Espírito Santo	0,00141	-0,03074	-0,00009	0,00028
33 Rio de Janeiro	0,00255	-0,01620	-0,00053	0,00058
34 São Paulo	0,00108	-0,04139	-0,00009	0,00037
41 Paraná	0,00144	-0,02725	-0,00023	0,00104
42 Santa Catarina	0,00396	-0,02120	-0,00130	0,00330
43 Rio Grande do Sul	0,00391	-0,00204	-0,00022	0,00168
51 Mato Grosso do Sul	-0,00103	0,00090	-0,00018	-0,00050
52 Mato Grosso	-0,00029	-0,03535	-0,00243	0,00269
53 Distrito Federal		-0,09297	-0,00241	0,00326
54 Goiás	-0,00424	-0,06315	-0,00160	0,00128
<b>Brasil</b>	0,00037	-0,02374	-0,00175	0,00213

**Tabela 10** - Efeito parcial do clima e da pesquisa

Estado	Área de Florestas Plantadas			
	Clima		Pesquisa	
	Precipitação	Temperatura	Privada	Pública
11 Acre	0,00038	0,01847	0,00063	-0,00153
12 Rondônia	-0,00007	0,02409	0,00051	-0,00263
13 Amazonas	-0,00029	0,00079	0,00061	-0,00160
14 Roraima	0,00025	0,01410	0,00012	-0,00141
15 Pará	-0,00021	0,00682	-0,00020	-0,00051
16 Amapá	-0,00042	-0,01508	-0,00068	0,00091
17 Tocantins	0,00010	0,00259	0,00004	-0,00088
21 Maranhão	0,00009	0,00639	-0,00006	-0,00130
22 Piauí	0,00000	0,00209	-0,00019	-0,00089
23 Ceará	0,00007	0,00514	-0,00011	-0,00081
24 Rio Grande do Norte	0,00008	0,00516	-0,00009	-0,00050
25 Paraíba	-0,00011	-0,00044	-0,00003	-0,00055
26 Pernambuco	-0,00021	-0,00295	-0,00009	-0,00024
27 Alagoas	-0,00022	-0,00747	-0,00002	-0,00051
28 Sergipe	-0,00006	-0,00594	0,00021	-0,00101
29 Bahia	-0,00008	-0,00634	-0,00022	0,00011
31 Minas Gerais	-0,00026	0,00102	-0,00033	0,00055
32 Espírito Santo	-0,00058	-0,01379	0,00000	-0,00006
33 Rio de Janeiro	-0,00042	-0,00353	0,00004	-0,00044
34 São Paulo	-0,00133	-0,00313	-0,00016	0,00032
41 Paraná	-0,00062	-0,00367	0,00013	0,00026
42 Santa Catarina	-0,00034	-0,00553	0,00034	0,00004
43 Rio Grande do Sul	-0,00023	-0,00373	0,00026	0,00014
50 Mato Grosso do Sul	0,00013	0,00787	0,00010	-0,00149
51 Mato Grosso	0,00004	0,01375	0,00002	-0,00160
52 Distrito Federal		0,02109	-0,00039	0,00020
53 Goiás	0,00030	0,00695	-0,00015	-0,00061
<b>Brasil</b>	-0,00015	0,00240	0,00001	-0,00059

Com a metodologia usada neste estudo não é possível identificar alterações de uso da terra que permita inferir que o aumento de um reduz o outro. Entretanto, podem-se obter algumas indicações a partir das correlações espaciais. A mais forte delas é talvez a correlação entre o aumento das pastagens naturais e a diminuição das florestas naturais.

## **Implicações para a Política**

Dois conjuntos de implicações políticas emergem das estimativas de mudança climática e tecnológica para a agricultura brasileira. O primeiro conjunto é indireto, relativo à urgência e à importância de políticas destinadas a desacelerar a mudança climática. O segundo conjunto é direto, relativo a políticas que compensem e atenuem essa mudança.

Com respeito ao primeiro conjunto de implicações políticas que retardem a mudança global do clima, nossas estimativas não têm ligação com a obtenção de meios mais econômicos de desaceleração das mudanças climáticas. Elas têm, entretanto, ligações com a distribuição de renda e respectivas considerações de equidade, e com preocupações ambientais.

As implicações quanto à distribuição de renda e igualdade regional emergem de nossas estimativas de valor da terra. Essas estimativas mostram que a alteração do clima terá impactos negativos significativos em grande parte do Brasil, principalmente na maior parte do Norte e Nordeste, e parte do Centro-Oeste. Essas regiões do Brasil são hoje geralmente “prejudicadas” em termos de recursos de solo, chuvas e temperatura. Estão também em desvantagem em termos de renda *per capita*.

Em contraste, muitos municípios no Sudeste, Sul e na região costeira se beneficiarão com a mudança de clima. Essas regiões são hoje privilegiadas em termos de solo, clima e renda.

O fato de que há ganhos advindos de mudanças climáticas provavelmente reduz a urgência de políticas que desacelerem a mudança do clima em boa parte do Brasil. O fato de que a mudança de clima exacerbará desigualdades de distribuição de renda já existentes deve resultar em um maior apoio às políticas que retardem a mudança do clima.

O segundo conjunto de implicações políticas é mais direto. Nossa descoberta de que a mudança tecnológica não é apenas positiva mas também compensatória é importante. Nossas estimativas mostram que se o Brasil elevar seus níveis de investimento em pesquisas agrícolas aos padrões de países

desenvolvidos, em ambos os setores público e privado, a alteração na produtividade pode significativamente evitar que ocorram perdas decorrentes de mudança de clima na maior parte das regiões (e muitas regiões serão beneficiadas pelas mudanças técnicas e climáticas). Investimentos em educação, treinamento e infraestrutura destinados a reduzir desigualdades regionais receberam grande importância nos últimos anos. Nossas estimativas sinalizam para a manutenção dessas políticas.

Finalmente, nossas estimativas sobre o uso da terra têm implicações quanto a ambos os grupos de preocupações políticas. Muitos formuladores de política considerarão alarmantes as implicações da mudança de clima (especialmente o aquecimento) sobre o uso da terra. A conversão de terras florestais em pastagens e lavouras será particularmente preocupante para aqueles que desejam proteger a biodiversidade. Isso aumentará a urgência das medidas de desaceleração do aquecimento global, e o apoio a elas.

Nossas estimativas com relação ao potencial compensatório das mudanças técnicas são semelhantes, mas de menor magnitude. Maiores investimentos em P&D no setor privado, e especialmente no setor público, modificarão e reduzirão o efeito estimado do “desflorestamento” devido à mudança de clima. Nossas estimativas não sugerem que a mudança tecnológica possa realmente evitar esse efeito de desflorestamento.

## Referências Bibliográficas

ÁVILA, A. F. D.; EVENSON, R. E. Research and productivity growth in the Brazilian grain sector. *Revista de Economia Rural*, 1995.

CRUZ, E. R. DA; ÁVILA, A. F. D.; EVENSON, R. E. The Contribution of Brazilian agriculture research and extension to total factor productivity growth. *Economia Aplicada* (no prelo). 1997.

EVENSON, R.E.; ALVES, D. *Climate change and technology change effects on land use and land productivity in Brazilian agriculture*. New Haven: Economic Growth Center, Yale University. 1997.

MENDELSON, R.; NORDHAUS, W. D.; SHAW, D. The impact of global warming on agriculture: A Ricardian analysis. *American Economic Review*, v. 84, n. 4, p. 88:753-771, 1994.

MERRICK, T. Fertility and land availability in rural Brazil. *Demography*, v. 15, n. 3, p. 321-336, 1978.

SANGHI, A.; ALVES, D.; EVENSON, R.; MENDELSON, R. Global warming impacts on Brazilian agriculture: estimates of the Ricardian model. *Economia Aplicada*, v. 1, n. 1, 1997.

SIQUEIRA, O. J. F. DE, FARIAS, J. R. B. DE; SANS, L. M. A. Potential effects of global climate change for Brazilian agriculture and adaptive strategies for wheat, maize and soybean. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 2, p. 115-129, 1994.

## Anexo A

### Variáveis de Estoque de Pesquisa Agrícola

O Brasil tem um complexo sistema de instituições de pesquisa do setor público. A Equação A.1 relaciona as unidades federais de pesquisa da Embrapa e as unidades de pesquisa estaduais. A variável de pesquisa estadual  $S\_R$  (Tabela 1) foi construída assim:

Cada município,  $i$ , no período,  $t$ , recebeu uma variável de estoque de pesquisa estadual da seguinte forma:

$$(A.1) \quad S\_R_{it} = \sum_{r,j} W_{rt} S_{ij} R_{ij}$$

onde

$W_{rt}$  é um conjunto de pesos na forma de tempo

$S_{ij}$  é um conjunto de pesos espaciais

e  $R_{ij}$  é despesas com pesquisa (em unidades monetárias constantes) na região  $j$ , no tempo  $t$ .

Há um intervalo de tempo entre a condução de atividades de pesquisa e o desenvolvimento de tecnologia avançada. Os experimentos demandam tempo e avaliação, e devem ser projetadas seqüências de experimentos e testes, para que seja desenvolvida uma nova tecnologia. Tal tecnologia deve então ser difundida entre os agricultores. Parte dessa difusão requer concretização na forma de insumos de plantio (sementes) e parte é fundamentada em informação (práticas melhoradas). Os agricultores devem experimentar e avaliar à medida que adotam a tecnologia e a adaptam para as condições de suas fazendas.

A “forma-tempo” desses intervalos é, portanto, similar ao intervalo clássico de difusão de tecnologia, com um período de pequeno impacto da pesquisa após o investimento, crescendo até um pico alguns anos depois. Entretanto, um segundo fator, a depreciação, tem um papel também na forma-tempo. É importante distinguir entre depreciação e obsolescência, a esse respeito. A obsolescência tecnológica ocorre quando uma tecnologia nova (uma variedade de arroz, por exemplo) é superior a uma tecnologia existente e a descarta. Se a tecnologia nova foi desenvolvida como uma extensão da existente (i.e., foi

uma “adição” a uma tecnologia existente), então os investimentos associados ao desenvolvimento da tecnologia existente não se depreciam mesmo que a tecnologia se torne obsoleta.

A depreciação ocorre (a) quando há aditividade incompleta no desenvolvimento de tecnologia, e (b) quando há efeitos de “exposição” que reduzem o valor da tecnologia depois que ela é exposta ao uso. A resistência genética da planta hospedeira a insetos e doenças da planta é frequentemente reduzida pela exposição ao uso, e este é um exemplo de depreciação. Alterações de preços podem reduzir (ou aumentar) o valor da tecnologia, e essa também é uma fonte de depreciação (p.ex., um aumento no preço da energia elétrica pode reduzir o valor de tecnologia que dependa muito de energia).

A fórmula usada para construir os estoques de pesquisa neste estudo é:

$$(A.2) \quad S - R_t = (\text{ExpRE}_{t-4} \cdot 0.2) + (\text{ExpRE}_{t-5} \cdot 0.4) + (\text{ExpRE}_{t-6} \cdot 0.6) \\ + (\text{ExpRE}_{t-7} \cdot 0.8) + \sum_{i=8}^{20} (\text{ExpRE}_{t-2} \cdot 1.0)$$

onde  $\text{ExpRE}_{t-4}$  é a despesa no ano t-4 etc.

Incorporamos um intervalo de tempo de quatro anos entre o investimento inicial em pesquisa agrícola (1º ano do projeto de pesquisa) e o impacto sobre a produção agrícola ao nível da unidade agrícola. O impacto total é percebido após oito anos. Dado o desenvolvimento relativamente recente da pesquisa da Embrapa, não incorporamos um componente de depreciação. Essas estimativas baseiam-se em estudos prévios (Evenson et al., 1987; Evenson et al., 1989). A pesquisa conduzida em um local produz tecnologia que é útil em outros locais; mas não necessariamente de igual utilidade em todos esses outros locais. Sabemos que o desempenho de plantas e animais é sensível aos fatores de clima e solo. O modelo de seleção natural de Darwin nos diz que a diversidade genética está associada a um alto grau de especificidade de localização de plantas e animais em nichos ecológicos. Os programas modernos de reprodução de plantas e animais superaram apenas parcialmente esse fenômeno darwiniano. Os sistemas de pesquisa no Brasil incorporaram a objetivação darwiniana em sua estrutura.

O problema com que nos deparamos neste estudo é distribuir os estoques de pesquisa provenientes dos Centros Nacionais, Centros Regionais e Programas

Estaduais para microrregiões e municípios específicos (nossa unidade de análise). Na prática, há dois métodos para fazer isso. Um é o método de distância da tecnologia, no qual a pesquisa conduzida na região “j” é atribuída à região “i” em proporção a um índice de distância de tecnologia entre elas. Os índices de distância de tecnologia constituem medidas do desempenho relativo da melhor tecnologia da região “j” na região “i” em relação à melhor tecnologia da região “j” na região “i”.

O segundo método, usado neste estudo, é o de “testar” distribuições alternativas de pesquisa com base em evidências geoclimáticas e de zona de prioridade. Por exemplo, no trabalho apresentado abaixo, fizemos três contabilizações alternativas para a pesquisa do Programa Nacional da Embrapa. São elas:

(1) Contabilização 1, em que todas as microrregiões do país recebem o estoque de pesquisa dos Programas Nacionais. Tal atribuição é consistente com os efeitos secundários (*spill-over*) dos resultados de pesquisa dos Programas de Centros Nacionais de Produtos para outros locais.

(2) Contabilização 2, em que a pesquisa do Programa Nacional é distribuída a “Zonas Prioritárias” identificadas pelas equipes de Centros Nacionais de Produtos. Trata-se de um subconjunto das 92 zonas agroecológicas (em média 40%). Essa contabilização é consistente com os efeitos secundários restritos a essas zonas de prioridade.

(3) Contabilização 3, em que a pesquisa dos Programas Nacionais é atribuída apenas à microrregiões nas zonas agroecológicas em que estão localizados os Programas de Centros Nacionais de Pesquisa. Essa atribuição é consistente com os efeitos secundários muito restritos dos benefícios da pesquisa.

Um procedimento semelhante foi aplicado aos Centros Regionais de Pesquisa da Embrapa, em que é feito um teste entre a atribuir a pesquisa para as regiões, conforme definido pela Embrapa, e a contabilização 3.

Testes de erro quadrático médio foram feitos para selecionar a contabilização mais consistente com os dados. Como se observa abaixo, esses testes mostram que a contabilização 1 foi melhor para o Programa Nacional de Pesquisa de Gado. A contabilização 2 foi a melhor para pesquisas sobre culturas e pesquisa agrícola em geral. Para a pesquisa de Centros Regionais, a contabilização 3 foi a melhor. A contabilização da pesquisa estadual para todas as microrregiões do estado foi a melhor.

## Anexo B

### Sistema Nacional de Pesquisa Agrícola

1. Unidades Descentralizadas da Embrapa
  - a) Centros de Pesquisa Agroflorestal ou Ecorregional
    - Embrapa Amazônia Ocidental
    - Embrapa Amazônia Oriental
    - Embrapa Cerrados
    - Embrapa Acre
    - Embrapa Rondônia
    - Embrapa Roraima
    - Embrapa Amapá
    - Embrapa Pantanal
    - Embrapa Meio Norte
    - Embrapa Agropecuária Oeste
    - Embrapa Tabuleiros Costeiros
    - Embrapa Clima Temperado
    - Embrapa Semi-Árido
  - b) Centros Nacionais de Produtos
    - Embrapa Algodão
    - Embrapa Arroz e Feijão
    - Embrapa Caprinos
    - Embrapa Florestas
    - Embrapa Gado de Corte
    - Embrapa Gado de Leite
    - Embrapa Pecuária Sudeste
    - Embrapa Pecuária Sul
    - Embrapa Hortaliças
    - Embrapa Mandioca e Fruticultura
    - Embrapa Milho e Sorgo
    - Embrapa Soja
    - Embrapa Trigo
    - Embrapa Suínos e Aves
    - Embrapa Uva e Vinho

- c) Centros de Pesquisa Temáticos
    - Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia
    - Embrapa Agrobiologia
    - Embrapa Agroindústria Tropical
    - Embrapa Instrumentação Agropecuária
    - Embrapa Meio Ambiente
    - Embrapa Solos
    - Embrapa Informática Agropecuária
    - Embrapa Agroindústria de Alimentos
  
  - d) Serviços Especiais
    - Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia
    - Embrapa Negócios Tecnológicos
    - Embrapa Monitoramento por Satélite
2. Instituições Estaduais de Pesquisa
- a) Região Sul
    - IPAGRO – Instituto de Pesquisas Agronômicas, Estado do Rio Grande do Sul
    - IRGA – Instituto Riograndense do Arroz, Estado do Rio Grande do Sul
    - FUNDACEP – Fundação Centro de Pesquisa Agrícola, Estado do Rio Grande do Sul
    - EPAGRI – Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina, Estado de Santa Catarina
    - IAPAR – Instituto Agronômico do Paraná, Estado do Paraná
    - OCEPAR – Sindicato e Organização das Cooperativas do Estado do Paraná, Estado do Paraná
  
  - b) Região Sudeste
    - IAC – Instituto Agronômico de Campinas, Estado de São Paulo
    - IB – Instituto Biológico, Estado de São Paulo
    - IZ – Instituto de Zootecnia, Estado de São Paulo
    - PESAGRO – Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio de Janeiro, Estado do Rio de Janeiro
    - EMCAPA – Empresa Capixaba de Pesquisa Agropecuária, Estado do Espírito Santo
    - EPAMIG – Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais, Estado de Minas Gerais

c) Região Nordeste

EBDA – Empresa Baiana de Desenvolvimento Agrícola, Estado da Bahia

EMDAGRO – Empresa de Desenvolvimento Agropecuário de Sergipe,  
Estado de Sergipe

EPEAL – Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado de Alagoas  
S.A., Estado do Alagoas

IPA – Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária, Estado de  
Pernambuco

EMPARN – Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte,  
Estado do Rio Grande do Norte

EMEPA – Empresa Estadual de Pesquisa Agropecuária da Paraíba, S.A.,  
Estado da Paraíba

EPACE – Empresa de Pesquisa Agropecuária do Ceará, Estado do Ceará

EMAPA – Empresa Maranhense de Pesquisa Agropecuária, Estado do  
Maranhão

d) Região Norte

Os estados nesta região não desenvolvem pesquisa agrícola. Os centros de pesquisa da Embrapa são responsáveis pela pesquisa agropecuária.

e) Região Centro-Oeste

EMGOPA – Empresa de Pesquisa Agropecuária de Goiás, Estado de  
Goiás

EMPAER MT – Empresa Matogrossense de Pesquisa, Assistência  
e Extensão Rural S.A., Estado de Mato Grosso

EMPAER MS – Empresa de Pesquisa, Assistência e Extensão Rural de  
Mato Grosso do Sul, Estado de Mato Grosso do Sul

## 4 Impactos das Condições Climáticas e da Variabilidade e Mudanças do Clima Sobre a Produção e os Preços Agrícolas: Ondas de Frio e seu Impacto Sobre a Cafeicultura nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil

JOSÉ ANTONIO MARENGO

*Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE,  
Cachoeira Paulista, SP, Brasil*

*Resumo.* Existem observações de que, no inverno, massas de ar polar atingem as latitudes subtropical e tropical da América do Sul, e em algumas ocasiões essas ondas de frio foram relacionadas à ocorrência de geada nas zonas cafeicultoras dos estados do Sul e Sudeste do Brasil. Como o país é o maior produtor e exportador mundial de café, tais eventos climáticos tiveram no passado, e ainda têm, grande impacto sobre a produção total das regiões citadas, bem como sobre os preços internacionais do café nas principais bolsas de valores do mundo. Os casos mais bem documentados de geadas foram os de julho de 1975 e de junho e de julho de 1994, e juntamente com uma seca intensa em junho de 1981, elas reduziram os volumes de produção em mais de 50% e aumentaram o preço internacional do café em mais de 40%. Impactos desses resfriamentos vêm sendo identificados desde o fim do século XIX, pelas estatísticas de produção de café nas plantações do sul do Brasil. Em estudo de variabilidade climática de longo prazo na região, observou-se que: (a) a quantidade de ondas de frio diminuiu com o tempo, mas isso não impede que a qualquer momento uma onda forte de frio possa afetar a região, independentemente de terem passado poucas frentes frias, e (b) as temperaturas do inverno na região mostram tendência de elevação. O presente trabalho apresenta uma avaliação dos impactos climáticos de frentes frias de inverno sobre as áreas de cafeicultura nas regiões sul e sudeste do Brasil, com ênfase nas características gerais do clima, nas tendências climáticas interanuais e de longo prazo das ondas de frio na região, e os impactos dessas sobre a produção e o preço do café, conforme documentado desde 1892 até o presente. São também feitos alguns comentários sobre os possíveis impactos do aquecimento global e das mudanças climáticas sobre as atividades agrícolas na região.

## **The Impact of the Climate Conditions and Climate Variability and Changes on Crop Yields and Prices: Polar air Surges and Their Impact on Coffee Production in the South and Southeast Regions of Brazil**

*Abstract.* It has been observed that wintertime surges of polar air outbreaks reach the subtropical and tropical latitudes of South America and that these surges of cold air have occasionally been associated with frost in the coffee growing areas of the southern and south-eastern states of the country. Since Brazil is the world's largest coffee producer and exporter, such weather related hazards have had in the past and continue to have a substantial impact on total coffee yields in these regions, as well as on the international prices of the main commodity markets world-wide. The best documented cases are the July 1975, June 1994 and July 1994 frosts which, together with the June 1981 drought, reduced yields by more than 50%, increasing international coffee prices in excess of by more than 40%. The impact of cold weather had already identified in the late 19<sup>th</sup> century through statistics of coffee yields in the growing areas of southern Brazil. As regards long-term climate variability in the region, it has been observed that (a) the number of cold surges have diminished in time, although this does not mean that strong cold surges cannot affect the region at other times, and (b) wintertime temperatures in the region exhibit an upward trend. The paper presents an assessment of the climatic impact of wintertime cold fronts on the coffee growing areas of the South and South-east regions of Brazil, with emphasis on the general weather characteristics, the inter-annual and long term climatic trends of cold surges in the region and their impacts on coffee yields and prices from 1892 to date. The possible impacts of global warming and climate change on the agricultural activities in the region are also discussed.

### **Introdução**

Incursões temporárias de ar de latitude média em latitudes tropicais são uma característica específica da climatologia sinóptica na América do Sul. Embora essas ondas de ar frio sejam um fenômeno que pode ocorrer o ano todo, elas mostram maior impacto durante o inverno, quando massas de ar frio

se movem das regiões polares para as latitudes mais baixas. Ondas de frio associadas à passagem de frentes frias podem afetar o clima regional, produzindo condições de frio e até geada, e prejudicando a cafeicultura no sul e no sudeste do Brasil. Diversos trabalhos já lidaram com os aspectos meteorológicos e sinóticos das ondas de frio, com base em observações ou em modelos, para aspectos climáticos e estudos de caso individuais (ver Marengo et al., 1997a,b, Garreaud & Wallace, 1998; Garreaud, 1998; Seluchi & Marengo 2000; Cavalcanti & Kousky, 1999; Marengo & Rogers, 2000).

A longo prazo, observou-se que o número de frentes frias relacionadas a geadas intensas no sul do Brasil diminuíram com o tempo (Satyamurti, comunicação pessoal), havendo uma tendência de invernos mais quentes. Não obstante essa tendência de elevação, alguns desses casos em número relativamente menor podem ser bem fortes, como ocorreu no inverno de 1994, quando foram relatados 2 casos extremos, embora a temperatura da estação estivesse acima da normal. A esse respeito, o IPCC (1998) indica que o aquecimento global pode aumentar o número e a gravidade de eventos climáticos extremos tais como tempestades, inundações e secas, e geadas podem ser esperadas mesmo em um inverno relativamente quente. Entretanto, a quantidade de frentes frias e a intensidade das respectivas ondas de frio podem não estar diretamente relacionadas.

O café é a segunda principal *commodity* no comércio mundial. Produzido em 57 países, a renda mundial oriunda de sua exportação atingiu 57 bilhões de dólares ao ano. O café foi introduzido no Brasil, vindo da Guiana Francesa, no início do século XVIII (IAPAR, 1999). As primeiras plantações existiram em regiões bem servidas de mão de obra escrava, no interior do Rio de Janeiro. Entretanto, a abolição da escravatura e a imigração europeia no Estado de São Paulo, no fim do século XIX, fez com que o cultivo de café se transferisse em direção ao sul, para regiões em que condições do solo, clima e altitude se combinavam para criar o meio ambiente ideal. Esse ambiente favorável, por sua vez, tornou o Brasil o maior produtor de café do mundo.

Em 1845 o café brasileiro já constituía a maior porção (45%) da produção mundial. Durante as cinco primeiras décadas deste século, o Brasil foi o principal produtor, responsável por 70% da produção mundial (Tabela 1), e continua sendo o maior produtor, com exportações que representam hoje um terço de todo o café consumido no mundo. Como resultado, as ocorrências brasileiras relativas ao clima – tais como as geadas de 1975 e 1994, ou as secas de 1981 e 1985 – afetam enormemente o comércio mundial de café.

**Tabela 1** - Contribuição brasileira à produção mundial de café, de 1900 a 1998 (em milhões de sacas)

Período	Mundo	Brasil	Contrib. (%)
1900	15,10	12,06	80
1910	14,35	10,65	74
1920	20,29	17,12	84
1930	25,23	17,65	70
1940	26,50	15,79	60
1950	31,30	16,75	54
1960-69	67,85	25,37	38
1970-79	72,32	19,37	27
1980-89	90,73	26,51	29
1990-99	97,49	26,36	27

Fonte: IAPAR, 1999

*O Brasil é o maior produtor mundial de café, suprindo aproximadamente 27% do café consumido no mundo todo. Compete com a Colômbia pela posição de maior exportador do mundo, ocupando o 1º ou o 2º lugar a cada ano, dependendo do seu volume de produção. É também o 2º maior consumidor do mundo, vindo depois dos Estados Unidos. No início do século XX, as plantações de café cobriam vastas extensões desde o Paraná até o Espírito Santo. O café era mais importante que a cana de açúcar, iniciando um ciclo econômico que estimulou mais tarde o desenvolvimento e a industrialização do país.*

O Estado do Paraná, que já foi o líder e hoje é responsável por apenas 5% do total, tinha em 1994 um total de 191.000 hectares plantados com café, com uma produção de 1,37 milhões de sacas. Em 1998, a área plantada caiu para 138.000 hectares com a produção, entretanto, atingindo 2,1 milhões de sacas. As novas plantações no estado são mais densas, e isso parece proporcionar uma melhor proteção contra as geadas. Em outros estados brasileiros, como em Rondônia e na região Oeste, o café chegou há apenas uma década; esse estado agora produz mais de 1 milhão de sacas.

Com base em dados climáticos, assim como em registros de indicadores biológicos do clima, como estatísticas de produção de café e relatórios dos impactos de congelamentos sobre aquela colheita, o presente estudo focaliza a variabilidade, a longo prazo, das frentes frias de inverso no sul e sudeste do

Brasil, com ênfase em sua frequência/intensidade desde o fim do século XIX. Apresenta, adicionalmente, uma avaliação dos efeitos potenciais do futuro aquecimento global e da mudança de clima sobre a produção de café, como uma maneira de avaliar a mudança climática e seus impactos sociais no Brasil.

## **Ondas de Ar Polar na América do Sul e seu Impacto na Cafeicultura**

Historicamente, o clima tem desempenhado papel dos mais importantes na determinação da oferta mundial de café. Por exemplo, os aumentos de produção que se seguiram à recuperação da geadas brasileira de 1953 criaram grandes quedas de preço. Além disso, registra-se que a seca agravou o efeito da geadas de julho de 1981, porque veio depois dos danos causados pela geadas. Em muitas das ocorrências de geadas, a chuva abundante que se segue ajuda as plantas danificadas a se recuperarem de maneira muito rápida; naquela ocasião, a falta de chuvas no período subsequente à geadas tornou a situação pior. Para o sudeste do Brasil, relatórios emitidos pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 1975) indicaram que a geadas de julho de 1975 (possivelmente a mais intensa do século) reduziu a colheita de 1976/77 para 9,3 milhões de sacas, quando a média do período 1961-80 foi de 19 milhões de sacas. Os danos foram tão grandes que motivaram a mudança das plantações de café das antigas regiões de cultivo no Paraná para São Paulo e Minas Gerais. O evento foi de extrema severidade, sendo comparado às intensas geadas de agosto de 1908 e de junho de 1918.

*Estima-se que a geadas de meados de julho de 1975 reduzirá em 60%-70% a safra de café de 1975-76 em São Paulo, e em 5%-10% a da cana-de-açúcar. O frio intenso também danificou pastagens, tomates, trigo e bananas no estado. Em razão dos danos causados pela geadas, praticamente nenhum café será colhido no Paraná no próximo ano, e apenas 25%-33% da safra normal é projetada para 1977/78. No Mato Grosso, a produção de café de 1976 foi cortada em 70%, e a cana-de-açúcar em 20%. Minas Gerais sofreu uma perda de 30% na produção de café de 1976, e de 20% na de cana de açúcar. O frio prejudicou ainda o trigo precoce no Paraná, reduzindo as perspectivas da safra brasileira de trigo de 1975/76, de 3,5-3,8 milhões de toneladas para cerca de 3 milhões. Por toda a zona de congelamento do sul do Brasil, a geadas queimou pastagens, e isso resultará em abate de gado acima do usual. Depois da geadas de 1975, a agricultura no Paraná entrou em uma nova fase, com novas culturas, como soja e trigo, substituindo o café. (USDA 1975)*

O ar gelado irrompeu pelas regiões cafeeicultoras do Brasil durante a terceira semana de julho de 1981, matando a florada em botão e causando potencialmente uma significativa redução na produção de 1982/83 (Haddock et al., 1981). As fontes comerciais estimam uma perda de cerca de um terço da safra do ano seguinte, com base em avaliações iniciais. O prejuízo não seria tão grave como em 1975, quando os pés de café morreram. Da mesma forma, as geadas brasileiras de junho e de julho de 1994 causaram uma acentuada queda na produção (Figura 1) e drásticos aumentos no preço do café (Marengo et al., 1997a). Uma nítida diminuição na produção brasileira em 1995/96 e 1996/97, em razão dessas duas geadas devastadoras, fez o preço do café disparar para os mais altos níveis em quase uma década. Marengo et al. listaram os seguintes eventos de frio que produziram dano intenso nas áreas cafeeicultoras do sul e do sudeste do Brasil:

*14 de julho 1882, 16 de julho 1894, 25 de julho 1895, 5 de julho 1898, 18 de junho 1899, 19 de agosto 1902, 12 de agosto 1904, 18 de julho 1910, 23 de junho 1911, 3 de setembro 1912, 25 de junho 1918, 25 de junho 1928, 29 de junho 1931, 14 de julho 1933, 12 de junho 1942, 15 de setembro 1943, 5 de julho 1953, 2 de agosto 1955, 21 de julho 1957, 7 de julho 1962, 22 de junho 1963, 28 de junho 1964, 21 de agosto 1965, 6 de agosto 1966, 11 de julho 1969, 9 de julho 1972, 18 de julho 1975, 15 de agosto 1978, 31 Maio 1979, 18 de julho 1981, 28 de julho 1982, 15 de junho 1983, 3 de agosto 1983, 24 de agosto 1984, 8 de junho 1985, 2 de junho 1986, 26 de julho 1986, 26 de julho 1988, 7 de julho 1989, 22 de julho 1990, 24 de julho 1992, 15 de julho 1993, 1 de agosto 1993, 26 de junho 1994, 10 de julho 1994, 10 de agosto 1994. (Marengo et al., 1997a)*

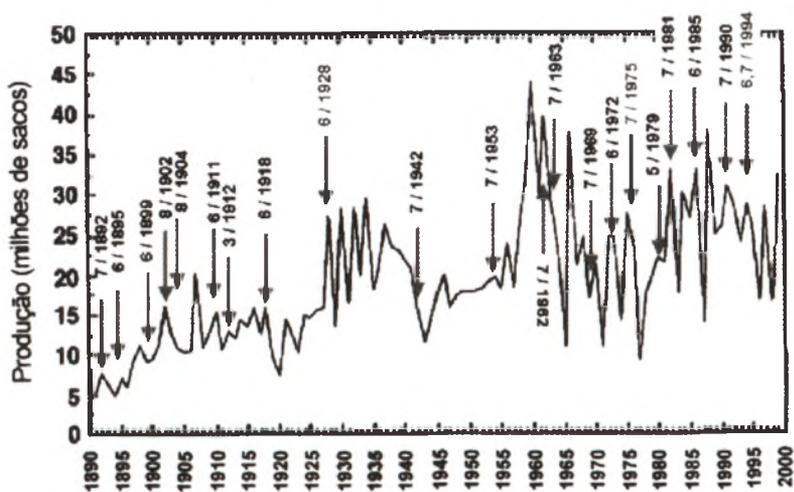
A Tabela 2 mostra, apenas para o Estado de São Paulo, a ocorrência de eventos de frio que afetaram a cultura de café em diferentes graus. De todos esses eventos, os mais devastadores para a produção de café foram os de: 18 de junho 1899, 19 de agosto 1902, 25 de junho 1918, 25 de junho 1928, 18 de julho 1975, 18 de julho 1981, 26 de junho 1994, e 10 de julho 1994. No período 1995-98 não foi detectado nenhum evento prejudicial à cafeeicultura na região. As geadas registradas em regiões cafeeicultoras do Brasil, indicam que a alteração na variação de temperatura através dos anos é provavelmente muito pequena, mas é preciso apenas uma variação marginal e apenas algumas horas de geada em uma noite para causar danos reais que, como em 1975, podem levar dois ou três anos para serem recuperados. Em 1975, algo como 75% dos pés de café no Brasil foram afetados em algum grau, e a safra de 1976 foi de meras 6 milhões de sacas.

**Tabela 2** - Lista de eventos de tempo frio no Estado de São Paulo - Brasil, e sua intensidade (Marshall, 1983, Marengo & Rogers, 2000), atualizada por J. Zullo (CEPAGRI-UNICAMP, São Paulo). Não foi registrado nenhum evento que tenha afetado o café, após os ocorridos no inverno de 1994. A intensidade foi definida como Fr=Fraca, M=Moderada, FO=Forte, MI=Muito intensa

Ano	Dia	Mês	Temp. mín.(°C)	Intens.	Ano	Dia	Mês	Temp. mín.(°C)	Intens.
1892	14	Julho	0,2	FO	1953	5	Julho	1,2	FO
1894	14	Julho	1,0	FO	1955	2	Ago.	2,0	FO
1895	25	Julho	1,0	FO	1957	21	Julho	1,2	M
1899	18	Junho	1,6	M	1962	7	Julho	2,4	FO
1902	19	Ago.	0,2	MI	1965	21	Ago.	0,6	M
1904	12	Ago.	1,5	FO	1969	11	Julho	2,4	FO
1912	3	Set.	1,8	FO	1972	9	Julho	1,6	M
1918	25	Junho	-1,5	MI	1975	18	Julho	0,6	MI
1923		Julho	2,0	FR	1979	31	Maio	0,2	FO
1925		Julho	2,0	FR	1981	21	Julho	0,2	MI
1931	29	Junho	2,0	M	1985	8	Junho	1,4	M
1933	14	Julho	1,4	M	1988	5	Junho	1,8	M
1942	12	Julho	-0,2	FO	1994	27	Junho	0,3	MI
1943	15	Set.	2,0	M		10	Julho	0,8	MI

Existem estatísticas de produção e produtividade de café nos estados do sul do Brasil disponíveis desde o final do século dezenove, e dada à dependência do café ao tempo frio, as alterações na produção (e nos preços) podem ser usadas como um método indireto de avaliar a presença e a intensidade das ondas de frio nessa região. A Figura 1 mostra as estatísticas de produção e produtividade de café no sul e no sudeste do Brasil, fornecidas pelo Instituto Brasileiro do Café, pelo *New York Times* e pelo Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), de 1892 a 1999. No Paraná, observa-se um contínuo aumento de produção devido a aumentos na área cultivada, que foi incrementada de 300.000 hectares em 1951 para 1,6 milhões de hectares em 1962. No Brasil, os últimos dez anos indicam uma média de 27 milhões de sacas.

### Produção Nacional de Café (milhões de sacos)



**Figura 1** - Produção de café no Brasil de 1892 a 1995 (milhões de sacos, 1 saca=60 kg)

Alguns dos efeitos das ondas de frio e das geadas, como explicado acima, podem ser observados como quedas na produção de café após a ocorrência de eventos de frio conduzindo à geadas. Foram observadas grandes quedas na produção após as geadas de junho 1928, julho 1975, junho 1981, e de junho e julho 1994, amplamente relacionadas ao frio.

Durante a década de 1990, três dificuldades principais afetaram os produtores de café no Brasil: os preços baixos, as geadas de inverno de 1994 e os elevados custos de produção. A Figura 1 mostra a baixa produção de 1995/96, devida principalmente aos eventos de geada de junho e julho 1994, embora as temperaturas durante o inverno de 1994 tenham permanecido acima do normal. Além disso, a maior parte da redução ocorrida no Espírito Santo foi causada mais por condições de seca do que por geada. As estimativas de perdas em 1995 devidas às geadas de junho e julho 1994 são de 50-80% em São Paulo e Paraná (Marengo et al., 1997a). Quanto à produção de 1995/96, as estimativas são de uma safra de 13-15 milhões de sacos. Para 1997/98, o clima ameno de inverno associado ao El Niño manteve o Brasil livre de geadas, mas as chuvas de junho mais pesadas que o esperado afetaram a qualidade da safra recém-colhida. Adicionalmente, o potencial para menos chuvas devido ao El

Niño, na região norte do cinturão cafeeicultor do Brasil, pode impactar as culturas de café *robusta* no Espírito Santo. Entretanto, há relatos indicando que a despeito da seca induzida pelo El Niño no Espírito Santo, as condições para a safra brasileira de café foram boas, pois cresceu em 65% em comparação à safra de 18,86 milhões de sacas em 1997/98. Enquanto isso, as condições para a produção de café deterioraram-se na Indonésia, na Colômbia e na América Central.

Durante a temporada 1998/99, a produção foi de 35,2 milhões de sacas de café, de acordo com a Associação Brasileira de Cafeicultores. Devido aos altos preços internacionais, as exportações de café em grão garantiram um cifra recorde de 2,75 bilhões de dólares no ano 1998/99. No momento em que as regiões cafeeicultoras brasileiras entram no inverno, o potencial para geadas está sendo monitorado para este inverno pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), em Cachoeira Paulista, em São Paulo.

## **Ondas de Frio na América do Sul e Características Gerais do Clima**

Durante o inverno no Hemisfério Sul, o sul e sudeste do Brasil são ocasionalmente afetados por temperaturas de congelamento, devido à massas de ar frio vindas de latitudes mais altas. Já foram discutidas em vários trabalhos as características meteorológicas desses eventos, bem como os impactos desses eventos sobre a produção de safras importantes, além de outros aspectos do fenômeno. Fortune & Kousky (1983), Marengo et al. (1997a, b) e Garreaud (1998) analisaram estudos de caso individuais dos eventos de frio que levaram a condições de congelamento no sul e sudoeste do Brasil. Esses autores notaram que o esfriamento era precedido por um padrão de circulação atmosférica caracterizado por uma onda atmosférica de longa amplitude, movendo-se lentamente até o leste sobre o sul do Oceano Pacífico, que esteve se intensificando nos dias anteriores. Quando atingia amplitude máxima, a crista dessa onda estava localizada próximo ao sul dos Andes, enquanto o cavado atmosférico estava no Atlântico Sul, sobre as longitudes brasileiras. Essa configuração típica, apresentada também em diversos outros casos relatados na literatura, permite que massas de ar originalmente de latitudes mais altas sejam canalizadas em direção ao Equador, auxiliadas pelos Andes. Está documentado que os primeiros episódios de ondas de frio sobre o sul e sudeste do Brasil são detectadas a partir do fim de Abril e início de Maio (Satyamurty et al., 1990).

Um resumo das características da circulação de ar – da superfície e das camadas altas – típica das ondas de frio na América do Sul, pode ser encontrado em Garreaud (1998) e Marengo et al. (1997a). A circulação nos altos níveis da atmosfera é caracterizada por uma onda em desenvolvimento em latitude média, com uma crista imediatamente a oeste dos Andes e um cavado sobre o leste da América do Sul, o que proporciona o impulsionamento do sistema predominantemente na forma de advecção de vortacidade (Marengo et al., 1997a, Garreaud & Wallace, 1998). Nos níveis baixos da atmosfera, a incursão até o Equador, de ar frio é iniciada pelo movimento de um anticiclone migratório de núcleo frio desde o sudoeste do Pacífico até as planícies sul do continente (à leste dos Andes), e pelo aprofundamento de um centro de baixa pressão sobre o Atlântico ao norte da costa da Argentina. Ao longo da latitude 35°S, o anticiclone move-se lentamente para leste, enquanto o ar frio no nível mais baixo move-se para o norte em direção às terras subtropicais e tropicais dentro de 2 a 3 dias.

Em geral, os anticiclones levam 24-48 horas para percorrer a distância entre a costa do Chile e o sul do Brasil. Há uma tendência de os anticiclones ficarem estacionários sobre o sul do Brasil, durante eventos severos de geada, como em 1975 (Tarifa et al., 1977), 1981 (Haddock et al. 1981), e 1994 (Marengo et al., 1997a). Foi observada uma tendência semelhante no caso do inverno de 1993, estudado por Garreaud (1998), embora esse caso não tenha produzido condições de congelamento nas áreas de cafeicultura no Brasil.

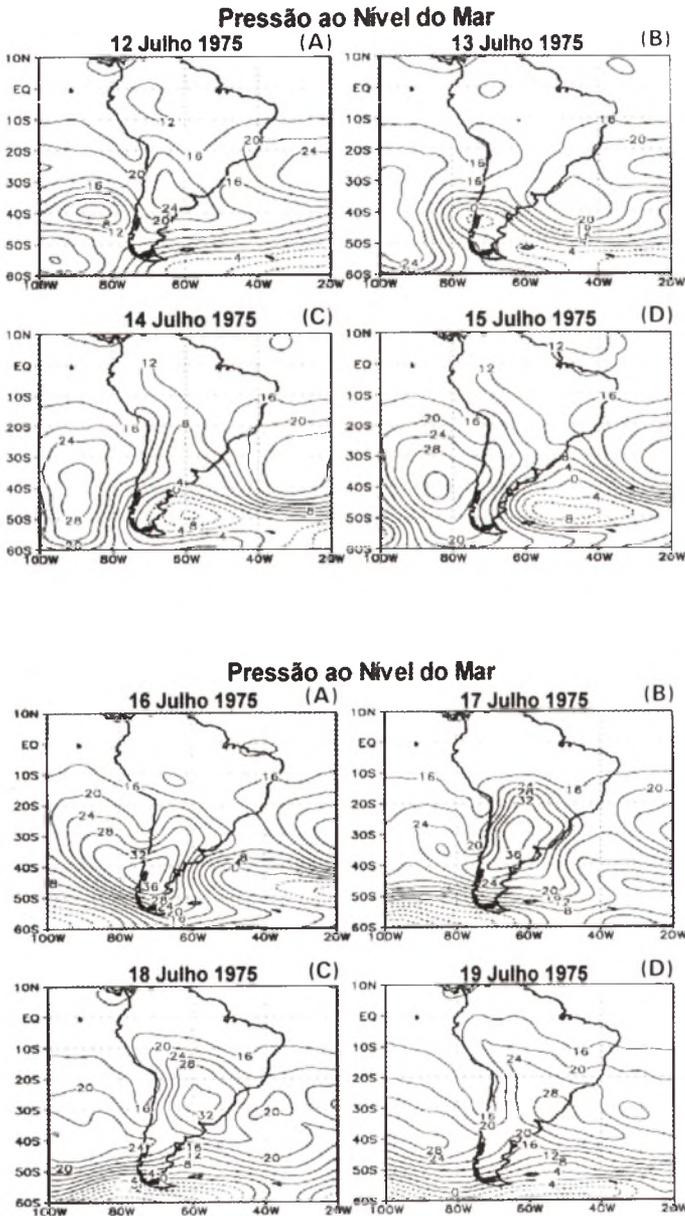
## **Revisão de Dois Estudos de Caso sobre Geadas Severas que Afetaram a Produção de Café no Brasil**

As geadas de julho de 1975 e de junho e julho de 1994 foram consideradas as mais devastadoras para a agricultura regional nos últimos 50 anos, provocando enormes perdas na produção do café e na de outras culturas, bem como determinando aumentos nos preços internacionais do café.

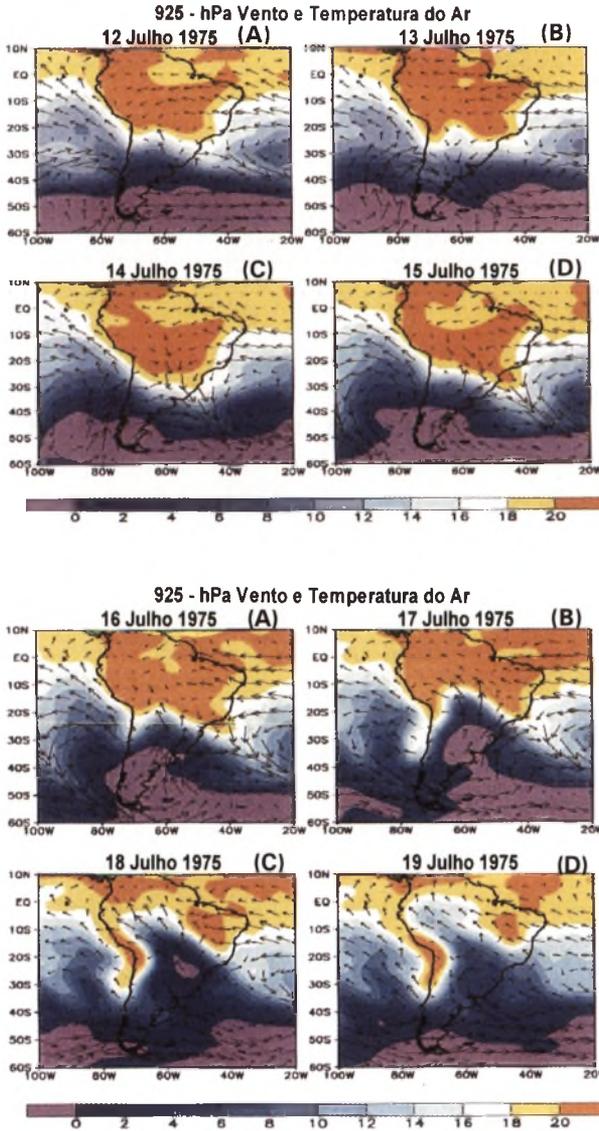
O evento de geada de julho de 1975 foi extremamente severo e afetou a parte sul do país. Duas ondas de frio com características de massas de ar polar continental foram detectadas, com anticiclones com intensidade de 1.028 hPa (entre 6 e 12 de julho) e 1.044 hPa (de 16 a 20 de julho). O primeiro causou geadas sem grandes danos, ao passo que no segundo o frio alcançou nível regional, sendo que em 18 de julho a temperatura do ar no oeste do Estado de

São Paulo caiu a  $-4,5^{\circ}\text{C}$ , e a geada ocorreu nos limites do anticiclone, não no centro. Observou-se também que as ondas polares mais intensas foram precedidas de um forte aquecimento pré-frontal ao lado de uma intensificação da área de baixa pressão do Chaco. O resfriamento foi muito forte, mesmo com a presença de ventos moderados e fortes. A Figura 2a-h mostra a evolução sinóptica do anticiclone de núcleo de ar frio, e mostra, junto com a Figura 3a-h, a entrada de ar frio no sul do Brasil e até na região Amazônica. O anticiclone apareceu na costa do Chile em 13 de julho (Figura 2b), em 14 de julho deslocou-se rumo norte até  $40^{\circ}\text{S}$ ,  $80^{\circ}\text{W}$  com uma intensidade de 1.030 hPa, em 16 de junho o anticiclone abraça os Andes a  $50^{\circ}\text{S}$  e então move-se para o norte, atingindo a posição de  $30^{\circ}\text{S}$  em 17 de julho, com uma intensidade de 1.036 hPa (Figura 2f). Em 18 de julho permaneceu estacionário sobre o sul do Brasil e o norte da Argentina, e em 19 de julho deslocou-se para o Atlântico. A circulação próxima à superfície e temperatura, nesse caso, (Figura 3a-h) indicam o forte fluxo vindo do sul observado desde 15 de julho, deslocando-se para o norte (cor roxa) e atingindo o sul do Brasil em 17 de julho, e depois o sudeste em 18 de julho. O ar frio deslocou-se para o noroeste, resfriando o norte e o oeste da Amazônia em 18 e 19 de julho.

Os eventos de junho e julho de 1994 (Marengo et al., 1997a) foram caracterizados pela presença de uma perturbação anticiclônica na altura da costa do Chile, que penetra a América do Sul e cruza o sul da cordilheira dos Andes à latitude  $45^{\circ}\text{S}$ , horas mais tarde. O centro do anticiclone faz uma trajetória rumo ao Equador até atingir  $20\text{-}30^{\circ}\text{S}$ , e então desvia-se para o leste, indo em direção ao Atlântico. A carta de superfície para 26 de junho, o dia mais frio no sul do Brasil e na Amazônia, é mostrada na Figura 4f. O centro de alta pressão, com uma intensidade de 1.024-1.026 hPa, estava localizado por volta de  $25^{\circ}\text{S}$ ,  $57^{\circ}\text{W}$ , estendendo-se sobre a maior parte do Brasil entre  $15$  e  $30^{\circ}\text{S}$ . A orientação das isobáricas sobre o sul do Brasil indica um fluxo sudoeste. A carta sinóptica de superfície para 26 de junho mostra também o desenvolvimento de uma intensa circulação ciclônica a  $52^{\circ}\text{S}$  e  $47^{\circ}\text{W}$ , e a interação desse forte ciclone com o anticiclone situado sobre o sul do país produziu a forte corrente de vento sul, detectada em todo o percurso desde o sul de  $60^{\circ}\text{S}$ , ao longo da costa da Argentina e atingindo o Uruguai e o sul do Brasil. Nessa data a frente fria está situada em direção ao Equador a  $15^{\circ}\text{S}$ , próximo ao norte de Salvador. A principal diferença entre esse caso e o de julho de 1975 foi a presença desse forte ciclone durante o dia mais frio em junho de 1994, que estava ausente em julho de 1975.



**Figura 2 -** Pressão ao nível do mar (+1000), em hPa, durante a onda de frio de julho de 1975, (a) 12 de julho, (b) 13 de julho, (c) 14 de julho, (d) 15 de julho, (e) 16 de julho, (f) 17 de julho, (g) 18 de julho, (h) 19 de julho (Fonte: Vernon E. Kousky, NOAA/CPC)

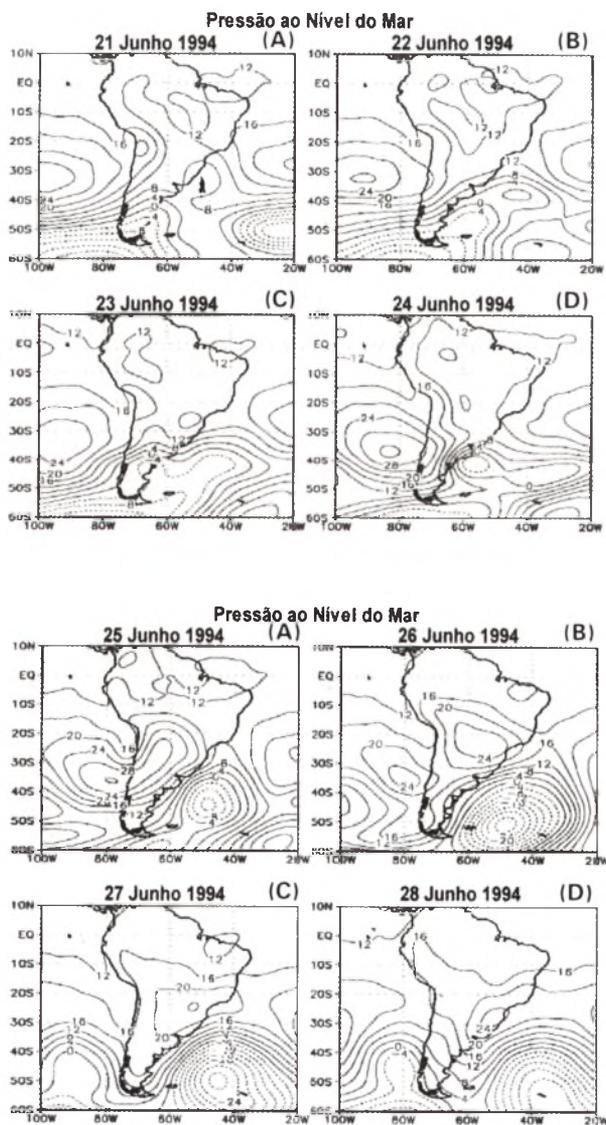


**Figura 3 -** Vento a 925 hPa e temperatura do ar durante o episódio de onda de frio de julho de 1975, (a) 12 de julho, (b) 13 de julho, (c) 14 de julho, (d) 15 de julho, (e) 16 de julho, (f) 17 de julho, (g) 18 de julho, (h) 19 de julho. A escala de cores para a temperatura do ar está indicada na escala de cores no lado inferior das figuras C e D. (Fonte: Vernon E. Kousky, NOAA/CPC)

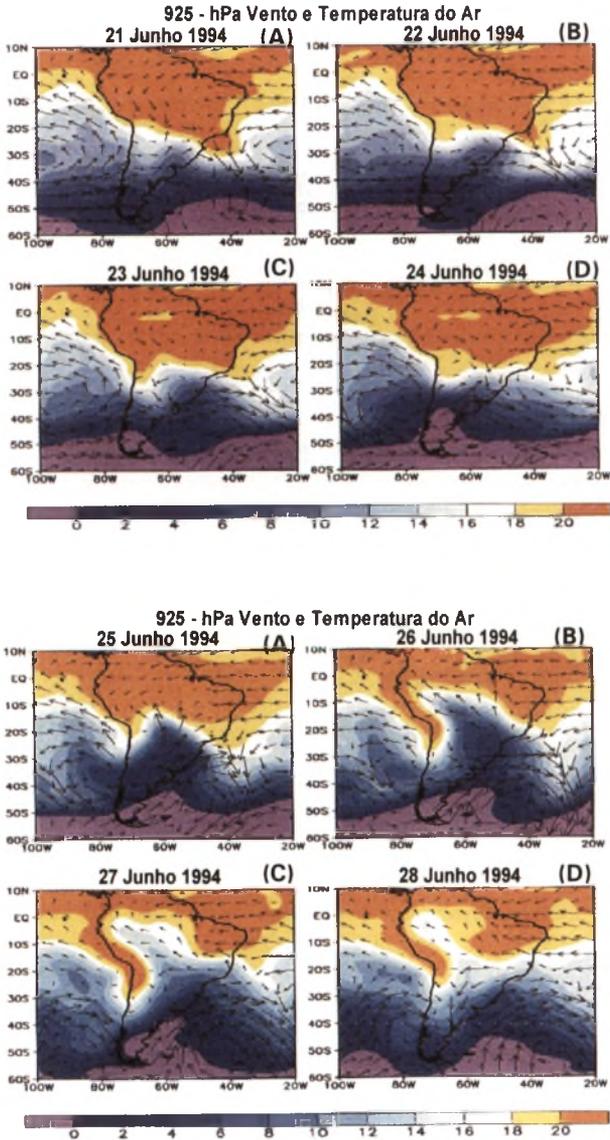
A Figura 4a-h exibe a trajetória tanto da frente fria como do anticiclone, de 21 a 28 de junho de 1994. Três dias antes do dia mais frio no sul e sudeste do Brasil, em 23 de junho, um anticiclone de 1.032 hPa foi observado sobre o Pacífico sul perto da costa do Chile, entrando no continente sobre a Patagônia aproximadamente a 36°S em 24 de junho (1.032 hPa). Entre 24 e 25 de junho esse anticiclone penetrou na América do Sul a partir de latitude sul de 45°S, com o ar frio girando em torno dos Andes e atravessando onde a altura da montanha é relativamente baixa. Depois o ar moveu-se para o norte contornando o flanco ocidental dos Andes em 26 de junho. A intensidade do anticiclone cai nesse período, de 1.032 hPa para 1.024 hPa. Em 25 de junho, o anticiclone atingiu sua posição mais ao norte aproximadamente em 22°S (com 1.030 hPa), enquanto a frente fria atinge a Bahia, e em 27 de junho o anticiclone estava sobre as serras do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Eventualmente, o anticiclone continuou decaindo enquanto se deslocava para leste, e terminou sendo assimilado pela área de alta pressão do Atlântico subtropical (Figura 4g,h). A Figura 5a-h mostra a circulação próxima à superfície e a temperatura durante o estudo de caso de junho de 1994.

Observe na Figura 5a a presença da circulação anticiclônica próxima à costa do Chile, e a entrada de ar frio (em cor azul) iniciando em 24 de junho e deslocando-se para o norte paralelamente aos Andes, com ventos fortes do sudeste que atingiram a Amazônia ocidental em 26 e 27 de junho. O ar frio levou aproximadamente 24-48 horas para atingir o sul do Brasil depois de ultrapassar os Andes ao sul de 45°S. Ainda, o ar frio levou até 72 horas para atingir o sul do Brasil depois de ter sido localizado junto à costa do Chile entre 35 e 40°S. O resfriamento foi mais intenso durante o caso de julho de 1975, se comparado ao evento de junho de 1994.

A Figura 6 mostra a região afetada pelas geadas de 26 de junho e 9 de julho 1994. A área afetada por temperaturas próximas do congelamento cobre as áreas de cafeicultura do sul do Brasil e de São Paulo. Em outubro de 1994, a cafeicultura brasileira estava sofrendo os efeitos de uma seca prolongada que começou logo em seguida das duas geadas devastadoras. A seca foi pior que a de 1985, que destruiu quase 60% da safra. O preço do café nos mercados internacionais de *commodities* flutuava em resposta aos boletins meteorológicos.

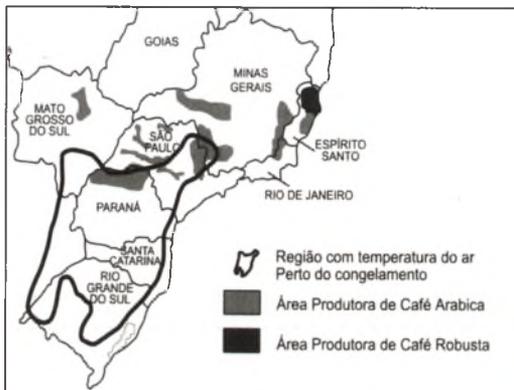


**Figura 4** - Pressão ao nível do mar (+1000), em hPa, durante a onda de frio de junho 1994, (a) 21 de junho, (b) 22 de junho, (c) 23 de junho, (d) 24 de junho, (e) 25 de junho, (f) 26 de junho, (g) 27 de junho, (h) 28 de junho (Fonte: Vernon E. Kousky, NOAA/CPC)

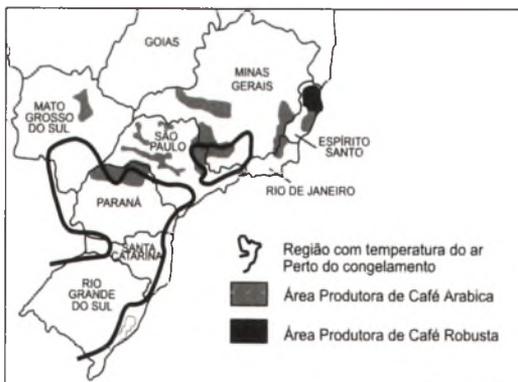


**Figura 5** - Vento a 925 hPa e temperatura do ar durante o episódio de onda de frio de junho 1994, (a) 21 de junho, (b) 22 de junho, (c) 23 de junho, (d) 24 de junho, (e) 25 de junho, (f) 26 de junho, (g) 27 de junho, (h) 28 de junho. A escala de cores para a temperatura do ar está indicada na escala de cores no lado inferior das figuras C e D. (Fonte: Vernon E. Kousky, NOAA/CPC)

**Região feita pela geada de Junho 26-27 1994 nas áreas produtoras de café**



**Região feita pela geada de Julho 09-10 1994 nas áreas produtoras de café**



*Des. Gilberto D'Herringer*

**Figura 6** - Regiões afetadas pelas geadas de 24 de junho 1994 e 9 de julho 1994. As áreas sombreadas indicam as regiões de cultivo de café, e a linha cheia indica a região de temperaturas próximas do congelamento

**Situação da Produção e Preços do Café depois das Drásticas Geadas do Inverno de 1994 no Brasil**

Após as geadas de junho e julho de 1994, a produção de café no sul do Brasil foi relativamente baixa, quando o estimado era de 50% do que fora produzido em 1993/94. Com respeito à safra de 1996/97, ela enfrentou a perspectiva de corte de produção devido à seca. O inverno é normalmente uma estação muito seca para o cinturão brasileiro do café, mas 1996 foi excepcionalmente seco, e praticamente não houve chuva em Minas Gerais de junho a agosto, ocorrendo menos da metade da precipitação normal durante o

mesmo período nos outros estados produtores: Paraná, São Paulo e Espírito Santo. Por outro lado, o inverno de 1995 foi muito quente. As temperaturas médias mensais desde início de junho permaneceram de 4°C a 8°C acima do normal, no coração do cinturão do café. Para a safra de 1997/98, não se esperava que a geada atingisse as plantas brasileiras, mas como publicou a *Bloomberg Business News* em 20 de abril de 1997, o preço do café tinha caído alguns dias antes, com a diminuição da preocupação de que o frio prejudicasse os cafeeiros no Brasil. Os preços haviam subido durante dois dias por causa da ameaça de danos causados por geada e tempo seco no país, e informações sobre frentes frias haviam aquecido o mercado, pois se há uma geada os preços podem disparar.

Com respeito aos impactos de El Niño em 1997/98, os preços do café subiram acentuadamente conforme o padrão meteorológico passou a ser visto como ameaça crescente às safras mundiais.

Como El Niño já havia afetado a safra de *robusta* na Indonésia, houve preocupação de que as safras de café *arabica* na Colômbia, na América Central e algumas partes do Brasil fossem também prejudicadas por esse fenômeno. As condições de seca na América Central e na Colômbia reduziram a qualidade e o tamanho do grão dessa safra e afetaram severamente a colheita da temporada seguinte.

O inverno ameno de 1998 causado pelo El Niño manteve o Brasil livre de geada, mas as chuvas mais fortes do que o normal de junho afetaram a qualidade da safra recém-colhida. A seca mais ao norte também teve impacto sobre o café *robusta* cultivado no Espírito Santo. Em junho de 1998, o *Financial Express* noticiou que se previam duas frentes frias fracas para as áreas cafeicultoras do país, mas elas provavelmente não causariam dano às safras, especialmente porque as plantas estavam protegidas por nuvens. A massa de ar frio que acompanhou a primeira frente era fraca, com uma pressão central de 1.022 hPa. A segunda frente fria foi acompanhada por um anticiclone frio com pressão central de 1.020 hPa, mas não houve risco de geada. No período de 13 a 16 de julho de 1998, uma massa de ar polar muito maior entrou no Brasil com um centro de alta pressão de 1.040 hPa, mas foi muito fraca e não causou preocupação.

Recentemente, em 16 e 17 de abril, a primeira onda de frio de 1999 entrou, proveniente de latitudes mais altas, e estendeu-se sobre o centro do país e a Amazônia ocidental. Nas áreas cafeicultoras do sul e sudeste (oeste do Paraná e São Paulo), as temperaturas do ar baixaram, atingindo valores entre 0°C e 2°C, e determinaram geadas moderadas e fracas. No entanto, devido à ocorrência dessas geadas em um estágio precoce, o dano às plantações não foi tão severo como se poderia esperar.

## **Variabilidade do Clima a Longo Prazo, Aquecimento Global e Mudanças na Frequência/Intensidade das Ondas de Frio no Sul e Sudeste do Brasil**

Em 106 anos, de 1890 a 1996, foram registrados dezoito eventos de geadas muito intensas que danificaram as produções do café. Dessas, cinco foram consideradas catastróficas. Na média, ocorreu na região de cafeicultura um evento severo a cada 6 anos, e um evento muito severo a cada 26 anos. Dois dos eventos muito severos foram registrados no período 1892-1925 (em 1902 e 1918), e os outros 3 no período 1962-96 (em 1975, 1981 e 1994). Das 27 geadas que atingiram as regiões cafeeicultoras nos últimos 100 anos, 7 ocorreram em junho e 12 em julho (INMET, comunicação pessoal). O mês agosto teve 5 geadas no último século e, portanto, qualquer dano nesse mês não pode ser desprezado. Além disso, um inverno mais quente na média não exclui totalmente a ameaça de geada, como o inverno de 1994.

Lemos & Calbete (1996) identificaram frentes frias durante o período 1987-95 em três faixas latitudinais diferentes, e perceberam que o número de frentes frias atingindo essa faixa latitudinal foi maior durante o período 1975-84 do que no período 1987-1995. Entretanto, essa tendência verifica-se apenas para a quantidade de frentes frias, não para a intensidade das massas de ar frio relacionadas a elas. Algarve & Cavalcanti (1994) indicam que o norte do Paraná, o oeste de São Paulo, o sul do Mato Grosso e parte de Minas Gerais são áreas de cultivo de café, e, em média, ocorrem 5 dias de geada por ano. Nesse estudo, foram usados registros de temperatura mínima de 14 estações de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul para o período 1980-89, classificados de acordo com um critério de número de estações que atingiram o limiar de 0°C. Recentemente, Cavalcanti & Kousky (1999) analisaram a variabilidade inter-anual de geadas, de 1979 a 1997, e definiram a presença de uma onda de frio quando a temperatura é inferior a 8°C no sudoeste do Brasil. Durante esse período, ocorreram em média 6 ondas fortes de frio a cada ano. Os dois anos extremos foram 1989 (2 casos) e 1993 (10 casos).

Foi notada uma tendência para aquecimento em São Paulo e em outros estados do Sul e Sudeste do país (Victoria et al., 1997). Os resultados de dois testes estatísticos não-paramétricos mostraram que a tendência observada começou a ser significativa no fim da década de sessenta e início da de setenta. Sansigolo et al. (1992) avaliaram as tendências na temperatura do ar em várias

das principais cidades brasileiras, e identificaram tendências positivas significativas em 95% em Salvador, Rio de Janeiro, São Paulo e Curitiba. De fato, com base em dados climáticos fornecidos pelo INMET, observou-se que as temperaturas médias máxima e mínima durante o período 1961-90 foram relativamente mais elevadas (em alguns casos +0,6°C) que as do período 1931-60, nas cidades do Sul e do Sudeste. A Figura 7a-d mostra as tendências das temperaturas médias do inverno (junho-agosto) em cidades do sul e do sudeste do Brasil, próximas das áreas de cultivo de café mostradas na Figura 6. Desde o início do século, foram observadas tendências de elevação em São Paulo, Rio de Janeiro, Londrina e Curitiba, enquanto Porto Alegre e Santa Vitória de Palmar mostraram tendências negativas no período 1961-1998. Efeitos da urbanização e mudanças na localização das estações ou nos métodos utilizados para obter a temperatura média diária podem ter induzido uma elevação artificial, que pode causar dúvidas a respeito da validade das tendências de elevação mostradas na Figura 7a-c. A esse respeito, Karl (1998) mostra tendências positivas de temperatura nas principais cidades do Brasil entre as latitudes 20 e 40°S, algumas delas atingindo +2°C/100 anos. Os estudos de Venegas et al. (1996, 1998) mostraram que tendências positivas na temperatura da superfície do mar e na pressão ao nível do mar no Atlântico Sul podem ser indicativas de um aquecimento sistemático nessa região, consistente com o aquecimento detectado no sul do Brasil, como mostrado na Figura 7a-c.

### **Efeitos Potenciais da Alteração de Clima sobre a Agricultura do Sul e Sudeste do Brasil**

Os impactos potenciais de um aumento nas concentrações atmosféricas do CO<sub>2</sub> nessa região ainda são incertos. Prevê-se que a mudança do clima prejudique a agricultura em algumas áreas, mas a ajude em outras. O IPCC (1998) indica que estudos baseados em projeções de modelos de clima global e de culturas agrícolas, feitos no Brasil, Chile, Argentina e Uruguai, apontam para decréscimos nas produções de diversas culturas (cevada, uva, milho, batata, soja, trigo) – mesmo levando em consideração os efeitos diretos da fertilização por CO<sub>2</sub> e a implementação de medidas de adaptação moderadas ao nível da plantação. No modelo agrícola de Rosenzweig et al. (1993), os impactos da mudança de clima no Brasil estão entre os mais severos de todas as regiões. Em um cenário de 2 x CO<sub>2</sub>, projeta-se que a produção diminua em 17%-53%,

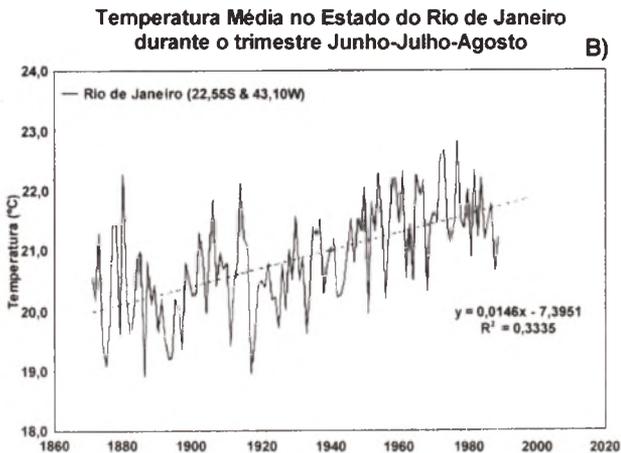
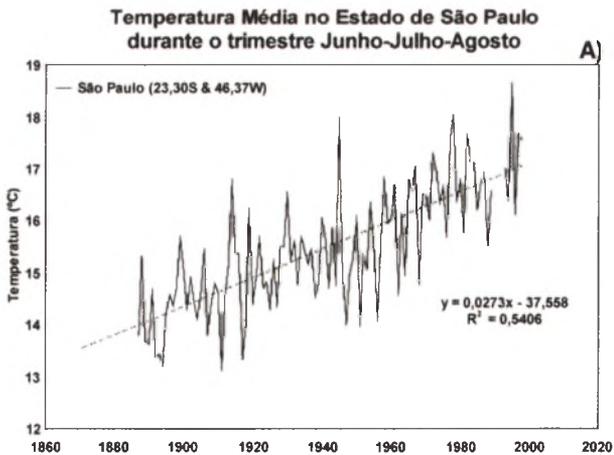
variando conforme se considere ou não os efeitos diretos do CO<sub>2</sub>. São projetadas reduções semelhantes para o Uruguai e o México. Alterações na produção e nas práticas agrícolas devidas ao aquecimento global gerarão também problemas de mercado e altos custos de produção.

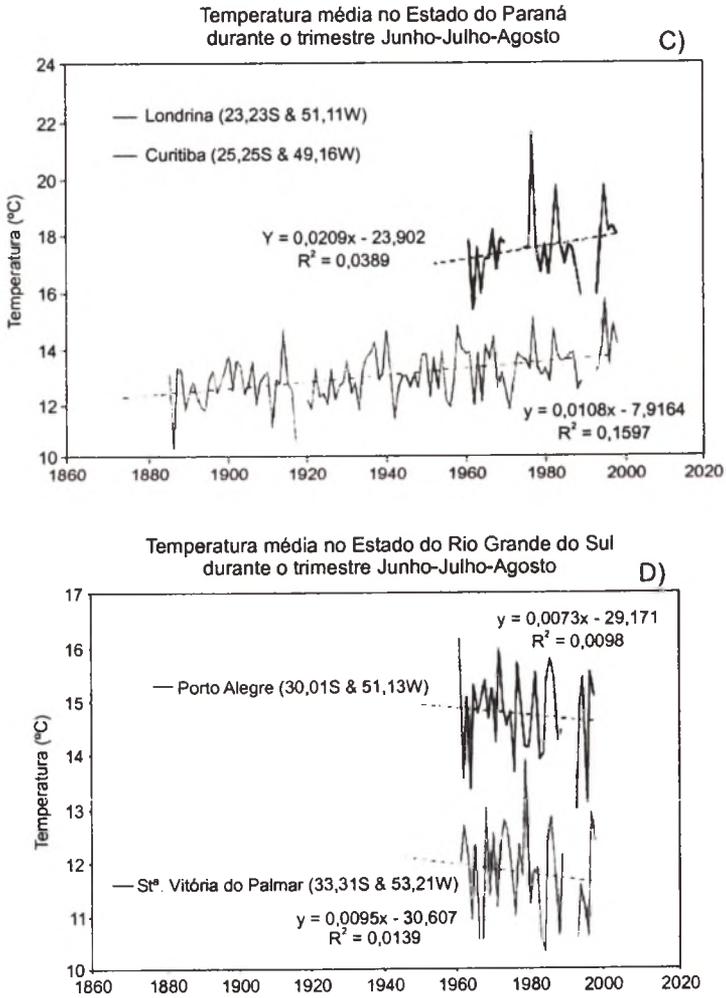
Foram realizados por Baethgen (1997) alguns estudos sobre a vulnerabilidade e a adaptação à mudança de clima na América Latina. Os resultados das simulações de circulação geral (Burgos & Molion, 1991) indicam que, para diversas localidades na América Latina, como a costa de Chile e o litoral do Brasil, as predições de modelo de clima incluem aumentos de temperatura de 3,0°C a 4,5°C, e alterações nas chuvas, variando de -10% a +30%. Além disso, os modelos predizem, com grande incerteza, uma diminuição na umidade do solo. Alguns estudos prevêem ainda uma diminuição global na produção de grãos como consequência do aquecimento global (IPCC, 1998). Assim sendo, é provável que a distribuição de vegetação se desloque em resposta ao aquecimento global, levando a um aumento das zonas áridas e semi-áridas (Sanhueza, 1993). Uma alteração nas condições climáticas pode afetar significativamente as plantações porque o aumento de temperatura levaria a estações de crescimento mais curtas, menor produção de biomassa e menores produções. As temperaturas globais observadas podem aumentar em até 4°C, sendo mais provável um valor entre 2°C - 3°C; de fato, elas podem ter aumentado em 0,5°C desde o início do século 20, e de forma particularmente forte nos últimos 30 anos. Por outro lado, a importância do aumento de CO<sub>2</sub> para as plantas, e portanto para a biosfera, é substancial.

O café é cultivado em regiões com temperaturas médias entre 15,6°C e 25,6°C, e chuvas entre 1.270 mm e 2.290 mm, e como muitas outras culturas, ele se adapta a uma gama de condições climáticas. Entretanto, nos limites de sua tolerância ambiental, as plantações tornam-se muito sensíveis às condições climáticas e portanto, potencialmente, à mudança do clima. O café é uma planta tropical C<sub>3</sub> (Lawlor, 1997), sem tolerância a baixas temperaturas. Portanto, um cenário de aquecimento global, com redução na frequência ou intensidade das geadas na região Sudeste do Brasil e Paraguai, permitiria um crescimento na área cultivada dedicada a café, ou um rodízio dos tipos de café cultivados em diferentes áreas. Por outro lado, a variedade café arábica cultivada no Brasil não resiste a altas temperaturas durante a florada, sendo que temperaturas acima de 34°C afetam as flores (Paulo Caramori, IAPAR-PR, comunicação pessoal). Uma forma adicional de fotossíntese, chamada C<sub>4</sub>, é vantajosa em um mundo potencialmente mais quente. Milho, cana-de-açúcar e sorgo, culturas

de climas muito ensolarados e quentes, com enorme potencial de produção de biomassa e grande produtividade, são plantas  $C_4$ , enquanto trigo, soja, cevada, aveia e arroz são plantas  $C_3$ .

Segundo o IPCC (1996), experiências de laboratório sugerem que a duplicação em concentrações de  $CO_2$  de 330 para 660 ppm poderia aumentar em 34% a produção das culturas  $C_3$ , e em 14% a das  $C_4$ . Entretanto, as condições de campo podem não alcançar necessariamente os mesmos aumentos de produtividade. Embora a agricultura seja uma área relativamente bem estudada nas pesquisas de impacto da mudança do clima, os resultados disponíveis ainda são muito diversos e frequentemente contraditórios, e os modelos agrícolas são altamente sensíveis a um bom número de suposições importantes.





**Figura 7** - Temperaturas invernais médias (junho-agosto) no sul e sudeste do Brasil, próximo às áreas de cultivo de café mostradas na Figura 6. Fonte de dados: INMET. (a) São Paulo, (b) Rio de Janeiro, (c) Londrina e Curitiba, (d) Porto Alegre e Santa Vitória do Palmar

### Conclusões

As ondas de frio de inverno podem produzir condições de geada que afetam e destróem as culturas nas áreas de plantio do sul e do sudeste brasileiro. O café está entre essas culturas que podem sofrer em decorrência das geadas, e como o Brasil é o principal produtor e exportador de café do mundo, os

efeitos do clima prejudicial podem traduzir-se em prejuízos de milhões de dólares para a economia regional e nacional. Os casos mais bem documentados são a geada de julho de 1975 e as de junho e julho de 1994, as quais, juntamente com a seca, como a de junho de 1981, reduziram significativamente os volumes de produção em mais de 50% e aumentaram os preços internacionais do café em mais de 40%. Os impactos dessas geadas vêm sendo identificados desde o fim do século 19, por estatísticas de produção de café nas áreas de cultivo do sul do Brasil, onde quedas súbitas de produção são relacionadas à ocorrência de geadas intensas ou muito intensas nas áreas de cultivo.

Na variabilidade de clima a longo prazo na região, observou-se que o número de ondas de frio diminuiu no correr do tempo, mas isso não significa que a qualquer tempo uma onda fria forte não possa afetar a região, independentemente de ter havido poucas ondas frias. As temperaturas de inverno na região exibem uma tendência de elevação, consistente com os invernos mais amenos, com menos frentes frias observadas. No passado, a produção e os preços do café eram mais dependentes do clima, enquanto agora são afetados também pelo mercado e por decisões políticas. Não é claro qual seria a situação da cafeicultura no sul e sudeste do Brasil em um cenário de aquecimento global. Se, de fato, as temperaturas inverniais estão subindo sistematicamente, o que pode ser observado também em uma tendência para menor quantidade de frentes frias, uma geada pode atingir a região a qualquer tempo. Os recordes de temperatura não são longos ou homogêneos o suficiente para identificar um aquecimento regional sistemático nessas regiões, e algumas das tendências de elevação na temperatura do ar podem ser devidas aos efeitos da urbanização, à mudanças de localização das estações medidoras e aos métodos de observação e processamento dos dados. Entretanto, pode haver uma ligação com um aquecimento sistemático observado no Oceano Atlântico Sul, que pode sustentar algumas das tendências de elevação.

Em um ambiente resultante de aquecimento global, não ficam claros os impactos desse aquecimento sobre a produção de café. Assim mesmo, uma redução na frequência ou na intensidade das geadas na região Sudeste do Brasil e Paraguai permitiria um aumento das áreas de cultivo dedicadas ao café, ou uma mudança dos tipos de café cultivados em diferentes áreas. Entretanto, os impactos de um clima relativamente mais quente não foram bem estudados para o café. Os extremos causam perda de produção, com inevitáveis dificuldades sociais e econômicas (i.e. disponibilidade diminuída e custos

aumentados do alimento). As conseqüências do aquecimento global e de eventos climáticos extremos de vários tipos para o cultivo devem ser uma preocupação importante, de forma a assegurar a continuidade do fornecimento de alimento. Mas, ao lado dos efeitos relativos ao clima, a tecnologia agrícola, a economia e a política continuarão a ter profundos efeitos sobre a agricultura em quase todas as sociedades, e as respostas às mudanças do ambiente serão incluídas na adaptação geral do cultivo.

## Agradecimentos

O autor agradece o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Agradece também a Vernon E. Kousky do NOAA/Climate Prediction Center, pelo fornecimento das Figuras 3-5, e a Paulo Caramori do IAPAR-Paraná, por seus valiosos comentários a respeito desse projeto.

## Referências Bibliográficas

- BAETHGEN, W.E. Vulnerability of the agricultural sector of Latin American to climate change. *Climate Research*, v. 9, p. 1-7, 1997.
- BURGOS, J.J.; MOLION, L.C.B. Climate change predictions for South America. *Climate Change*, v. 18, p. 223-239, 1991.
- CAVALCANTI, I.; KOUSKY, V.E. Interannual variability of cold air outbreaks over southern and southeastern Brazil from 1979 to 1997 and sensitivity of the CPTEC/ COLA GCM in predicting extreme cases. In: Extended abstracts of the 10th Conference on Global Change Studies, 1999, Dallas, Texas, AMS, 1999. p. 438-441.
- FORTUNE, M.; KOUSKY, V.E. Two severe freezes in Brazil: precursors and synoptic evolution. *Monthly Weather Review*, v. 111, p. 181-196, 1983.
- GARREAUD, R. Cold air incursions over subtropical and tropical South America: A numerical study, *Monthly Weather Review*, v. 127, p. 2823-2853, 1998.
- GARREAUD, R.; WALLACE, J. M. Summertime incursions of Mid-Latitude air into subtropical and tropical South America. *Monthly Weather Review*, v. 126, p. 2713-2733.

HADDOCK, D. MOTTA; MCINTURFF, R.; HALPERT, M.; SMELSER, R. Freeze hits Brazilian coffee area on July 20 and 21, 1981. *Weekly Weather and Crop Bulletin*, v. 68, n. 30, p. 25-27, 1981.

IPCC. The social costs of climate change: greenhouse damage and the benefits of control. In: BRUCE, J.; LEE, H.; HAITES, E. (ed.), *Climate change: economic and social dimensions of climate change*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. Chapter 6, p. 183-219.

IPCC. Latin America. In: WATSON, R.; ZINYOWERA, M.; MOSS, R.; DOKKEN, D. (ed.), *The regional impacts of climate change: an assessment of vulnerability - special Report of IPCC Working group II*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. Chapter 6, p. 190-230.

KARL, T. Regional trends and variations in temperature and precipitation. Latin America, Annex A In: WATSON, R.; ZINYOWERA, M.; MOSS, R.; DOKKEN, D. (ed.), *The regional impacts of climate change: an assessment of vulnerability - A Special Report of IPCC Working group II*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. p. 413-437.

LAWLOR, D. Agriculture and fisheries. In: THOMPSON, R.; PERRY, A. (ed.), *Applied climatology, principles and practice*. London: Routledge, 1997. Part 3, p. 215-228.

LEMOIS, F.; CALBETE, N.O. Sistemas frontais que atuam no litoral do Brasil (período 1987-1995). *Climanálise*, número especial, p. 131-135, 1996.

MARENGO, J.; ROGERS, J. Cold front and polar air outbreaks in the Americas during modern and past climates: Assessments and Impacts. In: MARGRAF, V. (ed.), *Present and past inter-hemispheric climate linkages in the Americas and their societal effects*. New York: Academic Press, 2000. p. 31-51.

MARENGO, J.; CORNEJO, A.; SATYAMURTY, P.; NOBRE, C. A.; SEA, W. Cold waves in the South American continent. The strong event of June 1994. *Monthly Weather Review*, v. 125, p. 2759-2786, 1997a.

MARENGO, J.; NOBRE, C.; CULF, A. Climatic impacts of friagens in forested and deforested areas of the Amazon Basin. *Journal of Applied Meteorology*, v. 36, p. 1553-1566. 1997b.

MARSHALL, C. F. *The world coffee trade*. Cambridge: Woodhead-Faulkner, 1983. 254 p.

ROSENZWEIG, C.; PARRY, M.; FISHER, G.; FROHBERG, K. *Climate change and world supply*. Oxford: Oxford University, Environmental Change Unit, 1993. 28 p. (Research Report, 3).

SANHUEZA, E. Terrestrial biogeochemical feedbacks in global warming: some predictions for South America. In: MOONEY, H.; FUENTES, E.; KRONBERG, B. (ed.), *Earth system responses to global change: contrasts between North and South America*. London: Academic Press, 1993. Chapter 10, p. 131-141.

SANSIGOLO, C.; RODRIGUES, R.; ETCHICHURY, P. Tendências nas temperaturas médias do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 7., São Paulo, 1992. *Anais...* p. 367-371.

SATYAMURTY, P.; ETCHICHURY, P.; STUDZINSKY, C.; CALBETE, N.; LOPES, R.; GLAMMELSBACHER, I.A.; GLAMMELSBACHER, E.A. A primera friagem do 1990: Uma descrição sinótica. *Climanálise*, v. 5, n. 5, p. 43-51, 1990.

SELUCHI, M.; MARENGO, J. Tropical-mid latitude exchange of air masses during summer and winter in South America: climatic aspects and extreme events. *International Journal of Climatology*, v. 20, p. 1167-1190.

TARIFA, J.; PINTO, H.; AFFONSI, R.; PEDRO, M. A gênese dos episódios meteorológicos de julho de 1975 e a variação espacial de danos causados pelas geadas na cafeicultura no Estado de São Paulo. *Ciência e Cultura*, v. 29, p. 1362-1374, 1977.

USDA. World Agriculture Weather Summary. *Weekly Weather and Crop Bulletin*, v. 62, n. 29, p. 134-137, 1975.

VENEGAS, S.; MYSAK, L.; STRAUB, D. Evidence for interannual and interdecadal climate variability in the South Atlantic. *Geophysical Research Letters*, v. 23, p. 2673-2676, 1996.

VENEGAS, S.; MYSAK, L.; STRAUB, D. An interdecadal climate cycle in the South Atlantic and its links to other ocean basins. *Journal of Geophysical Research*, v. 103, p. 24723-24736, 1998.

VICTORIA, R.; MARTINELLI, L.; MORAES, J.; BALLESTER, M.; KRUSCHE, A.; PELLEGRINO, G.; ALMEIDA, R.; RICHEY, J. Surface air temperature variations in the Amazon region and its border during this century. *Journal of Climate*, v. 11, p. 1105-1110, 1997.



## 5 Mudanças Climáticas na Amazônia: Estudo de Caso de Substituição de Floresta Tropical por Pastagens

GILBERTO FISCH

Centro Técnico Aeroespacial – CTA/AE-ACA,  
São José dos Campos, SP, Brasil

*Resumo.* A substituição da cobertura vegetal de floresta por pastagens modifica as interações entre o sistema solo-planta-atmosfera, com a conseqüente alteração no microclima local. Segundo dados recentes do INPE (1998), cerca de 532.086 ha já foram desmatados. Simulações numéricas utilizando Modelos de Circulação Geral da Atmosfera foram realizadas e os resultados concluem que, assumindo um desmate completo e imediato da Amazônia, ocorrerá um aumento da temperatura do ar próximo à superfície (variando de 0,6°C a 2,0°C), uma redução no total de precipitação e evaporação (de 20% a 30% do valor de floresta) e uma estação seca mais prolongada. Para o caso de Rondônia, o período da estiagem prolongar-se-ia para os meses de maio a agosto no cenário de pastagem, em comparação com os meses de junho e julho no caso de floresta. Dados observacionais sobre a distribuição de chuva em Rondônia mostraram que o total de chuva que ocorre na área de floresta tropical é 28% superior ao que ocorre na pastagem e que também chuvas maiores que 1 mm.h<sup>-1</sup> ocorrem com mais freqüência à tarde na floresta que na área de pastagem. Neste trabalho serão abordados os resultados observacionais e de modelagem realizados no âmbito do Projeto ABRACOS (Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observations Study), que objetivou entender como o desmatamento modifica o microclima local.

### Climatic Changes in the Amazon Region: a Case Study of Replacement of Tropical Forest with Pastures

*Abstract.* The replacement of forest vegetation with pastures modifies the interactions within the soil-plant-atmosphere system and results in changes in the local microclimate. According to recent INPE data

*(1998), approximately 532,086 hectares have already been deforested. The results of numeric simulations using Models of General Circulation of Atmosphere show the three main impacts of a complete and immediate deforestation of the Amazon region. Firstly, the air temperature near the soil surface would increase (ranging from 0.6 to 2.0°C). Secondly, there would be a decrease in total rainfall and evaporation (20 to 30% of forest values). Lastly, the drought season would be prolonged. In the case of the State of Rondônia, the drought period would increase from the current June-July in the forest, to May-August in the newly developed pastures. Rainfall distribution data from observation studies in Rondônia show that total rainfall in the tropical forest area is 28% higher than in the pasture area. In addition, rainfall in excess of 1mm/h occurs more often during the afternoon in the forest area than in the pasture area. The paper discusses the results of observational and modelling studies carried out within the scope of the ABRACOS (Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observations Study) Project, whose objective was to understand how deforestation modifies local microclimates.*

## **Introdução**

Atualmente tem-se discutido muito sobre as possíveis modificações climáticas no globo terrestre, em decorrência da ação antrópica na exploração de recursos naturais e ocupação humana. Na Amazônia, tal exploração tem sido realizada, em larga escala, pelo desflorestamento de floresta tropical densa para a extração de madeira ou substituição por áreas extensas de pastagens.

Com relação à associação floresta-clima, o crescimento meteórico da informática facilitou o desenvolvimento e a utilização de Modelos Numéricos de Circulação Geral da Atmosfera, a fim de se estudar o efeito dos processos de troca de energia e vapor d'água entre a superfície e a atmosfera. Analisando a problemática do desmatamento, vários estudos de simulação numérica do clima em situações de floresta e desmatamento (troca de superfícies vegetadas de floresta tropical por áreas de pastagens) já foram realizados, entre os quais pode-se citar os trabalhos de Nobre et al. (1991); Lean et al. (1996); Manzi & Planton (1996) e Hahmann & Dickinson (1997). De modo geral, os resultados obtidos convergem em que ocorrerá um aumento da temperatura do ar próximo à superfície (variando de 0,6°C a 2,0°C), uma redução nos totais de precipitação

e evaporação (de 20% a 30% do valor de floresta) e uma estação seca mais prolongada. Essas modificações climáticas, se confirmadas pela realidade, certamente acarretarão implicações ecológicas importantes. Recentemente, Paiva & Clarke (1995) realizaram um estudo observacional estatístico sobre a tendência temporal da distribuição de chuvas na Amazônia e notaram que há uma tendência de anomalias negativas (redução da precipitação) se concentrarem em áreas a oeste na Amazônia, onde, principalmente no Estado de Rondônia, ocorre uma alta taxa de desmatamento.

Imagens de satélites de recursos naturais LANDSAT analisadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), através do Projeto PRODES (Projeto de Estimativa de Desflorestamento Bruto da Amazônia), estimam em aproximadamente 532.086 km<sup>2</sup> de área de floresta tropical na Amazônia Legal já desmatada até 1997. As regiões que mais sofreram com o desmatamento são as partes sul e leste do Pará (após a construção da rodovia Belém-Brasília) na década de 60 e as partes norte do Mato Grosso e sul de Rondônia (devido à rodovia Cuiabá-Porto Velho) no final dos anos 70 e início dos anos 80. Especificamente no Estado de Rondônia, a ação humana aumentou a área desmatada de 4.200 km<sup>2</sup> em 1978 para 50.529 km<sup>2</sup> em 1997 e apresenta uma das taxas mais altas de porcentagem de desmatamento por ano (1,18 %) entre os estados que compõem a Amazônia Legal (o outro estado é o Mato Grosso com 1,25% de desflorestamento/ano<sup>-1</sup>). Ao se retirar a vegetação natural de florestas, uma grande parte dessas tornou-se extensas áreas de pecuária.

Neste trabalho serão abordados alguns aspectos observacionais de variações dos elementos microclimáticos que ocorrem no processo de desmatamento e também resultados obtidos por simulação numérica dos efeitos do desmatamento no clima devido à substituição de bioma de floresta tropical por pastagens. Esses resultados foram extraídos e compilados de uma série de trabalhos técnico-científicos realizados em micrometeorologia de floresta resultantes do Projeto ABRACOS (Gash & Nobre, 1997) e também do trabalho de Fisch et al. (1998) sobre a descrição do clima da Amazônia.

## Modificações Microclimáticas

A seguir, serão discutidas algumas das modificações microclimáticas mais significativas, que decorrem da troca de vegetação.

### *Fluxos de Radiação Solar e Saldo de Radiação e Albedo<sup>1</sup>*

Alves et al. (1999) calcularam o valor médio de alguns elementos climáticos (fluxos de radiação solar e saldo de radiação, temperatura do ar, evapotranspiração, entre outros) para os sítios experimentais do Projeto ABRACOS, em Ji-Paraná (RO), durante o período de janeiro de 1992 até outubro de 1993. Segundo esses autores, a quantidade anual de energia solar que atinge as superfícies de floresta e pastagem são aproximadamente iguais (uma pequena diferença de 3% em favor da floresta), embora exista uma variação significativa na estação seca (ocorre uma redução de 7% na pastagem), devido à grande quantidade de aerossóis liberados para a atmosfera por queimadas.

Usando um período de dados mais longos (1992 à 1996), Feitosa et al. (1998) obtiveram que a transmissividade atmosférica<sup>2</sup> reduz-se de um valor típico de 0,66 para o caso floresta para um valor de 0,58 no cenário pastagem. Essa redução da transmissividade atmosférica pode resultar em uma diminuição de 200 W.m<sup>-2</sup> no fluxo de radiação solar que atinge a superfície. Na época chuvosa a transmissividade atmosférica é similar entre os sítios.

Para o saldo de radiação, que é a energia disponível para os processos de evapotranspiração, a diferença é ainda maior: o saldo de radiação médio anual é de 11,5 MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> para a floresta, e de 9,8 MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> para a pastagem, o que representa uma redução de 14,8 % entre os valores observados sobre as áreas de floresta e pastagem. Essa diferença é maior na época seca, atingindo 19,1%, pois o albedo, a temperatura da superfície e também a contribuição de radiação de ondas longas provenientes da atmosfera são diferentes (Culf et al., 1996). Em termos da refletividade da superfície, Culf et

<sup>1</sup> Albedo: é a fração de energia incidente que é refletida para o espaço e não participa do balanço de energia.

<sup>2</sup> Transmissividade atmosférica: é a fração de energia incidente que atinge a superfície, após interação com a atmosfera.

al. (1995) mostraram que o albedo em floresta tropical possui uma pequena variação sazonal, associada às condições de umidade do solo, variando o albedo de 0,121 (pico da estação chuvosa) para um valor de 0,144 (estação seca). A média anual é de 0,134. Na Tabela 1 são apresentados dados representativos dos fluxos de radiação solar e saldo de radiação para áreas de floresta e pastagem na Amazônia.

**Tabela 1** - Valores médios de fluxos de radiação solar e saldo de radiação para os sítios de floresta e pastagem em Ji-Paraná (RO). Unidades em MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>

		Ano	Período Chuvoso	Período Seco
Radiação Solar	Floresta	17,4	16,3	18,4
	Pastagem	16,8	16,3	17,1
Saldo de Radiação	Floresta	11,5	11,5	11,5
	Pastagem	9,8	10,3	9,3

**Fonte:** Adaptado de Alves et al. (1999)

### *Fluxos Turbulentos de Superfície*

É através dos fluxos turbulentos de calor sensível e latente que a energia disponível na superfície retorna para a atmosfera, sendo que o fluxo de calor sensível (H) é o responsável pelo aquecimento da atmosfera da camada limite e o fluxo de calor latente (LE) ou evapotranspiração induz à concentração de vapor d'água na atmosfera. As intensidades desses fluxos estão fortemente associadas com o tipo de vegetação, e a troca de bioma pelo desmatamento causa mudanças bruscas desses fluxos.

Galvão & Fisch (2000) estudaram o comportamento desses dois fluxos durante a transição entre as épocas chuvosa e seca em Ji-Paraná (RO), nos sítios experimentais do Projeto ABRACOS. Esses autores concluíram que o sítio experimental de floresta praticamente não mostra uma variação sazonal, com uma razão de Bowen (definido como a razão entre H e LE) de 0,21 e 0,30 para as épocas chuvosa e seca, respectivamente. Entretanto, isso já não ocorre na pastagem, onde há uma variação brusca devido à estiagem local. Nesse caso, a razão de Bowen aumenta de 0,32 durante a estação chuvosa para 0,76 no auge da época seca. Isso é um indicador de que as florestas conseguem

captar água durante o ano inteiro, mas o mesmo não ocorre na pastagem (veja item 2.4). Tais dados confirmam os estudos de Wright et al. (1992) para uma área de pastagem em Manaus (AM), no qual a razão de Bowen variou de 0,43 para 0,67, durante a estação seca na região. Na Tabela 2 são apresentados os valores médios dos fluxos turbulentos de calor sensível e latente para um período representativo das estações chuvosa (abril/93) e seca (julho/93) na região Amazônica.

**Tabela 2** - Valores médios de fluxos turbulentos de calor sensível (H) e latente (LE) para os sítios de floresta e pastagem em Ji-Paraná (RO). Unidades em MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>

		Período Chuvoso	Período Seco
Fluxo de calor Sensível	Floresta	2,0	2,5
	Pastagem	2,3	5,1
Fluxo de calor Latente	Floresta	9,3	8,4
	Pastagem	7,2	6,7

**Fonte:** Adaptado de Galvão & Fisch, 2000

### *Temperatura do Ar*

A temperatura do ar é um elemento climático que possui pequena variação sazonal na Amazônia, pois esta região situa-se próximo ao Equador e sofre pouca variação da quantidade de energia incidente em função da posição relativa Sol-Terra. Entretanto, a temperatura do ar é uma variável que depende fortemente do tipo de superfície, pois é o resultado de como ocorre a partição de energia. Os valores de temperatura média do ar na floresta são maiores, pois sua amplitude térmica é menor.

A biomassa vegetal é um componente regularizador do ciclo diário da temperatura do ar. Bastable et al. (1993) analisaram esta variável climática para as áreas de floresta e pastagem na Amazônia Central (Manaus, AM) e observaram que a amplitude térmica na pastagem é quase o dobro daquela obtida em áreas de floresta, com valores extremos de 21,8°C e 31,4°C para a pastagem e de 23,9°C e 29,6°C para a floresta. Esse contraste é certamente maior na época seca do que na chuvosa. Galvão & Fisch (2000) encontraram amplitudes térmicas de 15,8°C e 13,5°C para pastagem e floresta, respectivamente, em Ji-Paraná (RO) na época seca, decaindo para 8,1°C e

7,0°C durante o período das chuvas. Um dos motivos da diferença entre os resultados de Bastable et al. (1993) e os de Galvão & Fisch (2000) deve-se ao tamanho das áreas de pastagem: a área de Manaus talvez não fosse suficientemente extensa para que o microclima sobre pastagem se desenvolvesse totalmente. Isto não ocorreu em Ji-Paraná (RO), pois a área de pastagem era extensa para o desenvolvimento de uma altura de equilíbrio local. Alves et al. (1999) obtiveram valores médios anuais de temperatura do ar de 24,6°C e 24,1°C para floresta e pastagem em Ji-Paraná (RO), respectivamente. Em termos de variação sazonal, a temperatura do ar nos sítios de floresta e de pastagem é de, respectivamente, 24,5°C e 24,3°C no período chuvoso, decaindo para 23,9°C e 23,0°C na época seca. É importante lembrar que os menores valores da temperatura média do ar durante o período seco estão associados com a menor incidência de energia solar, pois Ji-Paraná (RO) está situado em 12°S. Galvão & Fisch (2000) estudaram a penetração de frentes frias na região de Rondônia e obtiveram que, durante os anos de 1993-1994, ocorreram 6-7 casos de eventos de “friagens”. Entretanto, devido a sua escala sinótica (aproximadamente 1.000 km), este fenômeno ocorre por igual nos dois sítios, não caracterizando uma modificação microclimática. Na Tabela 3 são apresentados valores médios mensais de temperatura em sítios de floresta e pastagem em Ji-Paraná (RO).

**Tabela 3** - Valores médios de temperatura do ar para os sítios de floresta e pastagem em Ji-Paraná (RO). Unidades em °C

	Ano	Período Chuvoso	Período Seco
Floresta	24,6	24,5	23,9
Pastagem	24,1	24,3	23,0

Fonte: Adaptado de Alves et al. (1999)

### *Ciclo hidrológico: Precipitação, Evapotranspiração e Armazenamento de Água no Solo*

Estudando o ciclo hidrológico e suas alterações devido ao desmatamento, Ferreira da Costa et al. (1998) analisaram as precipitações ocorridas em áreas de floresta tropical e em áreas desmatadas do Projeto ABRACOS em Ji-Paraná (RO), no período de 1992-1995. O período de maior frequência de ocorrência de chuva foi à tarde, em ambos os sítios, indicando

que o mecanismo produtor principal da precipitação seja o de convecção local. Há indícios de que esta convecção seja mais acentuada na área de pastagem em relação à de floresta, uma vez que o fluxo de calor sensível na pastagem é maior do que na floresta, mesmo na época chuvosa. Isto ocasionaria chuvas no início da tarde na pastagem, comparada aos que ocorrem no final da tarde na floresta. Comparando-se o total de chuva ocorrido nas duas áreas experimentais, o volume de água precipitado na floresta foi cerca de 28% superior ao da pastagem.

Outros componentes importantes do ciclo hidrológico são a evapotranspiração e o armazenamento de água no solo. Em relação à evapotranspiração, Alves et al. (1999) calcularam a evapotranspiração horária (através da equação de Penman-Monteith) em áreas de floresta e de pastagem no sítios experimentais do ABRACOS em Ji-Paraná (RO) e integraram mensalmente os valores obtidos de evapotranspiração para analisar o ciclo sazonal. A evapotranspiração na floresta foi, em média,  $1,0 \text{ mm.dia}^{-1}$  maior que a da pastagem, durante o período de janeiro de 1992 até outubro de 1993. O maior valor da evapotranspiração na floresta foi influenciado pela maior energia disponível para os processos evaporativos e também pela maior capacidade de extrair água em camadas mais profundas (Nepstad et al., 1994). A redução na evapotranspiração devido ao desmatamento foi calculada em 24%. Para a água armazenada no solo, os autores observaram valores similares entre os sítios de floresta e de pastagem na época chuvosa (ao redor de 700 - 720 mm de água na camada até 2,0 m de profundidade), sendo que, durante a estação seca, a pastagem apresenta valores maiores de água no solo, pois as plantas não conseguem extrair a água como no caso de floresta. O potencial matricial à que esta água está submetida também é maior na pastagem, indicando um esforço maior das gramíneas em usar a água para a evapotranspiração. Na Tabela 4 são apresentados os valores médios mensais de evapotranspiração e típicos das épocas chuvosa e seca na região.

**Tabela 4** - Evapotranspiração média mensal calculada pela fórmula de Penman-Monteith. Unidades em  $\text{mm.dia}^{-1}$

	Média anual	Período chuvoso	Período seco
Floresta	4,1	4,5	3,6
Pastagem	3,1	3,4	2,7

Fonte: Adaptado de Alves et al. (1999)

### *Tendências Climáticas*

Victoria et al. (1998) analisaram a tendência de aquecimento/resfriamento da atmosfera na região Amazônica, utilizando-se de seis estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET com séries temporais longas (superiores a 50 anos), e concluíram que as anomalias de temperatura anuais mostram um aumento de  $+0,56^{\circ}\text{C século}^{-1}$ . Este aquecimento pode estar associado com a variabilidade climática natural, aumento da influência do efeito estufa e de mudanças de uso da terra devido ao desmatamento. Embora o sinal de aquecimento tenha se tornado mais claro no final da década de 60 e início dos anos 70, coincidindo com a migração humana para a Amazônia e conseqüentemente do desmatamento, os autores enfatizam que uma relação conclusiva entre desmatamento e aquecimento é difícil de ser comprovada com o conjunto de dados disponíveis (temperaturas médias diárias).

Com relação ao regime hidrológico (precipitação e vazões de rios da Amazônia), não existe um consenso do que está ocorrendo. Para a parte da Amazônia no Peru e Equador, Gentry & Lopes-Parodi (1980) apresentaram a hipótese, suportada por Rocha et al. (1989), de que um incremento das descargas dos rios durante as décadas de 1960 a 1980 era devido ao desmatamento. Entretanto, uma análise de tendências para vazões de outros rios da Amazônia, tais como os rios Jamari (RO), Ji-Paraná (RO) e Tocantins (TO e PA) não indicou tendências climáticas. Em todos eles foi observado um aumento dos níveis durante os anos de 1970-1980, sendo, porém, que este aumento parece ser parte da variabilidade natural do clima e não um indicador de mudanças climáticas. Marengo et al. (1998) sugerem que essa variabilidade interanual de chuva e de vazão de rio possam estar mais associada com teleconexões de eventos ENSO<sup>1</sup> do que uma resposta de modificação climática a desmatamentos.

### *Simulações Climáticas*

Conforme mencionado na Introdução, o uso da informática nas simulações climáticas utilizando-se Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (MCGA) tornou-se uma ferramenta freqüente para estudos do efeito do desmatamento em escala global. Recentemente, Hahmann & Dickinson (1997) publicaram uma Tabela resumindo os vários modelos/resultados obtidos por

<sup>1</sup> ENSO: sigla do fenômeno El Niño - Oscilação Sul.

diferentes autores (veja Tabela 5). Nesta Tabela são apresentados os vários valores de albedo e de rugosidade aerodinâmica, que são considerados como dois dos mais importantes agentes de controle das trocas gasosas entre a vegetação e a atmosfera. No caso do albedo, a mudança de superfície provoca um aumento da refletividade de um valor tipicamente entre 0,12 e 0,14 em floresta tropical para valores característicos de pastagem compreendidos na faixa entre 0,18 e 0,22.

**Tabela 5** - Resposta do clima para diferentes simulações climáticas

Autor/Estudo	albedo	Rugosidade (m)	$\Delta T$ (°C)	$\Delta P$ (mm)	$\Delta E$ (mm)
Dickinson & Henderson-Sellers (1988)	0,12/0,19	2,00/0,05	+3,0	0	-200
Lean & Warrilow (1989)	0,136/0,188	0,79/0,04	+2,4	-490	-310
Nobre et al. (1991)	0,13/0,20	2,65/0,08	+2,5	-643	-496
Dickinson & Kennedy (1992)	0,12/0,19	2,00/0,05	+0,6	-511	-256
Mylne & Rowtree (1991)	0,135/0,200	—	-0,1	-335	-176
Henderson-Sellers et al. (1993)	0,12/0,19	2,0/0,2	+0,6	-588	-232
Lean & Rowtree (1993)	0,136/0,188	0,79/0,04	+2,1	-296	-201
Pitman et al. (1993)	0,12/0,19	2,00/0,05	+0,7	-603	-207
Polcher & Laval (1994a)	0,098/0,177	2,30/0,06	+3,8	+394	-985
Polcher & Laval (1994a)	0,135/0,216	2,30/0,06	-0,1	-186	-128
Sud et al. (1996)	0,092/0,142	2,65/0,08	+2,0	-540	-445
McGuffie et al. (1995)	0,12/0,19	2,0/0,2	+3,0	-437	-231
Lean et al. (1996)	0,13/0,18	2,10/0,03	+2,3	-157	-296
Manzi & Planton (1996)	0,13/0,20	2,00/0,06	-0,5	-146	-113
Hahmann & Dickinson (1997)	0,12/0,19	2,00/0,05	+1,0	-363	-149

$\Delta T$ = variação da temperatura do ar;  $\Delta P$ = variação da precipitação;  $\Delta E$ = variação da evapotranspiração. Todas estas variações são aplicadas aos cenários floresta pastagem.

Fonte: Adaptado de Hahmann & Dickinson, 1997

Para a rugosidade aerodinâmica, que possui uma forte associação com a transferência vertical de *momentum*, energia e vapor d'água e também de concentração de CO<sub>2</sub>, a substituição de vegetação reduz o comprimento de rugosidade, de um valor típico entre 2,0-2,6 m para valores muito pequenos (em torno de 0,05 m). Embora os valores de entrada característicos da superfície variem, as respostas climáticas para os cenários de floresta e de pastagem apresentam, de forma geral, um aumento da temperatura do ar (variando de +0,6°C até +3,8°C), uma redução na precipitação (de 0 até 643 mm no valor

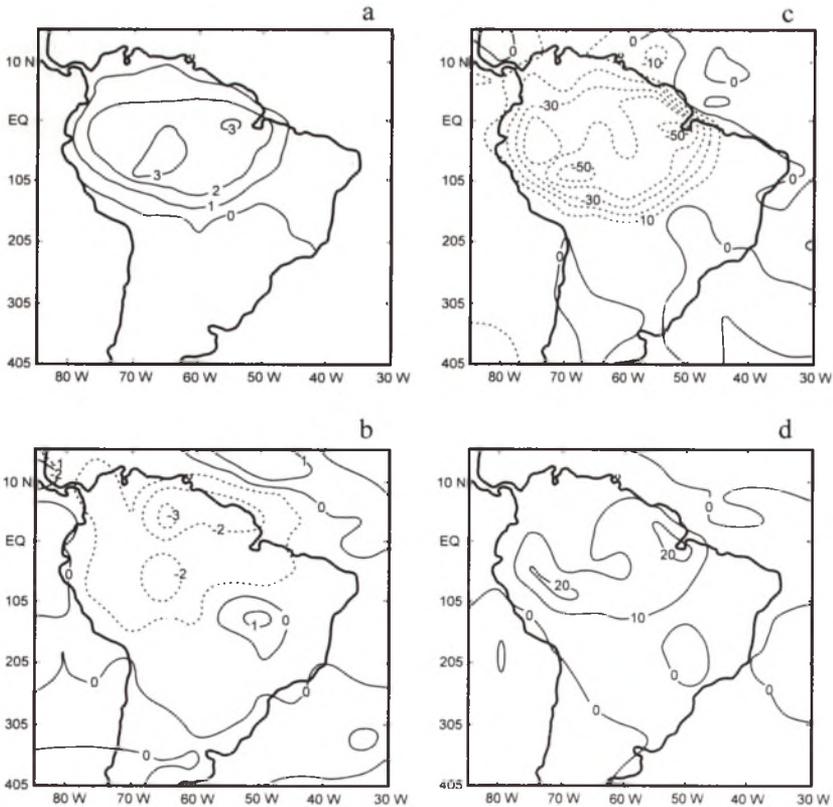
total anual) e redução da evaporação (de 113 mm até 985 mm), dependendo do modelo MCGA utilizado e das condições de integração. É importante lembrar que os modelos MCGAs foram integrados no tempo para diferentes escalas temporais (integrações variando de 1 a 10 anos). Também vale ressaltar que os estudos citados são indicadores do possível padrão climático após o desmatamento, considerando que este ocorra de forma imediata e em toda a extensão da Amazônia, que certamente não é o que ocorre na realidade. As substituições de superfície vegetada ocorrem em domínios de escala espacial pequenos (pequenas dimensões espacial) e perduram-se por períodos de tempo longos.

Outro aspecto a ser salientado é que os cenários de floresta e de pastagem são os mais contrastantes que se pode obter e nem sempre representam a realidade. O cenário mais provável de desmatamento, devido às práticas agrícolas que são utilizadas na Amazônia, é o de um mosaico de diferentes ecossistemas, incluindo gramíneas, culturas perenes e vegetação com floresta secundária. Giambelluca et al. (1997) realizaram um estudo do balanço de radiação em vários tipos de vegetação na Amazônia Oriental ( floresta tropical nativa, vegetação em processo de queima para desmate, florestas com vegetação secundária em estágio avançado, com 10 anos de desmatamento e abandono posterior). Os resultados obtidos mostram que todos os tipos de ecossistemas medidos apresentaram albedo menor do que o de pastagem, com indicações de que a energia radiante absorvida é maior do que a aquelas simuladas por modelos numéricos. Citam ainda que os albedos de floresta tropical e de vegetação secundária avançada são muito similares, embora apresentem diferenças relativas ao saldo de radiação: a vegetação secundária mostra temperaturas de superfície mais elevadas do que aquelas medidas em áreas de floresta tropical.

Embora os MCGAs tenham muitas parametrizações e simplificações dos processos físicos que ocorrem na atmosfera, os resultados já alcançados pela comunidade científica mostram aspectos coerentes com as observações microclimáticas em áreas de floresta e pastagem (Culf et al., 1998). Em um dos primeiros e clássicos experimentos numéricos de desmatamento na Amazônia, Nobre et al. (1991) encontraram que, ao se substituir a vegetação de floresta tropical por áreas desmatadas com gramíneas (pastagens), as temperaturas do ar e do solo aumentam, com valores variando de 0° a +3°C para o caso da temperatura do ar e de 0° a +3,5°C para a temperatura do solo (Figuras 1a e 1b). Em ambos os casos, o efeito é mais pronunciado na parte central da Amazônia, diminuindo esta influência nas bordas. Esse aquecimento

relativo da superfície desmatada e do ar imediatamente acima é consistente com reduções nas taxas de evapotranspiração (30%) e no fluxo de calor latente (20%), uma vez que uma maior fração de energia radiativa está disponível para aquecimento do solo e do ar.

No caso do balanço de energia à superfície (média espacial da área considerada), os resultados mostram que o fluxo de radiação solar absorvido pela superfície diminuiu de  $204 \text{ W.m}^{-2}$  para  $186 \text{ W.m}^{-2}$  na troca de vegetação, em parte devido ao maior albedo da pastagem (0,21). O fluxo de calor sensível aumentou de  $44 \text{ W.m}^{-2}$  para  $56 \text{ W.m}^{-2}$  e a razão de Bowen modificou-se de 0,34 para 0,62. Houve, por outro lado, uma redução de 2.464 mm para 1.821 mm em pastagem, sendo esta redução de 26%. (Figuras 1c e 1d).



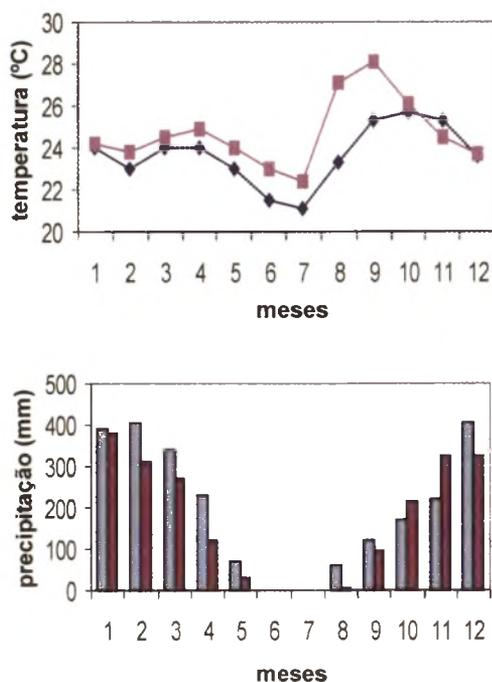
**Figura 1** - Simulações climáticas decorrentes do desmatamento na Amazônia: a) temperatura do ar (graus), b) temperatura do solo (graus), c) precipitação (mm) e d) evapotranspiração (mm). (Extraído de Nobre et al., 1991)

O trabalho realizado por Lean et al. (1996) incorporou vários dos resultados observacionais obtidos pelo Projeto ABRACOS (Gash & Nobre, 1997) no MCGA do Serviço Meteorológico do Reino Unido. O Projeto ABRACOS foi desenvolvido com o objetivo de obter informações sobre a variação de elementos climáticos devido ao desmatamento, de modo que estes pudessem ser incorporados nas simulações climáticas. Para o Estado de Rondônia, Fisch et al. (1997) analisaram os resultados decorrentes de desmatamento, em termos das variáveis microclimáticas. De modo geral, a substituição de floresta por pastagem provoca, em termos de média anual, uma redução no saldo de radiação de ondas curtas (8%) e ondas curtas e longas (3%), um aumento médio na temperatura média do ar (+0,9°C), uma redução pequena na umidade específica do ar, um aumento de velocidade do vento e uma redução na evaporação (20%) e precipitação (14%). Na Figura 2 apresenta-se a curva média mensal de temperatura e de precipitação para os cenários de floresta e pastagem em Rondônia. Em termos de temperatura do ar, a floresta apresenta uma curva média mensal sempre inferior à da pastagem, ressaltando-se o aquecimento provocado no cenário de pastagem em setembro, com uma diferença de +4°C. Esse aquecimento é esperado pelos efeitos combinados de queimadas e de uma maior devolução de calor sensível (que provoca aquecimento da atmosfera) da pastagem. Em médias anuais, a temperatura média de floresta é de 23,7°C e na pastagem de 24,7°C, com amplitudes térmicas de 4,6°C e 5,7°C para a floresta e pastagem, respectivamente.

Com relação às chuvas, ocorre uma diminuição na precipitação anual de 2.410 mm no cenário de floresta para 2.077 mm na condição de pastagem, com redução de 333 mm ao ano. Isto representa um decréscimo de água que poderia potencialmente evapotranspirar na ordem de 1 mm.dia<sup>-1</sup>. Esse resultado é coerente com as análises feitas por Alves et al. (1999) para a mesma região de Rondônia, porém usando dados observacionais para estimativas da evapotranspiração. Outra conclusão importante é que o período de seca torna-se mais prolongado, passando dos meses de junho-julho no cenário floresta para o período compreendido entre maio à agosto (caso da pastagem). Neste caso o período de seca é definido como sendo os meses em que a precipitação mensal é inferior à 50 mm.mês<sup>-1</sup>. Essas modificações da precipitação possuem ciclos horários que são diferentes das épocas úmida e seca.

Durante a época chuvosa, a partição de energia (dado pela razão de Bowen) é de +0,3 para os dois sítios (floresta e pastagem) em condições diurnas (valor integrado das 6:00 às 18:00 horas), indicando que o fluxo de calor sensível

(H), seja de aproximadamente 30% do valor do fluxo de calor latente/ evapotranspiração (LE). Os valores máximos de (H) são de 166 e 110  $\text{W.m}^{-2}$  para a floresta e pastagem, respectivamente. A época seca apresenta características bem distintas daquelas encontradas durante a estação chuvosa, sendo que a razão de Bowen na área de pastagem varia entre 1,0 a 3,0 e entre 0,4 e 0,8 na floresta. Estes valores estão um pouco mais elevados dos originados de observações microclimáticas realizadas em áreas de floresta e pastagem em Ji-Paraná por Galvão & Fisch (2000), na qual a razão de Bowen medida foi de 0,21 e 0,30 para a floresta e pastagem respectivamente durante a estação chuvosa e de 0,32 e 0,76 para a floresta e pastagem na época seca. A pequena variabilidade temporal da razão de Bowen para a floresta pode ser explicada pelo fato do sistema radicular das árvores tropicais ser bastante profundo e conseguir captar água durante todo o ano, ao passo que as gramíneas de pastagens somente conseguem uma boa disponibilidade hídrica durante os meses de chuva (Nepstad et al., 1994).



**Figura 2** - Ciclo sazonal da temperatura do ar (esquerda) e precipitação (direita) em áreas de floresta (azul) e pastagem (vermelho) em Ji-Paraná (RO). (Extraído de Fisch et al., 1997)

Os resultados da simulação climática mostraram que a temperatura do ar na pastagem é inferior à da floresta durante o período diurno (em torno de  $-1,2^{\circ}\text{C}$ ) e superior no período noturno ( $+0,6^{\circ}\text{C}$ ) para as condições de época chuvosa. Para a estação seca, a temperatura do ar na pastagem é sempre superior ao da floresta, com diferenças típicas de  $2,5^{\circ}\text{C}$ . Esse comportamento, quer seja para o período chuvoso ou seco, não é totalmente comprovado pelas observações microclimáticas (Bastable et al., 1993, Galvão & Fisch, 2000) e tem sido um ponto falho nos modelos numéricos.

## Comentários Finais

O tópico de modificações climáticas devido ao desmatamento na região Amazônica tem sido bastante estudado nos últimos anos, quer seja do ponto de vista observacional, quer seja por modelagem. Embora haja indícios de que esta substituição da superfície provoque variações no microclima local (maior saldo de radiação disponível, aumento de temperatura, redução na precipitação, aumento do fluxo de calor sensível e redução no fluxo de calor latente etc), não há um consenso de como isto pode ser extrapolado para a toda a região Amazônica e, desta forma, influenciar no clima regional e global. Certamente nos aspectos climáticos relativos ao clima local estas modificações já estão se manifestando. Outro aspecto a ser levantado, e talvez até mais importante que as modificações microclimáticas, é relativo ao papel que as florestas tropicais exercem como fontes e sorvedouros de  $\text{CO}_2$  atmosférico. Há indícios, segundo Malhi et al. (1998), de que as florestas tropicais possam ser fortes sorvedouros de  $\text{CO}_2$  atmosférico, agindo assim no sentido de minimizar a ação humana no efeito estufa. Entretanto, como esses mesmos autores afirmam, tais indícios precisam ser melhor amostrados e quantificados, inclusive com mais pontos amostrais que representem a grande variabilidade (climática, florística, pedológica etc.) da região. Nos próximos 5-10 anos, a Amazônia será palco de um grande experimento meteorológico (Large Scale Biosphere Atmosphere Experiment in Amazonia –LBA, <http://www.cptec.inpe.br/lba>) que pretende coletar dados ambientais em várias escalas (temporal e espacial), para aumentar os conhecimentos científicos de como a floresta Amazônica atua como entidade regional e de forma integrada, relativa aos aspectos climáticos, hidrológicos, ciclos biogeoquímicos e químicos da atmosférica, associando com o uso da terra.

## Agradecimentos

O autor deseja agradecer à todos aqueles que, diretamente ou indiretamente, realizam pesquisas na Amazônia, tentando compreender melhor a influência da floresta na determinação e caracterização do clima da região, em busca de melhores condições de vida dos Amazônidas. Agradecimentos especiais ao CNPq (bolsa 300564/96-1) e ao Programa Piloto de Proteção à Florestas Tropicais (PPD-G7 – Projeto 95/966) por apoiarem esta pesquisa.

## Referências Bibliográficas

ALVES, F.S.M.; FISCH, G.; VENDRAME, I.F. Modificações do microclima e regime hidrológico devido ao desmatamento na Amazônia: estudo de um caso em Rondônia (RO). *Acta Amazônica*, v. 29, n. 3, p. 395-409, 1999.

BASTABLE, H.G.; SHUTTLEWORTH, W.J.; DALLAROSA, R.L.G.; FISCH, G.; NOBRE, C.A. Observations of climate, albedo and surface radiation over cleared and undisturbed Amazonian forest. *International Journal of Climatology*, v. 13, p. 783-796, 1993.

CULF, A.D.; FISCH, G.; HODNETT, M.G. The albedo of Amazonian Forest and Ranch Land. *Journal of Climate*, v. 8, n. 6, p. 1544-1554, 1995.

CULF, A.D.; ESTEVES, J.L.; MARQUES FILHO, A.O.; ROCHA, H.R. DA. Radiation, temperature and humidity over forest and pasture in Amazonia. In: GASH, J.H.C.; NOBRE, C.A.; ROBERTS, J.M.; VICTORIA, R.L., (ed.), *Amazon deforestation and climate*. Chichester: John Wiley, 1996. p. 175-192.

CULF, A.D.; FISCH, G.; LEAN, J.; POLCHER, J. A comparison of Amazonian climate data with general circulation model simulations. *Journal of Climate*, v. 11, n. 11, p. 2764-2773, 1998.

FEITOSA, J.R.P.; FERREIRA DA COSTA, R.; FISCH, G.; SOUZA, S.S., NOBRE, C.A. Radiação solar em áreas de floresta e pastagem na Amazônia. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 6, n. 1, p. 1-7, 1998.

FERREIRA DA COSTA, R.; FEITOSA, J.R.P.; FISCH, G.; SOUZA, S.S.; NOBRE, C.A. Variabilidade diária da precipitação em regiões de floresta e pastagem na Amazônia. *Acta Amazônica*, v. 28, n. 4, p. 395-408, 1998.

FISCH, G.; LEAN, J.; WRIGHT, I.R.; NOBRE, C.A. Simulações climáticas do efeito do desmatamento na região Amazônica: estudo de um caso em Rondônia. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 12, n. 1, p. 33-48, 1997.

FISCH, G.; MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. *Acta Amazônica*, v. 28, n. 2, p. 101-126, 1998.

GALVÃO, J.A.C.; FISCH, G. Análise do balanço de energia em áreas de floresta e de pastagem na Amazônia. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 15, n. 2, p. 25-38. 2000.

GASH, J.H.C.; NOBRE, C.A. Climatic effects of Amazonian deforestation: some results from ABRACOS. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 78, n. 5, p. 823-830, 1997.

GENTRY, A.; LOPES-PARODI, J. Deforestation and increased flooding in the upper Amazon. *Science*, v. 210, p. 1354-1356, 1980.

GIAMBELLUCA, T.W.; HOLSCHER, D.; BASTOS, T.X.; FRAZÃO, R.R.; NULLET, M.A.; ZIEGLER, A.D. Observations of albedo and radiation balance over postforest land surfaces in the eastern Amazon Basin. *Journal of Climate*, v. 10, n. 5, p. 919-928, 1997.

HAHMANN, A.N.; DICKINSON, R.E. RCCM2-Bats Model over tropical south America: applications to tropical deforestation. *Journal of Climate*, v. 10, n. 8, p. 1944-1964, 1997.

LEAN, J.; BUTTON, C.; NOBRE, C.A.; ROWTREE, P. The simulated impact of Amazonian deforestation on climate using measured ABRACOS vegetation characteristics. In: GASH, J.H.C.; NOBRE, C.A.; ROBERTS, J.M.; VICTORIA, R.L. (ed.), *Amazon deforestation and climate*. Chichester: John Wiley, 1996. p. 549-576.

MALHI, Y.; NOBRE, A.D.; GRACE, J.; KRUIJT, B.; PEREIRA, M.G.P.; CULF, A.D.; SCOTT, S. Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest. *Journal of Geophysical Research*, v. 103, n. D24, p. 31.593-31.612, 1998.

MANZI, A.O.; PLANTON, S. A simulation of Amazonian deforestation using a GCM calibrated with ABRACOS and ARME data. In: GASH, J.H.C.; NOBRE, C.A.; ROBERTS, J.M.; VICTORIA, R.L. (ed.), *Amazon deforestation and climate*. Chichester: John Wiley, 1996. p. 505-529.

MARENGO, J.A.; TOMASELLA, J.; UVO, C.R. Trends in streamflow and rainfall in tropical south America: Amazonia, eastern Brazil and northwestern Peru. *Journal of Geophysical Research*, v. 103, n. D2, p. 1775-1783, 1998.

NOBRE, C.A.; SELLERS, P.J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. *Journal of Climate*, v. 4, n. 10, p. 957-987, 1991.

NEPSTAD, D.C.; DE CARVALHO, C.R.; DAVIDSON, E.A.; JIPP, P.H.; LEFEBVRE, P.A.; NEGREIROS, G.H.; DA SILVA, E.D.; STONE, T.A.; TRUMBORE, S.E.; VIEIRA, S. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature*, v. 372, p. 666-669, 1994.

PAIVA, E.M.C. D. de; CLARKE, R.T. Time trends in rainfall records in Amazônia. *Bulletin of American Meteorological Society*, v. 76, n. 11, p. 2203-2209, 1995.

ROCHA, H.R.; NOBRE, C.A.; BARROS, M.C. Variabilidade natural de longo prazo no ciclo hidrológico da Amazônia. *Climanálise – Boletim de Monitoramento e Análise Climática*, v. 4, n. 2, p. 36-42, 1989.

VICTORIA, R.L.; MARTINELLI, L.A.; MORAES, J.M.; BALLESTER, M.V.; KRUSCHE, A.V.; PELLEGRINO, G.; ALMEIDA, R.M.B.; RICHEY, J.E. Surface air temperature variations in the Amazon region and its borders during this century. *Journal of Climate*, v. 11, n. 5, p. 1105-1110, 1998.

WRIGHT, I.R.; GASH, J.H.C.; ROCHA, H.R.; SHUTTLEWORTH, W.J.; NOBRE, C.A.; MAITELLI, G.; ZAMPARONI, C.A.G.P.; CARVALHO, P. R. A. Dry season micrometeorology of central Amazonian ranchland. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 118, p. 1.083-1.099, 1992.

## Efeitos Potenciais do Ozônio Troposférico sobre as Plantas Cultivadas e o Biomonitoramento Ambiental

RENATO ALAS MARTINS

*International Activity for Environmental Protection – IAEP,  
Santos, SP, Brasil*

GERALDO STACHETTI RODRIGUES

*Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP, Brasil*

**Resumo.** *O ozônio troposférico é o principal poluente responsável por danos às plantas, tornando-as mais suscetíveis a estresses ambientais como seca e calor excessivo, bem como ao ataque de pragas e doenças, resultando em perdas consideráveis à produtividade agropecuária. Os níveis de  $O_3$  troposférico vêm aumentando, e medidas de controle ambiental são necessárias para minimizar os impactos da poluição por  $O_3$ . Este trabalho introduz os problemas causados pela poluição por  $O_3$  sobre as atividades agropecuárias, e apresenta as informações a serem consideradas na avaliação dos impactos do  $O_3$  sobre a agricultura brasileira.*

## Potential Tropospheric Ozone Effects on Crops and Environmental Biomonitoring

**Abstract.** *Tropospheric ozone is the main air pollutant that causes deleterious effects on plants. Ozone makes plants more susceptible to environmental stresses such as drought and excessive heat and to the attack of pests and diseases, which result in considerable losses to agricultural productivity. The rising levels of tropospheric  $O_3$  warrant the implementation of environmental control measures, with a view to abating the impact of  $O_3$  pollution. The paper discusses the problems caused by  $O_3$  pollution on agriculture and the information to be taken into account in evaluating  $O_3$  impacts on Brazilian agriculture.*

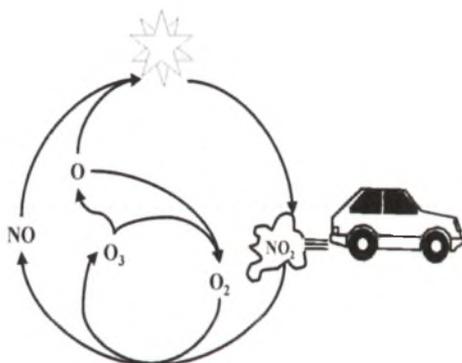
## Introdução

### *O Ozônio Troposférico*

Da energia que chega do sol e atinge nosso planeta, parte é refletida de volta ao espaço e parte é retida. A energia retida causa o aquecimento normal do planeta. No entanto, ao se contribuir com maior retenção de calor, podemos alterar as condições de equilíbrio natural, cujas conseqüências são difíceis de prever. A retenção de calor pela atmosfera da Terra dá-se através de gases que absorvem radiação na faixa do infravermelho. Os gases que são responsáveis por esta absorção podem contribuir, diretamente ou indiretamente, com o chamado efeito estufa. Para que um gás seja considerado “de efeito estufa,” ele deve apresentar, além de certas propriedades físico-químicas, ligações que absorvem os raios infravermelhos. Gases como argônio, neônio e hélio, não possuem ligações e não atuam como gases do efeito estufa. Já o ozônio ( $O_3$ ) possui três átomos com ligações que vibram com a mesma frequência do infravermelho, absorvendo-o. Gases como o dióxido de carbono ( $CO_2$ ), dióxido nitroso ( $NO_2$ ), metano ( $CH_4$ ) e outros, além do próprio vapor d’água, contribuem para o efeito estufa. Todos estes compostos são encontrados nas diferentes camadas da atmosfera, sendo que a troposfera é de especial interesse, já que é nessa camada que desenvolvemos nossas atividades vitais.

Pode-se dividir a troposfera em duas porções: aquela em contato com a superfície da terra, denominada camada limite; e a imediatamente acima desta, a troposfera livre, que tem como limite superior a estratosfera. A espessura da troposfera livre é tipicamente de 100 m durante a noite e de 1.000 m durante o dia, entretanto, este quadro é bastante variável. É na estratosfera que se encontra a camada de  $O_3$  que nos protege da radiação ultra-violeta. O objetivo deste capítulo é abordar os efeitos do  $O_3$  troposférico, ou seja, aquele presente próximo ao solo, como poluente que influencia as atividades humanas, em especial a agropecuária. O  $O_3$  troposférico é considerado um dos principais poluentes atmosféricos e sua concentração é normalmente medida em partes por bilhão (ppb). Este gás é um poluente secundário que se forma pela reação fotoquímica ilustrada na Figura 1. Outros gases poluentes complexos, como o peroxiacetilnitrato (PAN) são formados por reações fotoquímicas, cujo substrato são resíduos da queima de combustíveis, e sua ação soma-se à do  $O_3$  na produção de efeitos da poluição. O aumento na concentração de ozônio troposférico

tende a acompanhar a incidência solar e a quantidade de poluentes lançados pelos veículos. Deste modo, em um dia ensolarado, próximo ao meio dia, a variação típica da concentração de  $O_3$  atinge um pico máximo, que dura por cerca de quatro horas, e no fim do dia retorna à concentração observada pela manhã.



**Figura 1** - Formação do ozônio troposférico. Com a queima de combustível fóssil ocorre lançamento de  $NO_2$  que reage preferencialmente com oxigênio ( $O_2$ ) gerando  $NO + O_3$ . Nesta etapa de reação pode ocorrer consumo de  $O_3$ , de modo que este doe um átomo de oxigênio (O) ao  $NO$ . Este átomo de oxigênio pode “retornar,” através da reação fotoquímica, ao  $O_2$  atmosférico, gerando  $O_3$  novamente

Um impacto resultante da ação do  $O_3$ , bem como do PAN, é o aumento do custo de vida, em função de gastos com a saúde, que envolve problemas respiratórios, irritação nos olhos, agressão ao cabelo e pele, bem como prejuízos à arborização urbana, danos a monumentos e edificações. Um outro impacto importante é o comprometimento da produção agropecuária.

### *Efeito do $O_3$ na Produção Agropecuária*

O efeito da poluição atmosférica sobre a vida das plantas, e a conseqüente possibilidade de se empregar plantas como indicadores do estado de contaminação dos ambientes, atraía o interesse científico já no início deste século (Ruston, 1921). A esse tempo, notava-se que as folhas de plantas expostas a ambientes poluídos apresentavam danos visíveis, e esses danos ocorriam de forma variável, segundo padrões que indicavam que certas espécies eram mais suscetíveis, e que membros da população mais expostos apresentavam mais danos, estabelecendo-se as relações de dose-resposta. Com o desenvolvimento desses estudos, descobriu-se que plantas de tabaco eram especialmente

suscetíveis. Demonstrou-se que danos ocorriam quando plantas de tabaco eram expostas a misturas de gases componentes da poluição atmosférica em concentrações abaixo do limiar de toxicidade para os gases tomados individualmente, indicando sinergismo na ação tóxica dos gases componentes da poluição atmosférica (Menser & Heggstad, 1966).

Que esses danos se traduziam em decréscimos significativos na capacidade produtiva das plantas ficou demonstrado inicialmente para tabaco, e subseqüentemente para outras plantas de interesse agrícola (Ormrod, 1978; Tingey & Reinert, 1975). Embora os sintomas presentes nestas plantas apresentassem características típicas dos danos causados pelo poluente PAN, então em evidência nos estudos de poluição atmosférica secundária (resultante de reações entre poluentes primários), uma causa alternativa foi aventada após estudos em ambientes controlados: a mistura ozônio ( $O_3$ ) e dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) (Lewis & Brennan, 1978). Com essas evidências iniciais da ocorrência de efeitos significativos da poluição atmosférica sobre a produtividade de algumas culturas, estimou-se que as perdas econômicas para a agricultura dos EUA atingiriam US\$ 131 milhões anuais na década de 70, sendo que US\$ 76 milhões seriam atribuíveis a perdas em culturas agrícolas. Apenas uma década mais tarde, com o acúmulo de estudos na área, essa estimativa alcançava US\$ 1,8 bilhões, sendo 95% devido a oxidantes (essencialmente  $O_3$ ), e US\$ 35 milhões a  $SO_2$  (Heggstad & Bennett, 1984).

Poucos anos depois, agregando-se as evidências acumuladas em estudos de campo e de laboratório, e considerando-se o predomínio do  $O_3$  como principal agente, e sua concentração atmosférica presente em território americano (de cerca de 50 partes por bilhão - ppb), estimou-se que perdas não menores que US\$ 5,4 bilhões vinham ocorrendo de forma invisível (Mackenzie & El-Ashry, 1989), já que essa concentração, acima do limiar tóxico para produtividade, era ubíqua, e não apenas urbana, como ficou demonstrado pelos estudos do então recém-iniciado *National Crop Loss Assessment Network* (NCLAN) (Heck, 1989).

Além do extenso diagnóstico provido por este estudo de grande escala, definiu-se que novos índices deveriam ser empregados para se estabelecer padrões de aceitabilidade para  $O_3$  troposférico, levando-se em consideração os efeitos cumulativos do poluente, em adição à exposição aguda prevalecente em episódios de picos de concentração (Lefohn & Foley, 1992). Estudos recentes desenvolvidos na Europa e Estados Unidos vêm sendo aplicados na prática de

monitoramento ambiental do  $O_3$ . Na Europa, uma série de reuniões internacionais resultou no estabelecimento de alguns conceitos referentes à forma de se medir  $O_3$  troposférico. Pode-se destacar o conceito de acúmulo sobre um valor limite previamente estabelecido, chamado de Exposição Cumulativa Sobre um Limiar-AOT (do inglês *Accumulative Exposure Over a Threshold*), que é expresso em valores de ppb/hora. O valor de concentração previamente estabelecido pelos europeus foi de 40 ppb, os americanos optaram por 60 ppb.

Outros dois conceitos essenciais para a avaliação dos efeitos ambientais do ozônio sobre plantas foram definidos: i) Nível I, que trata das concentrações críticas de  $O_3$ , e se refere a um valor limite máximo que proteja as plantas menos tolerantes dos efeitos danosos do ozônio; ii) Nível II, que trata de várias concentrações críticas referentes aos diversos tipos de vegetação, solos, condições climáticas e vários outros fatores que influenciam os efeitos do  $O_3$  no ambiente. Neste último, o levantamento de novas informações acerca da sensibilidade de plantas cultivadas ou nativas ao  $O_3$  pelos pesquisadores é fundamental (Leeuw & Zantvoort, 1997).

Infelizmente, o estabelecimento de padrões e de medidas de controle mais rígidos podem ser de pouca eficácia, como será evidenciado nesse texto, no que concerne à poluição por  $O_3$  e seu impacto sobre a agricultura. Há indicações de que as concentrações ambientais de  $O_3$  troposférico sofreram uma duplicação no decorrer do corrente século (Hough & Derwent, 1990), e que a tendência para o futuro próximo é da ocorrência de incrementos mais rápidos que esses anteriormente observados, alcançando níveis até 40% superiores aos atuais no decorrer dos próximos trinta anos, em consequência da presente dinâmica cambiante da atmosfera em aquecimento (Sanders et al., 1993).

No Brasil, as determinações de concentração de  $O_3$  troposférico têm se concentrado na região amazônica, buscando-se avaliar efeitos das queimadas. Um levantamento representativo apontou concentrações de cerca de 90 ppb para o mês de setembro em Cuiabá, enquanto em Natal, em uma área livre da influência das queimadas e de fontes de poluição, a concentração era de 30 ppb (Kirchhoff et al., 1989). Esses dados apontam para uma situação de poluição por  $O_3$  aproximadamente semelhante aos valores descritos para países do Hemisfério Norte. Os dados são, contudo, poucos, e há necessidade de mais e melhores informações sobre os níveis de poluição por ozônio no Brasil.

### *Efeito do O<sub>3</sub> sobre a Vida das Plantas: Desenvolvimento de Tolerância e Trade-Offs*

O diagnóstico dos danos causados pelo O<sub>3</sub> sobre as plantas faz-se pela ocorrência de sintomas, que são quaisquer alterações perceptíveis na aparência, estrutura ou função de um organismo, que indiquem que este não esteja saudável. No contexto da poluição atmosférica, os ecossistemas normalmente não se encontram sob impacto de poluentes singulares, mas ao contrário, sofrem estresses de vários poluentes, juntamente com outros efeitos deletérios, muitos de origem antropogênica. Por exemplo, a maioria das alterações atmosféricas associadas com as mudanças climáticas presentemente antecipadas (aumentos na radiação ultravioleta, O<sub>3</sub>, seca, temperatura) caracterizam-se por aumento da natureza oxidativa do ambiente, pela formação de radicais livres (Treshow, 1984).

Mecanismos sinérgicos de ação tendem a ser muito importantes em tais situações (Taylor et al., 1991), como por exemplo, a ocorrência de efeitos exacerbados de poluentes como o ozônio, sobre vegetação previamente fragilizada por chuva ácida (Shriner & Johnson, 1987). O surgimento ou desenvolvimento de tolerância nesses casos torna-se difícil, já que várias diferentes alterações fisiológicas simultâneas são necessárias (Bell et al., 1991). Normalmente, somente plantas herbáceas, com tempo de geração curto, e sob forte pressão de seleção, desenvolvem resistência, como os casos clássicos de localidades próximas às fundições inglesas do século passado (Barrett & Bush, 1991). Ademais, como mecanismos de escape tendem a ser importantes nesses casos, e esses normalmente envolvem certo grau de redução do vigor competitivo em situações livres da pressão de seleção, a resistência normalmente desaparece rapidamente na ausência do estresse, diminuindo a fixação do caráter nas populações (Bradshaw & McNeilly, 1991). Isso significa que além de ser difícil, a adaptação ou aumento da resistência das plantas à poluição atmosférica envolve custos adicionais em termos de vigor vegetativo, produtividade, e resistência a outros fatores ecológicos limitantes.

### *Poluição e Predisposição da Vegetação ao Ataque de Pragas e Doenças*

Um caso especialmente importante de sinergismo envolvendo a poluição atmosférica é seu efeito na predisposição da vegetação ao ataque de pragas e doenças. O estresse causado pela poluição leva a alterações na alocação de recursos metabólicos pelas plantas, que normalmente interferem na sua interação com predadores e parasitas (Lechowicz, 1987). O principal efeito é um aumento nas chances de parasitas facultativos ou oportunistas em afetar a planta hospedeira enfraquecida (McLaughlin & Norby, 1991), já que em geral, parasitas obrigatórios, mesmo por suas características de seres metabolicamente dependentes, tendem a ser mais suscetíveis aos poluentes, e a diminuir em situações de estresse por poluentes, enquanto os facultativos tendem a aumentar (Heagle, 1982).

Os danos foliares causados pelo  $O_3$  podem favorecer o desenvolvimento de doenças fúngicas, facilitando e acelerando a infecção e a produção de esporos/inóculos. Por exemplo, a remoção do  $O_3$  troposférico (por filtragem) resultou em uma redução de seis vezes na queima-das-pontas (causada pelo patógeno *Botrytis*) em cebola (Wukasch & Hofstra, 1977). Esse efeito pode ocorrer mesmo que o patógeno seja sensível a  $O_3$  (Krause & Weidensaul, 1978), pois além de aumento da suscetibilidade da planta à infecção por efeito do poluente, fungos antagonistas (por exemplo *Hyalodendron album*, antagonista ao oídio *Microsphaera alni*) são eliminados por serem normalmente mais sensíveis à poluição (Hibben & Taylor, 1975).

Insetos e outros artrópodes também preferem plantas fragilizadas pelos efeitos da poluição, pois estas geralmente apresentam maiores conteúdos de proteínas, aminoácidos, e açúcares livres em seus tecidos (Endress & Post, 1985).

### *Poluição, Efeitos Fisiológicos, Danos à Membrana e Sintomas de Danos Vegetativos*

A presença de maiores teores de proteínas e decréscimos no conteúdo de clorofila (Beckerson & Hofstra, 1979) precedem o aparecimento de danos visíveis, a prematura queda das folhas danificadas, e a irreversível depressão nas taxas fotossintéticas (Black et al., 1982) pela ação do  $O_3$  e sua mistura com  $SO_2$ . Outros efeitos preponderantes são perdas de eletrólitos (com efeitos

negativos no balanço de potássio) (Elkyei & Ormrod, 1979), e consequentes efeitos no crescimento, partição de assimilados, absorção de nitrogênio, e conteúdo de açúcares (Ito et al., 1985), que são o resultado dos danos diretos causados pelo O<sub>3</sub> à integridade e permeabilidade da membrana celular (Baker & Fullwood, 1986; Ting et al., 1974).

A Figura 2 ilustra os danos foliares e o comprometimento do desenvolvimento das plantas de tabaco tratadas com diferentes concentrações de O<sub>3</sub> em câmaras fechadas (em concentrações passíveis de ocorrer em ambientes abertos, moderadamente poluídos), com os picos de concentração de O<sub>3</sub> indicados em partes por bilhão. É possível observar que, apesar da concentração do O<sub>3</sub> adicionado ao fluxo de ar ser crescente, os efeitos de injúria visual não aumentam proporcionalmente à concentração. Os maiores danos são observados em 120 ppb, quando o esperado seria em 200 ppb.

Já que a concentração de ozônio não é o único fator importante na determinação de injúrias nas plantas, uma vez que as injúrias mais graves não necessariamente acompanham o aumento na concentração, como então deve ser feita a avaliação dos danos nas áreas afetadas de modo que estas áreas possam ser comparadas? A resposta está justamente no procedimento de AOT (Exposição Cumulativa Sobre um Limiar). O método consiste em aplicar-se valores de concentração de ozônio, obtidos através de estações telemétricas, localizadas em vários pontos de uma região, na seguinte fórmula:

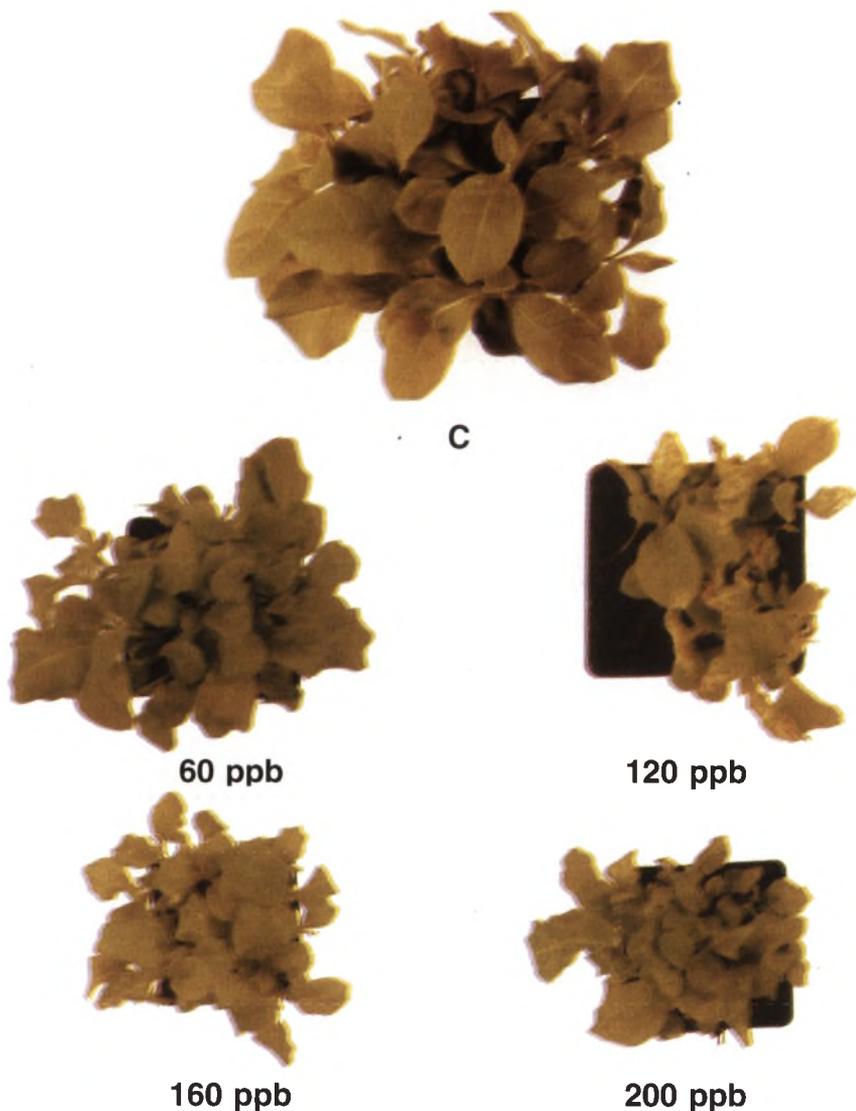
$$AOT = \sum_{i=1}^N ([O_3] - 40 \text{ ppb}) \delta_i$$

onde,

$$\delta_i = 0 \text{ para } [O_3] < 40 \text{ ppb}$$

$$\delta_i = 1 \text{ para } [O_3] \geq 40 \text{ ppb}$$

A aplicação desta fórmula é muito simples. Os valores horários de concentração de O<sub>3</sub> são atribuídos à fórmula, e aqueles que forem maiores que o estabelecido (40 ppb) passam a ter valor positivo para  $\delta_i$ , resultando em um valor que é somado no cômputo total diário. Os valores de concentração de O<sub>3</sub> menores que (40 ppb) têm resultado  $\delta_i$  zerado e passam a não ter significado. Deste modo, ao final de um dia, por exemplo, tem-se a soma que representa o acúmulo de exposição ao qual determinada região ficou sujeita a O<sub>3</sub> acima de (40 ppb). Assim, pode-se comparar diversas regiões, e os dados somados indicam como certa área está sujeita a ação do O<sub>3</sub> por períodos anuais ou mesmo de décadas.



**Figura 2** - Controle (C) = Desenvolvimento normal de plantas de tabaco crescidas em ar filtrado. 60 ppb = As plantas apresentam menor desenvolvimento da parte aérea. 120 ppb = Nesta concentração as plantas apresentaram maiores danos e comprometimento do crescimento. Podem ser observadas necroses, determinadas pelas regiões secas nas folhas. 160 ppb = O desenvolvimento das plantas foi comprometido e há clorose, determinada pelas manchas amarelas que acompanham a venação foliar. 200 ppb = Efeito muito parecido com o de 160 ppb, mas com menor desenvolvimento das plantas. Uma possível explicação pode ser atribuída a que, em 120 ppb está a melhor relação entre quantidade de  $O_3$  e ar, que favoreça a captação. É claro que esta melhor captação também expõe a planta aos efeitos oxidativos do ozônio com maior intensidade

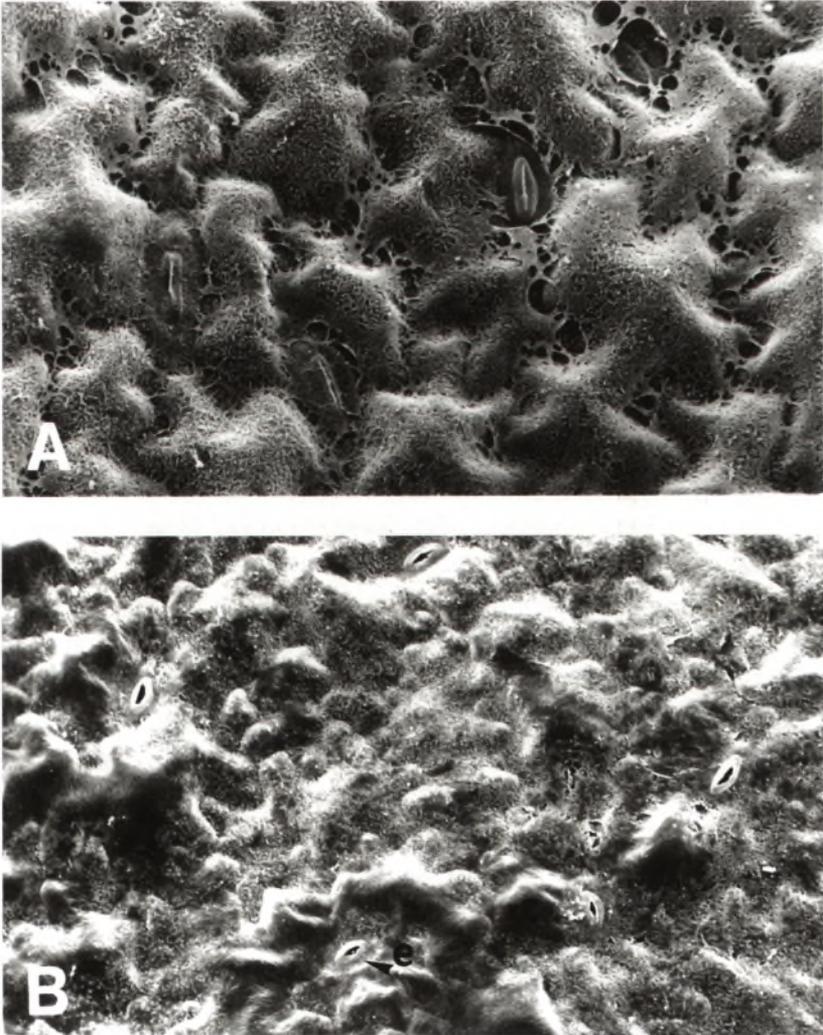
Os danos causados pelo  $O_3$  são responsáveis por drásticas reduções nas trocas gasosas (inclusive de  $CO_2$ ), que por exemplo, diminuíram em até 58 e 67% em soja exposta a  $O_3$  e  $SO_2$  em regiões com níveis moderados de poluição (Chevone & Yang, 1985; Le Sueur-Brymer & Ormrod, 1984). Note-se que esses efeitos dependem do contato dos poluentes com os tecidos internos das folhas, sendo que estômatos cerrados, devido à deficiência hídrica ou outras causas, resultam em menores danos (Olszyk & Tibbitts, 1981).

A resposta das plantas ao efeito de misturas de  $O_3$  e  $SO_2$  pode ser aditiva (Ormrod et al., 1987), antagonística ou sinérgica, dependendo das condições de exposição e da espécie envolvida. Em qualquer circunstância, contudo, quando se avaliam os resultados de estudos com muitas espécies, conclui-se que há prejuízo na produção (Tingey et al., 1973). Por exemplo, o tabaco que sempre foi uma espécie indicadora para estudos dos efeitos do  $O_3$ , apresenta um limiar toxicológico de apenas 20 ppb.10h e resposta sinérgica à mistura com  $SO_2$  (MacDowall & Cole, 1971).

Estudos pioneiros empregando os critérios desenvolvidos em tabaco mostraram que concentrações de ocorrência comum (aproximadamente entre 50 e 100 ppb) são suficientes para causar danos foliares intensos em várias espécies de interesse agrícola, das quais citam-se a soja, com índices de dano de 7,9 em uma escala de 9,0 pontos, causado por 50 ppb  $O_3$  (Miller et al., 1974); ou 39% de área lesionada, que aumentou para 78% em 100 ppb  $O_3$  (Heagle & Johnston, 1979). Estudos da interação entre  $O_3$  e deficiência hídrica indicaram que, se por um lado a deficiência hídrica diminui os efeitos do poluente devido ao fechamento dos estômatos, o ozônio causa perda de resistência à seca nas plantas de soja expostas (Heggstad et al., 1985), o que pode ter importante significado para a cultura. Outras espécies estudadas são o feijão (Brennan & Rhoads, 1976; Ito et al., 1985), ornamentais como a azaléia (Sanders & Reinert, 1982), essências florestais (Constantinidou & Kozlowski, 1979; Costonis, 1970), frutíferas (Shertsz et al., 1980), entre outras.

Quando se analisa a superfície das folhas através de microscopia eletrônica de varredura, os efeitos do  $O_3$  ficam bem evidentes, como se pode observar na Figura 3. A cera que recobre a superfície foliar e que tem a função de contribuir na proteção contra a perda de água e eletrólitos durante a transpiração e de também garantir uma superfície adequada à incidência de luz, reage com o  $O_3$  perdendo suas características originais (c). Desta reação restam grãos dispersos na superfície foliar que não exercem mais a função de

proteção da planta. Os estômatos (e), responsáveis pelo controle de fluxo gasoso entre a região interna e externa da folha, são inativados pela morte das células guarda, que controlam o seu processo de abertura e fechamento, levando também a um colapso do processo de captação de gases como o  $\text{CO}_2$ , necessário ao bom desempenho fotossintético das plantas.



**Figura 3** - Superfície foliar de plantas de ervilha A - Controle (ar filtrado) e B - Tratamento com 200 ppb de ozônio ( $\text{Ar} + \text{O}_3$ ). Houve remoção da cera (c) que recobre a superfície da cutícula e os estômatos (e) estão abertos devido à morte das células-guarda, tornando-os sem função

Além dos efeitos no crescimento e produção das plantas, os poluentes podem interferir com a capacidade reprodutiva, por seus efeitos negativos sobre os grãos de pólen (Ma & Khan, 1976; Wolters & Martens, 1987). O ozônio está também implicado com efeitos tóxicos genéticos (Crebelli et al., 1991; Dubeau & Chung, 1982; Fetner, 1958; Gichner et al., 1992; Ma et al., 1982; Ma et al., 1973; Rodrigues et al., 1996), que embora pareçam ocorrer somente em exposições extremas (Janakiraman & Harney, 1976), foram detectados em estudos nos quais a sensível planta indicadora *Tradescantia* foi exposta à atmosfera de várias localidades nos EUA, em um extenso monitoramento da atividade genotóxica da poluição (Schairer, 1979; Schairer et al., 1982; Van't Hof & Schairer, 1982). Embora esses resultados tenham indicado uma baixa atividade mutagênica para o O<sub>3</sub> e outros poluentes atmosféricos, eles sugerem implicações mais complexas para a problemática da poluição, que extrapolam os prejuízos econômicos causados à agricultura.

### *Efeitos da Poluição por O<sub>3</sub> na Produtividade Agrícola*

A constatação que os níveis de concentração de O<sub>3</sub> troposférico hoje presentes em vastas regiões da Terra têm graves implicações para a capacidade produtiva das plantas, estimulou os estudos dirigidos a avaliar os efeitos da poluição atmosférica sobre a produtividade agrícola. O primeiro esforço coordenado de pesquisa para a avaliação dos impactos da poluição na agricultura em larga escala ocorreu nos EUA, com a mencionada rede NCLAN (Kohut et al., 1982). Coordenado a partir de seis laboratórios nacionais geograficamente bem distribuídos, o estudo visou avaliar as perdas agrícolas associadas aos atuais níveis de concentração de O<sub>3</sub>, bem como os ganhos com reduções na concentração do poluente, além dos prejuízos adicionais de possíveis incrementos nas emissões. Para tanto, além de padronizar as condições de exposição, as culturas, sua fertilização e irrigação, os estudos se caracterizavam pela exclusão do O<sub>3</sub> presente no ar atmosférico por meio de filtros, ou adição de O<sub>3</sub> de acordo com tratamentos definidos, em câmaras de topo aberto distribuídas em cultivos a campo.

Exemplos de perdas típicas na produtividade de culturas agrícolas causados por O<sub>3</sub> estudados no NCLAN podem ser observados na Tabela 1.

**Tabela 1** - Exemplos típicos de perdas na produtividade de culturas, causados por níveis de ozônio (O<sub>3</sub>) em concentrações tipicamente presentes em áreas produtivas

Cultura	Exposição (máxima)	Perda (máxima)	Observação	Referência
Alface	2x ambiente (104 ppb)	35%	90% de perda em plantas para comercialização. Maturação três semanas mais tardia.	(Temple et al., 1986)
Algodão	100 ppb	31%		(Heagle et al., 1986)
Feijão	150 ppb	50%	Nenhuma produção com exposição a 250 ppb.	(Hoffman et al., 1973)
Milho	150 ppb	40%	Danos foliares iniciaram-se aos 70 ppb	(Heagle et al., 1979)
Nabo olerífero	77 ppb	14%	38% menos ramos floríferos.	(Ollerenshaw et al., 1999)
Rabanete	400 ppb	51%	Exposição envolveu 100 ppb de SO <sub>2</sub> e NO <sub>2</sub> .	(Reinert & Gray, 1981; Reinert & Sanders, 1982; Reinert et al., 1982)
Soja (1)	100 ppb	62%	Limiar para perdas na produção estabelecido entre 50 e 100 ppb.	(Heagle et al., 1974)
Soja (2)	55 ppb	20%	Nível de exposição crônica típica nas regiões produtivas dos EUA.	(Heagle et al., 1983)
Soja (3)	80 ppb	25%		(Reich & Amundson, 1984)
Soja (4)	65 ppb	15%	Nível de exposição crônica típica nas regiões produtivas dos EUA.	(Kress et al., 1986)
Sorgo granífero	300 ppb	15%	Em modelagem matemática do efeito, sorgo mostrou-se tolerante.	(Kress & Miller, 1984)

Como se pode observar, concentrações semelhantes às aquelas presentes na atmosfera de áreas não poluídas (entre 50 e 80 ppb), mesmo aquelas rurais, no Brasil e em outras partes do mundo, são suficientes para causar perdas significativas na produção agrícola. Já as perdas associadas às concentrações típicas de episódios de picos de poluição (100 ppb+), como inversões térmicas, ocorrência de plumas de queimadas, ou áreas altamente poluídas, podem resultar em perdas maiores que 50% para certas culturas. Vale ressaltar que esses resultados são “virtualmente invisíveis”, já que vêm sendo causados de forma contínua pela atmosfera nos atuais níveis de poluição, que hoje representa aproximadamente o dobro da observada em fins do século passado (Hough & Derwent, 1990).

### *Prejuízos Econômicos Associados às Perdas Agrícolas*

Os resultados de estudos do impacto causado pela poluição atmosférica na agricultura indicam que o  $O_3$ , sozinho ou em combinação com o  $SO_2$ , é responsável por até 90% das perdas, e que essas podem atingir cifras significativas. Considerando uma concentração basal atual de 50 ppb, Mackenzie & El-Ashry (1989) estimaram que as perdas para as principais culturas dos EUA alcançariam US\$3 bilhões, e que o controle das emissões visando reduzir a poluição para níveis semelhantes aos presentes em fins do século passado (25 ppb  $O_3$ ) traria benefícios de aumento de produção estimada em US\$5,4 bilhões.

As avaliações econômicas realizadas com os dados do NCLAN apontam para uma perda de US\$3,13 bilhões para o conjunto de culturas estudadas, que apresentavam um ganho de US\$15,51 à época dos levantamentos, o que significa uma média de 20% de perda (Heck et al., 1983). Esse valor alcançaria US\$7 bilhões se todas as culturas fossem consideradas, mesmo que o prejuízo não incluísse as perdas impostas a pastagens e a florestas nativas, bem como outros impactos sobre as atividades de interesse agropecuário e florestal (Heck, 1989).

### **Conclusão**

Os impactos do  $O_3$  e da poluição atmosférica sobre a agricultura e o ambiente são muito importantes. Esse impacto é ainda exponencializado quando se considera que as plantas tendem a se adaptar aos estresses impostos pelos poluentes. Os mecanismos imediatos de adaptação envolvem (Winner et al., 1991): i) na folha: a redução na condutância dos estômatos, resultando em menor transpiração e trocas gasosas reduzidas. Além do efeito direto na produtividade e queda na transpiração, tais mecanismos podem causar diminuição na capacidade de regulação térmica da folha, aumentando o risco de degradação enzimática e perda de funções fisiológicas. Esse efeito pode diminuir drasticamente a longevidade foliar, já que a presença do  $O_3$  está associada a dias claros e ensolarados, quando a regulação térmica é mais demandada; ii) na planta: o  $O_3$  causa alteração na alocação de recursos, alterando a relação entre raízes e parte aérea, aumentando a fragilidade das plantas a outros estresses

ambientais, em especial ao frio, seca, e predadores/parasitas. Finalmente, iii) nas populações: a eliminação, direta ou por exclusão competitiva, dos indivíduos mais sensíveis (que pode alcançar 90% (Winner et al., 1991)) pode contribuir marcadamente para a redução da variabilidade genética, deixando as populações sob severo risco frente a outros estresses, um risco crescentemente grave em situação de mudanças globais, quando é maior a probabilidade de eventos ambientais extremos causarem extinções.

Além das complicações relativas aos efeitos secundários da adaptação das plantas aos estresses da poluição atmosférica, há fortes indícios de que os danos até agora diagnosticados podem ser ainda maiores. Ocorre que os mecanismos da ação tóxica do  $O_3$  estão ligados à produção de etileno nas folhas, que acelera o processo de abscisão que segue o trauma causado pelo estresse da poluição (Unsworth, 1987). Porém, plantas expostas diariamente ao ozônio (como aquelas estudadas na NCLAN) produzem pouco etileno, e sofrem muito menor dano que plantas expostas de forma aguda eventual, que tende a ser preponderante na maior parte das áreas rurais. Em sendo este um mecanismo de ocorrência geral, os resultados da longa série de experimentos com exposição diária de culturas ao  $O_3$  (típico da NCLAN) podem ser considerados sub-estimativas.

Que a causa da toxicidade do  $O_3$  se deve à sua interação com etileno é um fato bem estabelecido (Mehlhorn et al., 1991), inclusive com análises detalhadas da bioquímica da reação e demonstração que a formação de radicais livres e suas reações de peroxidação com os tecidos das plantas são fases importantes da ação tóxica (Mehlhorn et al., 1990).

Ainda assim, embora sabendo-se da extensão dos danos e prejuízos impostos à agricultura (que são inusitadamente elevados), e conhecendo-se a causa e os mecanismos da ação tóxica, pouco pode ser sugerido em termos de solução ao problema dos efeitos da poluição por  $O_3$  sobre a vida das plantas, além de promover a redução das emissões de gases. Como desabafava o Dr. Walter Heck, coordenador do esforço de pesquisa representado pelo NCLAN: “É frustrante para os produtores que nós não tenhamos qualquer solução simples que eles possam adotar para o problema da poluição por ozônio” (Adams, 1986).

No momento, cabe-nos estudar os efeitos, compreender os mecanismos da ação tóxica e da proteção das plantas, e em termos práticos para amenizar o problema, considerar os impactos da poluição em nossos esforços de selecionar variedades vegetais e formas de manejo agrícola mais adequadas em frente da crescente ameaça da poluição atmosférica.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a colaboração oferecida por Marcelo Ganzarolli de Oliveira, Cláudia Poli de Almeida Barêa Teixeira, Sílvia Mika Shishido e Gianni Laurindo Gervais (IQ, Unicamp), Ricardo Antunes de Azevedo (ESALQ, USP), Andréa Moreira (Embrapa Meio Ambiente), e Richard John Smith e Peter John Lea (Lancaster University, UK).

## Referências

- ADAMS, S. Research assesses ozone damage to crops. *Agricultural Research*, v. 34, n. 10, p. 6-7, 1986.
- BAKER, C. K.; FULLWOOD, A. E. Leaf damage following crop spraying in winter barley exposed to sulfur dioxide. *Crop Protection*, v. 5, n. 5, p. 365-367, 1986.
- BARRETT, S. C. H.; BUSH, E. J. Population processes in plants and the evolution of resistance to gaseous air pollutants. In: TAYLOR, G. E., Jr.; PITELKA, L. F.; CLEGG, M.T., ed. *Ecological genetics and air pollution*. New York: Springer-Verlag, 1991. p. 137-165.
- BECKERSON, D. W.; HOFSTRA, G. Effect of sulphur dioxide and ozone singly or in combination on leaf chlorophyll, RNA, and protein in white bean. *Canadian Journal of Botany*, v. 57, p. 1940-1945, 1979.
- BELL, J. N. B.; ASHMORE, M. R.; WILSON, G. B. Ecological genetics and chemical modifications of the atmosphere. In: TAYLOR, G. E., Jr.; PITELKA, L. F.; CLEGG, M.T. (ed.), *Ecological genetics and air pollution*. New York: Springer-Verlag, 1991. p. 33-59.
- BLACK, V. J.; ORMROD, D. P.; UNSWORTH, M. H. Effects of low concentration of ozone, singly, and in combination with sulphur dioxide on net photosynthesis rates of *Vicia faba* L. *Journal of Experimental Botany*, v. 33, n. 137, p. 1302-1311, 1982.
- BRADSHAW, A. D.; MCNEILLY, T. Evolution in relation to environmental stress. In: TAYLOR, G. E., Jr.; PITELKA, L. F.; CLEGG, M.T., ed. *Ecological genetics and air pollution*. New York: Springer-Verlag, 1991. p. 11-31.

BRENNAN, E.; RHOADS, A. Response of field-grown bean cultivars to atmospheric oxidant in New Jersey. *Plant Disease Reporter*, v. 60, n. 11, p. 941-945, 1976.

CHEVONE, B. I.; YANG, Y. S. CO<sub>2</sub> exchange rates and stomatal diffusive resistance in soybean exposed to O<sub>3</sub> and SO<sub>2</sub>. *Canadian Journal of Plant Sciences*, v. 65, p. 267-274, 1985.

CONSTANTINIDOU, H. A.; KOZLOWSKI, T. T. Effects of sulfur dioxide and ozone on *Ulmus americana* seedlings. II. Carbohydrates, proteins, and lipids. *Canadian Journal of Botany*, v. 57, p. 176-184, 1979.

COSTONIS, A. C. Acute foliar injury of eastern white pine induced by sulfur dioxide and ozone. *Phytopathology*, v. 60, p. 994-999, 1970.

CREBELLI, R.; FUSELLI, S.; BERTOLACCINI, M. A.; TAFANI, P.; CARERE, A.; BENIGNI, R. Mutagenicity of airborne particles and concentration of some organic and inorganic pollutants in the air of Rome: seasonal variations and correlation analysis. *Mutation Research*, v. 271, n. 2, p. 167, 1991.

DUBEAU, H.; CHUNG, Y. S. Genetic effects of ozone. Induction of point mutation and genetic recombination in *Saccharomyces cerevisiae*. *Mutation Research*, v. 102, n. 3, p. 249-259, 1982.

ELKYEI, T.; ORMROD, D. P. Ozone and/or sulphur dioxide effects on tissue permeability of petunia leaves. *Atmospheric Environment*, v. 13, p. 1165-1168, 1979.

ENDRESS, A. G.; POST, S. L. Altered feeding preference of Mexican bean beetle *Epilachna varivestis* for ozonated soybean foliage. *Environmental Pollution*, v. 39, p. 9-16, 1985.

FETNER, R. H. Chromosome breakage in *Vicia faba* by ozone. *Nature*, v. 181, p. 504-505, 1958.

GICHNER, T.; LANGEBARTELS, C.; SANDERMANN, H., JR. Ozone is not mutagenic in the *Tradescantia* and tobacco mutagenicity assays. *Mutation Research*, v. 281, p. 203-206, 1992.

HEAGLE, A. S. Interactions between air pollutants and parasitic plant diseases. In: UNSWORTH, M.H.; ORMROD, D.P. (ed.), *Effects of gaseous air pollution in agriculture and horticulture*. Cambridge, UK: Butterworth Scientific, 1982. p. 333-348.

HEAGLE, A. S.; BODY, D. E.; NEELY, G. E. Injury and yield responses of soybean to chronic doses of ozone and sulfur dioxide in the field. *Phytopathology*, v. 64, p. 132-136, 1974.

HEAGLE, A. S.; HECK, W. W.; LESSER, V. M.; RAWLINGS, J. O.; MOWRY, F. L. Injury and yield response of cotton to chronic doses of ozone and sulfur dioxide. *Journal of Environmental Quality*, v. 15, n. 4, p. 375-382, 1986.

HEAGLE, A. S.; HECK, W. W.; RAWLINGS, J. O.; PHILBECK, R. B. Effects of chronic doses of ozone and sulfur dioxide on injury and yield of soybeans in open-top field chambers. *Crop Science*, v. 23, p. 1184-1191, 1983.

HEAGLE, A. S.; JOHNSTON, J. W. Variable responses of soybeans to mixtures of ozone and sulphur dioxide. *Journal of the Air Pollution Control Association*, v. 29, n. 7, p. 729-732, 1979.

HEAGLE, A. S.; PHILBECK, R. B.; KNOTT, W. M. Thresholds for injury, growth, and yield loss caused by ozone on field corn hybrids. *Phytopathology*, v. 69, n. 1, p. 21-26, 1979.

HECK, W. W. Assessment of crop losses from air pollutants in the United States. In: MACKENZIE, J.J.; EL-ASHRY, M.T. (ed.), *Air pollution's toll on forests and crops*. New Haven, CT: Yale University Press, 1989. p. 235-315.

HECK, W. W.; ADAMS, R. M.; CURE, W. W.; HEAGLE, A. S.; HEGGESTAD, H. E.; KOHUT, R. J.; KRESS, L. W.; RAWLINGS, J. O.; TAYLOR, O. C. A reassessment of crop loss from ozone. *Environmental Science and Technology*, v. 17, n. 12, p. 573A-581A, 1983.

HEGGESTAD, H. E.; BENNETT, J. H. Impact of atmospheric pollution on agriculture. In: TRESHOW, M. (ed.), *Air pollution and plant life*. New York: John Wiley & Sons, 1984. p. 357-416.

HEGGESTAD, H. E.; GISH, T. J.; LEE, E. H.; BENNETT, J. H.; DOUGLAS, L. W. Interaction of soil moisture stress and ambient ozone on growth and yields of soybeans. *Phytopathology*, v. 75, n. 4, p. 472-477, 1985.

HIBBEN, C. R.; TAYLOR, M. P. Ozone and sulphur dioxide effects on the lilac powdery mildew fungus. *Environmental Pollution*, v. 9, p. 107-114, 1975.

HOFFMAN, G. J.; MAAS, E. V.; RAWLINS, S. L. Salinity-ozone interactive effects on yield and water relations of pinto bean. *Journal of Environmental Quality*, v. 2, n. 1, p. 148-152, 1973.

HOUGH, A. M.; DERWENT, R. G. Changes in the global concentration of tropospheric ozone due to human activities. *Nature*, v. 344, p. 645-648, 1990.

- ITO, O.; OKANO, K.; KUROIWA, M.; TOTSUKA, T. Effects of NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> alone or in combination on kidney bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.): growth, partitioning of assimilates and root activities. *Journal of Experimental Botany*, v. 36, n. 165, p. 652-662, 1985.
- JANAKIRAMAN, R.; HARNEY, P. M. Effects of ozone on meiotic chromosomes of *Vicia faba*. *Canadian Journal of Genetics and Cytology*, v. 18, p. 727-730, 1976.
- KIRCHHOFF, V. W. J. H.; SETZER, A. W.; PEREIRA, M. C. Biomass burning in Amazonia: seasonal effects on atmospheric O<sub>3</sub> and CO. *Geophysical Research Letters*, v. 16, n. 5, p. 469-472, 1989.
- KOHUT, R.; AMUNDSON, R.; WEINSTEIN, L. *The National Crop Loss Assessment Network: an approach to the study of nationwide crop losses due to air pollution*. Ithaca: Cornell University, 1982. 24 p. (ERC Report, 8).
- KRAUSE, C. R.; WEIDENSAUL, T. C. Effects of ozone on the sporulation, germination, and pathogenicity of *Botrytis cinerea*. *Phytopathology*, v. 68, p. 195-198, 1978.
- KRESS, L. W.; MILLER, J. E. Impact of ozone on grain sorghum yield. *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 25, p. 377-390, 1984.
- KRESS, L. W.; MILLER, J. E.; SMITH, H. J. Impact of ozone and sulphur dioxide on soybean yield. *Environmental Pollution*, v. 41, p. 105-123, 1986.
- LE SUEUR-BRYMER, N. M.; ORMROD, D. P. Carbon dioxide exchange rates of fruiting soybean plants exposed to ozone and sulphur dioxide singly or in combination. *Canadian Journal of Plant Sciences*, v. 64, p. 69-75, 1984.
- LECHOWICZ, M. J. Resource allocation by plants under air pollution stress: implications for plant-pest-pathogen interactions. *The Botanical Review*, v. 53, n. 3, p. 281-300, 1987.
- LEEUW, F. A. A. M.; ZANTVOORT, E. D. G. Mapping of exceedance of ozone critical levels for crops and forest trees in The Netherlands: preliminary results. *Environmental Pollution*, v. 96, n. 1, p. 89-98, 1997.
- LEFOHN, A. S.; FOLEY, J. K. Nclan results and their application to the standard-setting process protecting vegetation from surface ozone exposures. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v. 42, n. 8, p. 1046-1052, 1992.
- LEWIS, E.; BRENNAN, E. Ozone and sulfur dioxide mixtures cause a PAN-type injury to petunia. *Phytopathology*, v. 68, p. 1011-1014, 1978.

- MA, T. H.; ANDERSON, V. A.; AHMED, I. Environmental clastogens detected by meiotic pollen mother cells of *Tradescantia*. In: TICE, R.R.; COSTA, D.L.; SCHAICH, K. M. (ed.), *Genotoxic effects of airborne agents*. New York: Plenum Press, 1982. p. 141-157.
- MA, T. H.; ISBANDI, D.; KHAN, S. H.; TSENG, Y. S. Low level of SO<sub>2</sub> (sulfur dioxide) enhanced chromatid aberrations in *Tradescantia* (paludosa) pollen tubes and seasonal variation of the aberration rates. *Mutation Research*, v. 21, n. 2, p. 93-100, 1973.
- MA, T. H.; KHAN, S. H. Pollen mitosis and pollen tube growth inhibition by SO<sub>2</sub> (sulfur dioxide) in cultured pollen tubes of *Tradescantia*. *Environmental Research*, v. 12, n. 2, p. 144-149, 1976.
- MACDOWALL, F. D. H.; COLE, A. F. W. Threshold and synergistic damage to tobacco by ozone and sulfur dioxide. *Atmospheric Environment*, v. 5, p. 553-559, 1971.
- MACKENZIE, J. J.; EL-ASHRY, M. T. Tree and crop injury: a summary of the evidence. In: MACKENZIE, J.J.; EL-ASHRY, M.T., ed. *Air pollution's toll on forests and crops*. New Haven, CT.: Yale University Press, 1989. p. 1-21.
- MCLAUGHLIN, S. B.; NORBY, R. J. Atmospheric pollution and terrestrial vegetation: evidence of changes, linkages, and significance to selection processes. In: TAYLOR, G.E.; Jr.; PITELKA, L.F.; CLEGG, M.T. (ed.), *Ecological genetics and air pollution*. New York: Springer-Verlag, 1991. p. 61-101.
- MEHLHORN, H.; O'SHEA, J. M.; WELLBURN, A. R. Atmospheric ozone interacts with stress ethylene formation by plants to cause visible plant injury. *Journal of Experimental Botany*, v. 42, n. 234, p. 17-24, 1991.
- MEHLHORN, H.; TABNER, B. J.; WELLBURN, A. R. ESR evidence for the formation of free radicals in plants exposed to ozone. *Physiologia Plantarum*, v. 79, n. 2, p. 377-383, 1990.
- MENSER, H. A.; HEGGESTAD, H. E. Ozone and sulfur dioxide synergism: injury to tobacco plants. *Science*, v. 153, p. 424-425, 1966.
- MILLER, V. L.; HOWELL, R. K.; CALDWELL, B. E. Relative sensitivity of soybean genotypes to ozone and sulfur dioxide. *Journal of Environmental Quality*, v. 3, n. 1, p. 35-37, 1974.
- OLLERENSHAW, J. H.; LYONS, T.; BARNES, J. D. Impacts of ozone on the growth and yield of field grown winter oilseed rape. *Environmental Pollution*, v. 104, p. 53-59, 1999.
- OLSZYK, D. M.; TIBBITTS, T. W. Stomatal response and leaf injury of *Pisum sativum* L. with SO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> exposures. II. Influence of moisture stress and time of exposure. *Plant Physiology*, v. 67, p. 545-549, 1981.

ORMROD, D. P. *Pollution in horticulture*. New York: Elsevier Scientific Publishing Co., 1978. 260 p. (Fundamental Aspects of Pollution Control and Environmental Science).

ORMROD, D. P.; DEVEAU, J. L.; ALLEN, O. B.; BECKERSON, D. W. Crop responses to ozone - sulfur dioxide mixtures. In: HUTCHINSON, T.C.; MEEMA, K.M. (ed.), *Effects of atmospheric pollutants on forests, wetlands and agricultural ecosystems*. New York: Springer-Verlag, 1987. p. 451-462. (NATO ASI Ecological Sciences Series, 16).

REICH, P. B.; AMUNDSON, R. G. Low level O<sub>3</sub> and/or SO<sub>2</sub> exposure causes a linear decline in soybean yield. *Environmental Pollution*, v. 34, p. 345-355, 1984.

REINERT, R. A.; GRAY, T. N. The response of radish to nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and ozone, alone and in combination. *Journal of Environmental Quality*, v. 10, n. 2, p. 240-243, 1981.

REINERT, R. A.; SANDERS, J. S. Growth of radish and marigold following repeated exposure to nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and ozone. *Plant Disease*, v. 66, n. 2, p. 122-124, 1982.

REINERT, R. A.; SHRINER, D. S.; RAWLINGS, J. O. Responses of radish to all combinations of three concentrations of nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and ozone. *Journal of Environmental Quality*, v. 11, n. 1, p. 52-57, 1982.

RODRIGUES, G. S.; MADKOUR, S. A.; WEINSTEIN, L. H. Genotoxic activity of ozone in *Tradescantia*. *Environmental and Experimental Botany*, v. 36, n. 1, p. 45-50, 1996.

RUSTON, A. G. The plant as an index of smoke pollution. *Annals of Applied Biology*, v. 7, n. 4, p. 390-403, 1921.

SANDERS, G. E.; DIXON, J.; COB, A. H. Will increasing ozone pollution associated with global climate change alter crop tolerance to herbicides? In: ATKINSON, D. (ed.), *Global climate change. Its implications for crop protection*. Berks, UK: BCPC. 1993. p. 83-94. (Brighton Crop Protection Conference, 56).

SANDERS, J. S.; REINERT, R. A. Screening azalea cultivars for sensitivity to nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and ozone alone and in mixtures. *Journal of the American Society of Horticultural Sciences*, v. 107, n. 1, p. 87-90, 1982.

SCHAIRES, L. A. Mutagenicity of ambient air at selected sites in the United States using *Tradescantia* as a monitor. In: KOLBER, T.K.; GRANT, L.D.; DeWOSKIN, R.S.; HUGHES, T.J. (ed.), *In situ toxicity testing of environmental agents. Current and future possibilities - Part A: Survey of test systems*. New York: Plenum Press, 1979. p. 167-190.

SCHAIRER, L. A.; SAUTKULIS, R. C.; TEMPEL, N. R. Monitoring ambient air for mutagenicity using the higher plant *Tradescantia*. In: TICE, R.R.; COSTA, D.L.; SCHAICH, K.M. (ed.), *Genotoxic effects of airborne agents*. New York: Plenum Press, 1982. p. 123-140. (Environmental Science Research, 25)

SHERTSZ, R. D.; KENDER, W. J.; MUSSELMAN, R. C. Foliar response and growth of apple trees following exposure to ozone and sulfur dioxide. *Journal of the american association of horticultural sciences*, v. 105, n. 4, p. 594-598, 1980.

SHRINER, D. S.; JOHNSON JR., J. W. The effects of acid rain, alone and in combination with gaseous pollutants, on growth of crop plants. In: HUTCHINSON, T.C.; MEEMA, K.M. (ed.), *Effects of atmospheric pollutants on forests, wetlands and agricultural ecosystems*. New York: Springer-Verlag, 1987. p. 481-491. (NATO ASI Ecological Sciences Series, G 16).

TAYLOR, G. E. JR.; PITELKA, L. F.; CLEGG, M. T. Introduction. In: TAYLOR, G.E.; Jr.; PITELKA, L.F.; CLEGG, M.T. (ed.), *Ecological genetics and air pollution*. New York: Springer-Verlag, 1991. p. 1-9.

TEMPLE, P. J.; TAYLOR, O. C.; BENOIT, L. F. Yield response of head lettuce (*Lactuca sativa* L.) to ozone. *Environmental and Experimental Botany*, v. 26, n. 1, p. 53-58, 1986.

TING, I. P.; PERCHOROWICZ, J.; EVANS, L. Effect of ozone on Plant cell membrane permeability. In: DUGGER, W.M. (ed.), *Air pollution effects on plant growth*. Washington, DC: American Chemical Society, 1974. p. 8-21.

TINGEY, D. T.; REINERT, R. A. The effect of ozone and sulphur dioxide singly and in combination on plant growth. *Environmental pollution*, v. 9, p. 117-125, 1975.

TINGEY, D. T.; REINERT, R. A.; DUNNING, J. A.; HECK, W. W. Foliar injury responses of eleven plant species to ozone/sulfur dioxide mixtures. *Atmospheric Environment*, v. 7, p. 201-208, 1973.

TRESHOW, M. Diagnosis of air pollution effects and mimicking symptoms. In: TRESHOW, M. (ed.), *Air pollution and plant life*. New York: John Wiley & Sons, 1984. p. 97-112.

UNSWORTH, M. Adding ethylene to injury. *Nature*, v. 327, p. 364-365, 1987.

VAN'T HOF, J.; SCHAIRER, L. A. *Tradescantia* assay system for gaseous mutagens. A report of the U.S. Environmental Protection Agency Gene-Tox Program. *Mutation Research*, v. 99, p. 303-315, 1982.

WINNER, W. E.; COLEMAN, J. S.; GILLESPIE, C.; MOONEY, H. A.; PELL, E. J. Consequences of evolving resistance to air pollutants. In: TAYLOR, G.E. Jr.; PITELKA, L.F.; CLEGG, M.T. (ed.), *Ecological genetics and air pollution*. New York: Springer-Verlag, 1991. p. 177-202.

WOLTERS, J. H. B.; MARTENS, M. J. M. Effects of air pollutants on pollen. *The Botanical Review*, v. 53, n. 3, p. 372-414, 1987.

WUKASCH, R. T.; HOFSTRA, G. Ozone and Botrytis interactions in onion-leaf dieback: open-top chamber studies. *Phytopathology*, v. 67, p. 1080-1084, 1977.



## **Seção II**

---

# **Emissões de Gases de Efeito Estufa por Atividades Agrícolas no Brasil e Opções para Mitigação**



## Estimativa das Emissões de Gases de Efeito Estufa Provenientes de Atividades Agrícolas no Brasil

MAGDA APARECIDA DE LIMA, RITA CARLA BOEIRA, VERA LÚCIA S. S. CASTRO,  
MARCO ANTÔNIO V. LIGO, OSVALDO MACHADO R. CABRAL,  
ROSANA FARIA VIEIRA, ALFREDO JOSÉ BARRETO LUIZ  
*Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP, Brasil*

**Resumo.** *A agricultura e a pecuária contribuem para as emissões antrópicas de metano ( $CH_4$ ), monóxido de carbono (CO), óxido nitroso ( $N_2O$ ) e óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ) à atmosfera terrestre. O aumento da concentração desses gases, gerados também por outras atividades humanas, tem sido associado ao aquecimento da superfície terrestre. O Brasil, enquanto signatário da Convenção Quadro de Mudança de Clima, tem realizado inventários de emissões de gases gerados por suas atividades agrícolas, industriais e urbanas. As estimativas das emissões de gases metano ( $CH_4$ ), monóxido de carbono (CO), óxido nitroso ( $N_2O$ ) e óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ) provenientes de atividades agrícolas no país, incluindo cultura de arroz sob regime de inundação, queima de resíduos agrícolas (cana-de-açúcar e algodão), fermentação entérica, manejo de resíduos da pecuária e solos agrícolas são apresentadas neste capítulo. Os métodos de estimativa desses gases foram os recomendados pelo Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC.*

### Estimates of Greenhouse Gas Emissions from Agricultural Activities in Brazil

**Abstract.** *Agriculture contributes for anthropogenic emissions of methane ( $CH_4$ ), carbon monoxide (CO), nitrous oxide ( $N_2O$ ) and nitrogen oxides ( $NO_x$ ) to the atmosphere. The increase in concentration of those gases, produced also by other human activities, has been linked to the greenhouse effect. As a signatory of the Framework Convention on Climate Change, Brazil has been carrying out inventories of gas*

*emissions from the various economic activities in the country. Current estimates of methane, CO, N<sub>2</sub>O, e NO<sub>x</sub> emissions from agricultural activities, which include flooded rice cultivation, burning of crop residue (sugar cane and herbaceous cotton), enteric fermentation in ruminants, the management systems of animal wastes and agricultural soils are presented in this section. The inventory methodology used in the estimates complies with the guidelines issued by the Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC.*

## Introdução

O cultivo de arroz irrigado por inundação, a queima de resíduos agrícolas, o processo de fermentação entérica da pecuária ruminante e os dejetos desta, bem como o uso agrícola dos solos constituem importantes fontes de liberação de gases de efeito estufa à atmosfera terrestre.

Os campos de arroz inundados e a pecuária ruminante, assim como a queima de resíduos agrícolas promovem a liberação de metano (CH<sub>4</sub>) na atmosfera. Cerca de 55% das emissões antrópicas de metano provêm da agricultura e pecuária juntas (IPCC, 1995, 1996). Os solos agrícolas, pelo uso de fertilizantes nitrogenados, fixação biológica de nitrogênio, adição de dejetos animais, incorporação de resíduos culturais, entre outros fatores, contribuem com significativas emissões de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). A queima de resíduos agrícolas nos campos liberam, além de metano, óxido nitroso, óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e monóxido de carbono (CO) na atmosfera. As Tabelas 1, 2, 3 e 4 mostram as estimativas de emissões globais de CH<sub>4</sub>, CO, N<sub>2</sub>O e NO<sub>x</sub> derivadas de fontes antrópicas, incluindo as de origem agropecuária.

A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, adotada em 1992 com o objetivo de alcançar a estabilização das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera a um nível que impeça uma interferência antrópica perigosa no sistema climático, requer dos países-membros, entre outros compromissos, a realização de inventários periódicos de fontes de emissão desses gases bem como de sumidouros. Para isso, manuais de inventariamento foram elaborados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC), com a metodologia de referência para as estimativas nacionais de emissão de gases.

## Atividades Agrícolas Geradoras de Gases de Efeito Estufa

### *Arroz Irrigado por Inundação*

O cultivo de arroz irrigado por inundação representa, em âmbito global, uma das principais fontes antrópicas de metano ( $\text{CH}_4$ ) (Schutz et al. (1991); Minami & Neue (1994)). Segundo o Painel Intergovernamental de Mudança Climática – IPCC (1996), estima-se de 20 a 100 teragramas (média de 60 Tg<sup>1</sup>) por ano a emissão global desse gás nos campos de arroz irrigado, o que corresponde a 16% do total de emissão de todas as fontes. Do total de metano gerado por essa fonte, 90% é atribuído ao continente asiático. Mais de 50% da população humana mundial utiliza o arroz como alimento básico, sendo que entre 1998 e 1999 foram cultivados 151 milhões de hectares de terras, atingindo uma produção global de 570 milhões de toneladas (FNP, 1999). A tendência de crescimento da população sinaliza para o aumento da produção mundial de arroz e conseqüentemente da necessidade de aumento de área cultivada ou da eficiência produtiva.

O metano é produzido no solo pela decomposição anaeróbica de substâncias orgânicas, mediante a ação de bactérias (metanogênicas) que requerem condições altamente reduzidas para seu crescimento, como as encontradas em solos cultivados com arroz inundado. O gás é liberado para a atmosfera principalmente por transporte difusivo, pelo aerênquima (tecido vascular) das plantas de arroz e também por difusão através da lâmina d'água. Bont et al. (1978) conduziram experimentos mostrando que a presença de plantas de arroz facilita o escape de metano para atmosfera por um fator de 7 a 10 vezes maior em relação aos solos inundados sem cultivo de arroz.

---

<sup>1</sup> Tg = Teragrama ( $10^{12}$  grama)

**Tabela 1** - Estimativa global das emissões médias de CH<sub>4</sub> por fontes naturais e antrópicas (em Tg de CH<sub>4</sub>/ano). Entre parênteses, indica-se o intervalo de variação

Fontes	Estimativa individual	Total
Fontes naturais		
Terras baixas	115 (55-150)	
Térmitas	20 (10-50)	
Oceanos	10 (5-50)	
Outras	15 (10-40)	
Total		160 (110-210)
Fontes antrópicas		
Combustível fóssil total		100 (70-120)
Carbono biosférico		
Fermentação entérica	85 (65-100)	
Campos inundados de arroz	60 (20-100)	
Queima de biomassa	40 (20-80)	
Aterros	40 (20-70)	
Dejetos animais	25 (20-30)	
Lodo de esgoto	25 (15-80)	
Total		275 (300-350)
Total de fontes antrópicas		375 (300-450)
<b>Total das Fontes</b>		<b>535 (410-660)</b>

Fonte: IPCC, 1995

**Tabela 2** - Estimativa global das emissões médias de CO por fontes naturais e antrópicas (em Tg(CO)/ano). Entre parênteses, indica-se o intervalo de variação

Fontes	Estimativa individual	Total
Fontes		
Tecnológicas	300-550	
Biológicas	60-160	
Queima de biomassa	300-700	
Oceanos	20-200	
Oxidação do metano	400-1000	
Oxidação do hidrocarbono não-metano (NMHC)	200-600	
<b>Total das Fontes</b>		<b>1.800-2.700</b>

Fonte: IPCC, 1995

**Tabela 3** - Estimativa global das emissões médias de  $N_2O$  por fontes naturais e antrópicas (em  $Tg(N_2O)/ano$ ). Entre parênteses, indica-se o intervalo de variação

Fontes	Estimativa individual	Total
Fontes naturais (oceanos, florestas, savanas, pradarias)		9 (6-12)
Fontes antrópicas		
Solos cultivados	3,5 (1,8 – 5,3)	
Queima de biomassa	0,5 (0,2 – 1,0)	
Fontes industriais	1,3 (0,7-1,8)	
Gado e confinamentos	0,4 (0,2-0,5)	
Total fontes antrópicas		5,7 (3,7-7,7)
Total das Fontes		14,7 (10-17)

Fonte: IPCC, 1995

**Tabela 4** - Estimativa global das emissões médias de  $NO_x$  por fontes naturais e antrópicas (em  $Tg(N)/ano$ ). Entre parênteses, indica-se o intervalo de variação

Fontes	Estimativa individual	Total
Combustão de combustível fóssil	24	
Emissão do solo (natural e antrópica)	12	
Queima de biomassa	8	
Relâmpago	5	
Oxidação de amônia	3	
Avião	0,4	
Transporte a partir da estratosfera	0,1	
Total das Fontes		52,5

Fonte: IPCC, 1995

No Brasil, o arroz cultivado sob regime de inundação encontra-se em grande parte na Região Sul (1,09 milhão de ha em 1994), notadamente no Estado do Rio Grande do Sul (87% da região). O cultivo de arroz em sistema de várzea corresponde a 8% do total de arroz cultivado sob regime de inundação no país (considerando os 148 mil ha estimados em 1994), e é praticado principalmente nos Estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Sergipe e Pará.

### *Queima de Biomassa Vegetal*

No processo de queima de biomassa na agricultura, são produzidos o óxido nítrico ( $N_2O$ ) e óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ), durante a fase de combustão com chama, e o monóxido de carbono (CO) e o metano ( $CH_4$ ), quando há predomínio de fumaça. As taxas de emissão desses gases dependem do tipo de biomassa e da eficiência da queima.

Estima-se que cerca de 40% dos resíduos agrícolas produzidos anualmente nos países em desenvolvimento (425 Tg de biomassa seca) sejam queimados no campo (Jallow, 1995). Segundo o IPCC (1995) os resíduos da cana-de-açúcar representam 11% da produção mundial de resíduos agrícolas, cuja queima produz substancial liberação de  $CO_2$ . Esta não é considerada uma emissão líquida, pois através da fotossíntese, a biomassa queimada é repostada no ciclo seguinte da cultura.

As estimativas globais de emissão dos gases de efeito estufa associados à queima de biomassa, incluindo florestas e savanas, segundo o IPCC (1995), são de 0,8 (0,3 - 1,6) Tg de  $N_2O$  /ano; 26,3 Tg de  $NO_x$  /ano; 40 (20 - 80) Tg de  $CH_4$  /ano e (300 - 700) Tg de CO/ano. Considerando-se que as emissões antrópicas de  $N_2O$  encontram-se entre 5,8 e 12,1 Tg de  $N_2O$  /ano, e de  $CH_4$  entre 300 e 450 Tg de  $CH_4$  /ano, as emissões de  $N_2O$  decorrente da queima de biomassa, em geral, contribui entre 5,2% e 13,2%, e as emissões de  $CH_4$ , com 6,7% e 17,8% do total emitido.

### *A Queima de Resíduos Agrícolas no Brasil - Algodão Herbáceo e Cana-de-Açúcar*

A queimada é uma prática ainda adotada em grande escala no Brasil, principalmente nos canaviais e em menor escala em nos algodoais. Normalmente a colheita de cana-de-açúcar é feita após a queima dos resíduos (folhas secas, folhas verdes e pontas). A eliminação das folhas aumenta o rendimento do corte manual dos colmos, elimina animais peçonhentos e facilita o preparo do solo para novo plantio. A colheita mecanizada, que dispensa a queima, é uma prática de adoção recente, utilizada em 5% das áreas produtoras do país. Suas vantagens, além de diminuir as emissões de gases, estão no favorecimento de uma maior cobertura do solo e na melhor qualidade tecnológica da cana crua.

Grande parte da produção de algodão no país (90%) provém do algodoeiro de ciclo anual, herbáceo, cuja produção principal é constituída por sementes e fibras. Raízes, ramos, folhas e cápsulas da planta constituem os resíduos, que são queimados após a colheita, como parte de um sistema de manejo que visa eliminar focos de pragas e doenças. Acredita-se que cerca de 25% a 50% dos resíduos de algodão sejam expostos à queima no país, com exceção da região Nordeste, onde a utilização dos restos culturais para alimentação animal é prática frequente, e portanto as produções dessa região não são consideradas como fontes de emissões de gases.

### *Pecuária*

A pecuária, especialmente a ruminante, constitui uma importante fonte de emissão de metano em uma escala global. Além de originar-se nos processos digestivos, que ocorrem no estômago (rúmen) do animal, o metano é emitido também a partir de dejetos animais, manipulados, principalmente, na forma líquida. As emissões globais de metano a partir dos processos entéricos são calculadas em 85 Tg/ano (valor médio aproximado), correspondendo a cerca de 22% das emissões totais de metano geradas por fontes antrópicas, e as provenientes de dejetos animais são estimadas em cerca de 25 Tg/ano (IPCC, 1995), correspondendo a 7% das emissões totais.

### *Processo de Fermentação Entérica*

A produção de metano é parte do processo digestivo dos herbívoros ruminantes e ocorre no rúmen. A fermentação que ocorre durante o metabolismo dos carboidratos do material vegetal ingerido é um processo anaeróbico efetuado pela população microbiana ruminal e converte os carboidratos celulósicos em ácidos graxos de cadeia curta, principalmente ácidos acético, propiônico e butírico. Nesse processo fermentativo, é dissipado calor pela superfície corporal e são produzidos dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e metano ( $\text{CH}_4$ ). A fase gasosa do rúmen dorsal contém geralmente de 50% a 70% de  $\text{CO}_2$ . O resto é constituído de metano e pequenas concentrações de outros gases como hidrogênio, nitrogênio e oxigênio. As bactérias metanogênicas do rúmen, em especial *Archaeobacteria*, utilizam o hidrogênio e o dióxido de carbono na produção de metano. Entretanto, a metanogênese tem um grande efeito na formação de diversos produtos finais, na quantidade de ATP gerada e finalmente na eficiência

da microbiota ruminal ou no processo de síntese de proteína microbiana (Dukes & Swenson, 1977; Van Nevel & Demeyer, 1996). No caso de herbívoros falso-ruminantes (cavalos, mulas, asnos) o metano também é produzido, mas em quantidades bem menores devido à ausência do rúmen. Nesses animais a ação bacteriana ocorre até certo ponto no intestino grosso e é de grande significado no caso do cavalo e do coelho (Maynard & Loosli, 1974).

A intensidade da emissão de metano depende do tipo de animal, da quantidade e grau de digestibilidade da massa digerida e do esforço ao qual o animal se submete. A emissão de metano varia entre 4% e 9% da energia bruta do alimento ingerido, em média de 6%. Desde que a produção de metano varia de acordo com a quantidade e qualidade do alimento digerido (U.S. EPA, 1990), as várias modalidades e condições de sistemas de criação de animais domésticos implicam fatores diferentes de emissão de metano.

Os ruminantes nos trópicos e subtropicais experimentam flutuações sazonais na qualidade das pastagens e no suprimento de alimentos. Isso resulta em um padrão sazonal de ganho de peso na estação úmida e perda de peso na estação seca, que ocorre a partir de 3,5 anos de idade, dependendo das condições climáticas e do tipo de solo. Alguns autores encontraram valores médios de taxas de digestibilidade de matéria seca de gramíneas e leguminosas tropicais em 54% e 57%, respectivamente (Poppi & McLennan, 1995).

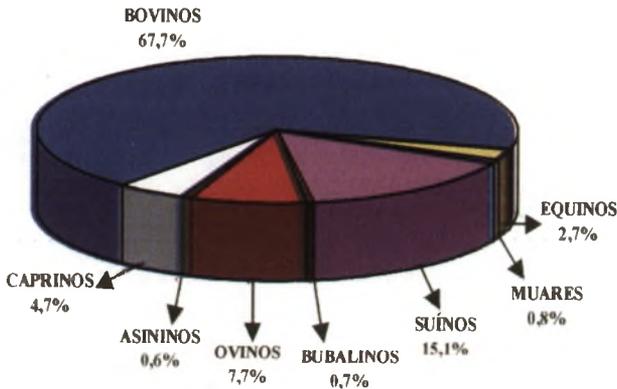
### *Manejo de Dejetos Animais*

Os dejetos animais, quando são estocados na forma líquida, em lagoas e tanques por exemplo, favorecem a condição de anaerobiose. Nesta condição, as bactérias metanogênicas podem produzir quantidades consideráveis de metano. O potencial dos dejetos em gerar metano pode ser expresso em metano/kg de sólidos voláteis (SV) de material residual. Os valores variam de 0,17 a 0,49 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>/kg SV - média de 0,25 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>/kg SV.

### *Números da Pecuária no Brasil*

Em 1995, 67,7% dos efetivos da pecuária brasileira eram representados por bovinos (Figura 1), 87% dos quais correspondentes a gado de corte e 13% a gado de leite. De 1980 a 1996, a população bovina dobrou em número devido em grande parte à expansão da atividade agropecuária do Sul em direção ao Centro Oeste e Norte do país (Peetz et al., 1997, citados em Ferreira et al., 1999). Em 1996 a população bovina no país era estimada em 158,3 milhões de

cabeças. A maior parte do gado, predominantemente zebuínio, é criada em regime de pastoreio.



**Figura 1** - Distribuição das categorias animais por número de efetivos cabe na pecuária brasileira em 1995 (segundo IBGE, 1995b)

A proporção de gado confinado no país em 1996 era de cerca de 1%, segundo estimativas do ANUALPEC'98 (FNP, 1997) indicando uma fração pequena de sistemas de tratamento de dejetos.

### *Solos agrícolas*

O aumento das adições de fertilizantes nitrogenados sintéticos aos solos agrícolas tem sido indicado como principal responsável pelas crescentes emissões de  $N_2O$  na atmosfera. Outras fontes antrópicas desse gás incluem o nitrogênio proveniente de resíduos animais, da fixação biológica de nitrogênio aumentada, do cultivo de solos orgânicos e minerais através da mineralização da matéria orgânica adicionada (IPCC, 1996).

Estima-se que as emissões antrópicas globais de  $N_2O$  sejam de 3,7 a 7,7 Tg N/ano, com uma média provável estimada em 5,7 Tg N/ano (IPCC, 1995). Utilizando dados da FAO, de 1989, e a metodologia do IPCC, as emissões diretas de  $N_2O$  a partir de solos agrícolas são estimadas em 2,5 Tg N, as emissões diretas de animais de pastoreio em 1,6 Tg de N, e as emissões indiretas resultantes de nitrogênio de origem agrícola na atmosfera e sistemas aquáticos

em 1,9 Tg N-N<sub>2</sub>O (IPCC, 1996).

As emissões de N<sub>2</sub>O dos solos ocorrem principalmente como consequência da desnitrificação a partir de nitrogênio mineral (N). A desnitrificação<sup>1</sup> consiste na redução microbiana do nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) à formas intermediárias de N e então às formas gasosas (NO, N<sub>2</sub>O e N<sub>2</sub>) que são comumente perdidas para a atmosfera. Quando da redução do nitrato, a matéria orgânica é oxidada para a obtenção de energia pelos microorganismos. Enzimas específicas participam do processo e suas atividades podem ser bastante variáveis em função dos tipos de solos. A atividade potencial da redutase do óxido nitroso no solo é um dos fatores que controlam a emissão deste gás.

A produção de N<sub>2</sub>O está também sujeita às influências decorrentes do tipo de manejo a que os solos são submetidos. As diferenças de emissão de N<sub>2</sub>O em diferentes tipos de solos têm sido relacionadas principalmente ao comportamento hidráulico dos solos e sua capacidade de redução de N<sub>2</sub>O (Henault et al., 1998). Este é um fato esperado, uma vez que o conteúdo de água no solo regula a sua disponibilidade de oxigênio. Assim, a capacidade do solo em emitir N<sub>2</sub>O parece ser altamente dependente da precipitação pluviométrica. Henault et al. (1998) inferiram também que as plantas e o pH poderiam ter um efeito específico sobre a capacidade das enzimas em reduzir N<sub>2</sub>O.

Medições *in situ* de emissões de N<sub>2</sub>O, sob diferentes tipos de solo e sistemas de cultivo são ainda necessárias para se obter estimativas globais mais precisas. Grande parte dos trabalhos, segundo Kaiser et al. (1998) não são contínuos e enfocam a estação de crescimento, negligenciando períodos de inverno, quando ainda podem ocorrer emissões de N<sub>2</sub>O. Além disso, diferentes culturas agrícolas influenciam distintamente na emissão de N<sub>2</sub>O. Em seus estudos, as menores perdas de N<sub>2</sub>O foram observadas para culturas de trigo de inverno e as maiores perdas em culturas de beterraba, embora nesta última cultura tenha sido utilizado menor quantidade de fertilizante nitrogenado (Kaiser et al., 1998).

Vargas et al. (1997) estudaram o efeito de sistemas de cultivo em solos da região do cerrado (Planaltina, DF) na emissão de óxido nitroso, comparando-os com os de áreas de cerrado nativo. Em áreas de pastagens (simples e consorciada) e áreas cultivadas houve, na estação seca, um aumento de 35,7% e de 51,1%, respectivamente, na emissão desse gás, quando comparado às

<sup>1</sup> Desnitrificação: NO<sub>3</sub><sup>-</sup> => NO<sub>2</sub> => 2NO => N<sub>2</sub>O => N<sub>2</sub>.

áreas de cerrado nativo. As emissões foram maiores durante a estação úmida, sendo que nas pastagens simples o aumento foi de 90,2%; em pastagem consorciada 94,6% e em área cultivada (milho e soja) 123,9%.

No Brasil, entre 1995-96, segundo dados do IBGE (1998), cerca de 14% das terras utilizadas eram ocupadas por lavouras (50,1 milhões de hectares) e 50% por pastagens (177,7 milhões de hectares). Do total da área cultivada nesse período, cerca de 15% correspondiam às culturas permanentes (7,5 milhões de hectares em 1994) e 85% às culturas temporárias (42,6 milhões de hectares). A região Sul apresentava a maior extensão de áreas cultivadas (27%), apresentando também as maiores taxas de consumo de fertilizantes nitrogenados do país. As plantações de soja empregam em grande parte inoculantes microbiológicos para a fixação de nitrogênio, levando a acréscimos de nitrogênio no solo, e conseqüentemente, favorecendo o processo de desnitrificação de nitrogênio mineral. Ambas essas fontes, além das adições de dejetos animais e resíduos orgânicos aos solos como fertilizantes, contribuem para a liberação de óxido nitroso na atmosfera.

#### *Estimativa das Emissões de Gases de Efeito Estufa Provenientes de Atividades Agrícolas no Brasil*

As estimativas das emissões dos gases  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{NO}_x$  geradas pelo cultivo de arroz irrigado por inundação, queima de resíduos agrícolas (cana-de-açúcar e algodão), pecuária (fermentação entérica e manejo de dejetos) e solos agrícolas, para o ano de 1994, são apresentadas na Tabela 5. Em termos relativos, a pecuária e o uso agrícola dos solos constituem as principais fontes de emissões de gases de efeito estufa no setor agropecuário. Aos Estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Goiás e Rio Grande do Sul corresponderam as maiores emissões de metano estimadas em 1994 (Tabela 6), devido principalmente à atividade pecuária. O Estado de São Paulo foi associado às maiores emissões relativas de  $\text{CO}$  e  $\text{NO}_x$ , devido à queima da cana-de-açúcar, e as maiores contribuições em emissão de  $\text{N}_2\text{O}$  estão associadas aos Estados do Rio Grande do Sul, São Paulo e Minas Gerais, devido ao intenso uso agrícola dos solos. As Figuras 2, 3, 4 e 5 mostram as distribuições das emissões totais absolutas dos gases  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_x$  e  $\text{N}_2\text{O}$  provenientes de atividades agrícolas nos estados brasileiros, estimadas para o ano de 1994.

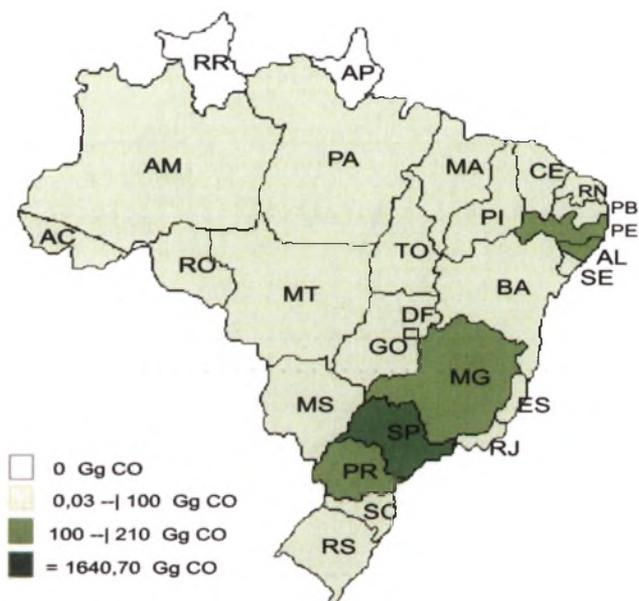
**Tabela 5** - Estimativas de emissões totais de gases de efeito estufa provenientes de atividades agrícolas no Brasil em 1994 (Embrapa, 1998, 1999a, 1999b, 1999c)

Fonte	CH <sub>4</sub>	CO	N <sub>2</sub> O	NO <sub>x</sub>
Valores em teragramas (Tg)				
Arroz irrigado	0,28	-	-	-
Queima de resíduos agrícolas				
Cana-de-açúcar	0,13	2,73	0,0064	0,23
Algodão	0,003	0,06	0,0002	0,01
Subtotal	0,133	2,79	0,0066	0,24
Pecuária				
Fermentação entérica	9,38			
Manejo de dejetos animais	0,39		0,0065	
Subtotal	9,77	-		-
Solos agrícolas	-	-	0,32	-
<b>Total</b>	<b>10,183</b>	<b>2,79</b>	<b>0,34</b>	<b>0,24</b>

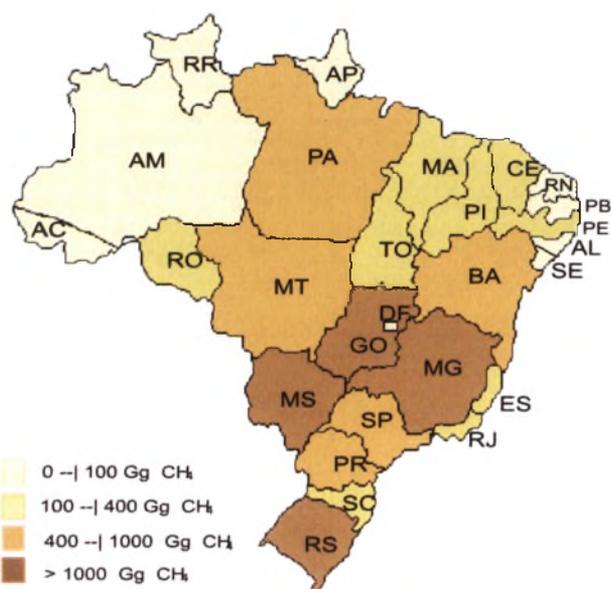
Tg = 10<sup>12</sup> gramas**Tabela 6** - Estimativas de emissões de gases de efeito estufa provenientes de atividades agrícolas no Brasil, por região, em 1994

Região	Emissões de gases em 1994			
	CH <sub>4</sub>	CO	N <sub>2</sub> O	NO <sub>x</sub>
Teragramas (Tg)				
Norte	1,106	0,010	0,052	0,001
Nordeste	1,666	0,536	0,094	0,045
Sudeste	2,422	1,880	0,134	0,160
Sul	1,904	0,189	0,116	0,017
Centro-Oeste	3,090	0,172	0,130	0,015
<b>Brasil</b>	<b>10,188</b>	<b>2,787</b>	<b>0,526</b>	<b>0,238</b>

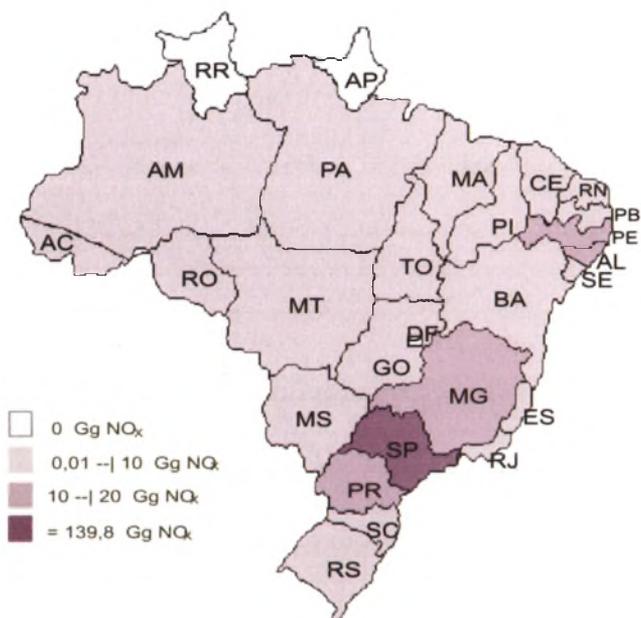
Tg = 10<sup>12</sup> gramas



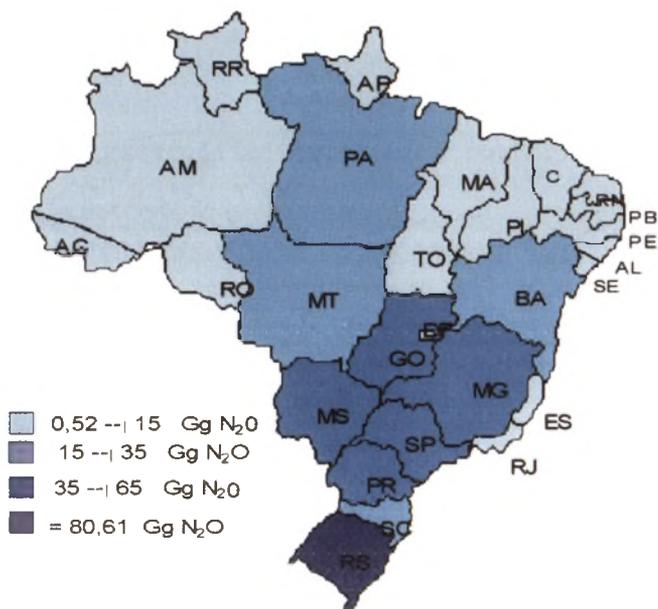
**Figura 2** - Distribuição das emissões absolutas de CO provenientes de atividades agrícolas no Brasil (dados relativos à 1994)



**Figura 3** - Distribuição das emissões absolutas de CH<sub>4</sub> provenientes de atividades agrícolas no Brasil (dados relativos à 1994)



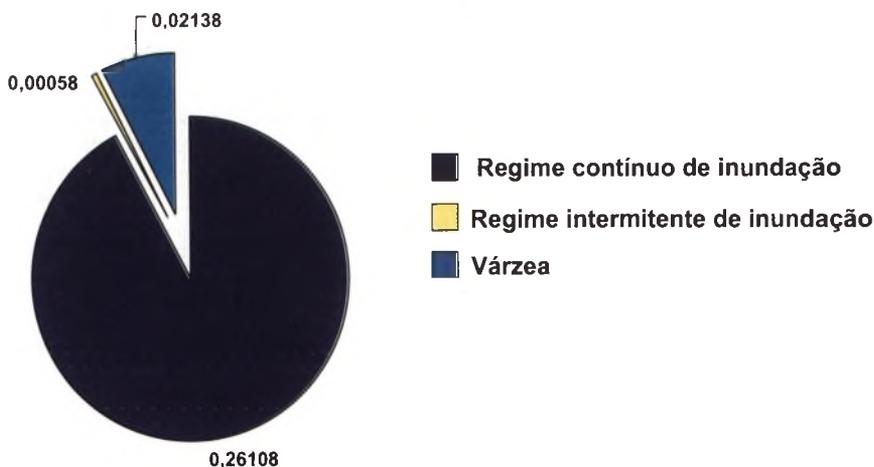
**Figura 4** - Distribuição das emissões absolutas de  $\text{NO}_x$  provenientes de atividades agrícolas no Brasil (dados relativos a 1994)



**Figura 5** - Distribuição das emissões absolutas de  $\text{N}_2\text{O}$  provenientes de atividades agrícolas no Brasil (dados relativos a 1994)

### Arroz Irrigado por Inundação

As emissões totais de metano provenientes do cultivo de arroz inundado no Brasil foram estimadas em 0,28 Tg em 1994. Para o período de 1986-1996, foram estimadas emissões de  $0,27 \pm 0,017$  Tg de metano, em média. A Figura 6 mostra as contribuições em emissões de metano proveniente do cultivo de arroz irrigado no Brasil, sob diferentes regimes de inundação. Cerca de 77% do total dessas emissões são atribuídas ao cultivo de arroz irrigado na Região Sul do país, especialmente no Rio Grande do Sul.



**Figura 6** - Emissão de metano provenientes de cultivo de arroz inundado, por regime de água, no Brasil em 1994 (Embrapa, 1998)

### Queima de Resíduos Agrícolas

Na Tabela 7 mostram-se os dados estimados de emissões de gases gerados na queima de resíduos agrícolas de canaviais e algodoads brasileiros para o ano de 1994. A queima de cana-de-açúcar na pré-colheita contribuiu com 98% do total das emissões de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}$  e com 97% das emissões de  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{NO}_x$  causadas pela queima de resíduos de colheita no Brasil. No caso do algodão, a área total colhida e a produção em caroço diminuíram significativamente entre 1990 e 1996 (cerca de 40%), promovendo, conseqüentemente, decréscimos nas emissões

(cerca de 44%) de gases.

Recentes instrumentos legais regulamentando o uso da queima da cana-de-açúcar na pré-colheita, bem como as mudanças de manejo verificadas na cultura do algodão, indicam um cenário de eliminação progressiva da prática de queima e, em decorrência disso, das emissões de gases por essa fonte no país.

**Tabela 7** - Média das produções brasileiras de algodão e de cana-de-açúcar, no ano de 1994, e das emissões de gases de efeito estufa decorrente da queima dos resíduos

Gases	Emissões (em Tg) *				
	Queima de resíduos de algodão Brasil	Queima de cana-de-açúcar Brasil	Queima de resíduos (cana+algodão) Brasil	Queima de biomassa global **	Estimativa de emissões antrópicas globais **
CH <sub>4</sub>	0,003	0,130	0,133	40	375
CO	0,057	2,730	2,787	500	2.250
N <sub>2</sub> O	< 0,001	0,006	0,006	0,8	8,9
NO <sub>x</sub>	0,007	0,232	0,239	26	52

\* Tg = 10<sup>12</sup>g

\*\* IPCC (1995)

Fonte: Embrapa, 1999a

### *Pecuária*

No ano de 1994 foram estimadas emissões de metano proveniente da pecuária em 9,77 Tg/ano (Embrapa, 1999b), das quais 9,38 Tg (96%) foram atribuídas à fermentação entérica e 0,39 Tg (4%) ao manejo de dejetos animais. Do total de emissões estimadas para a pecuária, a categoria de gado de corte contribuiu com 81%. Em termos regionais, as maiores contribuições de metano foram associadas ao Centro-Oeste e ao Sudeste, com 3,09 Tg (30%) e 2,42 Tg (24%), respectivamente.

## *Solos Agrícolas*

Estimou-se no Brasil, para o ano de 1994, emissões de  $N_2O$  provenientes de solos agrícolas na ordem de 0,32 Tg, das quais 0,08 Tg corresponderam às emissões de fontes diretas de solos agrícolas (24%), 0,14 Tg às fontes diretas a partir de animais (44%) e 0,10 Tg às fontes indiretas (32%). A adição de resíduos agrícolas aos solos vem a ser o principal fator responsável pelas emissões diretas de  $N_2O$ , contribuindo em 1994 com 0,027 Tg de N. Dejetos de gado de leite e de corte depositados nos solos como esterco contribuíram juntos com 0,12 Tg (85%) das emissões de  $N_2O$  a partir da produção animal. Entre as fontes indiretas, o nitrogênio lixiviado ou escoado foi o principal fator de emissão de  $N_2O$ , contribuindo com 0,076 Tg (74%) do total de 0,095 Tg de N. A média das emissões totais de  $N_2O$  provenientes de solos agrícolas no período de 1993 a 1995 foi estimada em  $0,32 \pm 0,009$  Tg (Embrapa, 1999c).

## **Considerações Finais**

O inventário nacional de emissões de gases provenientes do setor agrícola, realizado pela Embrapa, contou com a colaboração de especialistas de cerca de 70 instituições nacionais e estaduais ligadas aos diversos segmentos do setor. O refinamento desse inventário dependerá de informações de base mais precisas, e de pesquisas voltadas à avaliação das emissões de gases atmosféricos em sistemas de produção vegetal e animal. Essas informações serão fundamentais para subsidiar estudos visando a redução das emissões gasosas, de forma a considerar não só a questão da otimização da produção, como também a sustentabilidade do ponto de vista social, econômica e ambiental do sistema agrícola brasileiro, considerando a diversidade ecossistêmica que o país apresenta.

## **Agradecimentos**

Gostaríamos de expressar nossos agradecimentos a todos os profissionais que colaboraram para a realização do inventário nacional das emissões de gases provenientes do setor agrícola, com o fornecimento de dados

e informações para cada região do país, e em particular aos colegas das unidades descentralizadas da Embrapa que se dispuseram a dividir o seu conhecimento conosco, para melhor caracterizar o perfil da agropecuária nacional. Cerca de sessenta instituições colaboraram para a realização desse inventário, de modo que a elas reiteramos nossos agradecimentos. Os nomes dessas instituições estão disponibilizados nos relatórios da Embrapa, encaminhados à Coordenadoria de Pesquisa em Mudanças Globais (CPMG), do Ministério da Ciência e Tecnologia. O inventário das emissões de gases de efeito estufa provenientes de atividades agrícolas, conduzido pela Embrapa, foi financiado pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD, e pelo U.S. Country Studies, sob a administração do Projeto BRA/95/G-31, coordenado pela CPMG.

## Referências Bibliográficas

BONT, J.A.M. de; LEE, K.K.; BOULDIN, D.F. Bacterial oxidation of methane in a rice paddy. *Ecol. Bull.*, Stockholm, v. 26, p. 91-96, 1978.

CAI, Z.; XING, G.; YAN, X.; XU, H.; TSURUTA, H.; YAGI, K.; MINAMI, K. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilisers and water management. *Plant and Soil*, v. 196, n. 1, p. 7-14. 1997.

DUKES, H.H.; SWENSON, M.J. *Fisiologia de los animales domesticos*. Funciones vegetativas. Madrid: Aguilar. 1977. p. 1054.

EMBRAPA. *Inventário de emissões de gases de efeito estufa provenientes de atividades agrícolas no Brasil*: emissões de metano provenientes de arroz irrigado por inundação (relatório revisado). Jaguariúna, 1998.

EMBRAPA. *Inventário de emissões de gases de efeito estufa provenientes de atividades agrícolas no Brasil*: emissões de gases de efeito estufa provenientes da queima de resíduos agrícolas (relatório revisado). Jaguariúna, 1999a.

EMBRAPA. *Inventário de emissões de gases de efeito estufa provenientes de atividades agrícolas no Brasil*: emissões de metano provenientes da pecuária (relatório revisado). Jaguariúna, 1999b.

EMBRAPA. *Inventário de emissões de gases de efeito estufa provenientes de atividades agrícolas no Brasil: emissões de óxido nitroso provenientes de solos agrícolas (relatório revisado)*. Jaguariúna, 1999c.

FERREIRA, C.R.R.P.T.; VEGRO, C.L.R.; BORTOLETO, E.E.; FRANCISCO, V.L.F. dos S. Caracterização da pecuária bovina no Estado de São Paulo. *Informações Econômicas*, v. 29, n. 2, p. 1-24. 1999.

FNP. *Anualpec '97: Anuário da Pecuária Brasileira*. São Paulo: FNP. 1997. 329 p.

FNP. *Agrianual 2000: Anuário da Agricultura Brasileira*. São Paulo: FNP, 1999. 546 p.

HENAULT, C.; DEVIS, X.; PAGE, S.; JUSTES, E.; REAU, R.; GERMON, J.C. *Nitrous oxide emissions under different soil and land management conditions*. *Biol. Fertil. Soils*, v. 26, p. 199-207, 1998.

HUANG, Y.; SASS, R.L.; FISHER Jr., F.M. A semi-empirical model of methane emission from flooded rice paddy soils. *Global change biology*, v. 4, p. 247-268, 1998.

IBGE - *Anuário estatístico do Brasil: 1987/88*. Rio de Janeiro: IBGE, 1988aa. v. 48.

IBGE - *Anuário estatístico do Brasil: 1989*. Rio de Janeiro: IBGE, 1989ab. v. 49.

IBGE - *Anuário estatístico do Brasil: 1990*. Rio de Janeiro: IBGE, 1990ac. v. 50.

IBGE - *Anuário estatístico do Brasil: 1992*. Rio de Janeiro: IBGE, 1991ad. v. 51.

IBGE - *Anuário estatístico do Brasil: 1992*. Rio de Janeiro: IBGE, 1992ae. v. 52.

IBGE - *Anuário estatístico do Brasil: 1993*. Rio de Janeiro: IBGE, 1993af. v. 53.

IBGE - *Anuário estatístico do Brasil: 1994*. Rio de Janeiro: IBGE, 1994ag. v. 54.

IBGE - *Anuário estatístico do Brasil: 1995*. Rio de Janeiro: IBGE, 1995ah. v. 55.

IBGE - *Anuário estatístico do Brasil: 1996*. Rio de Janeiro: IBGE, 1996ai. v. 56.

IBGE - *Produção da pecuária municipal (PPM) - 1994*. Rio de Janeiro: IBGE, 1994ba.

IBGE - *Produção da pecuária municipal (PPM) - 1994*. Rio de Janeiro: IBGE, 1994bb.

IBGE. *Censo agropecuário 1995-1996: Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE, 1998c.

IPCC. *Climate change 1995. Impacts, adaptations and mitigation of climate change: Scientific-technical analysis*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 878 p.

IPCC. *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual*. 1996.

JALLOW, B.P. Emissions of the greenhouse gases from agriculture, land-use change and forestry in the Gambia. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 38, p. 301-312, 1995.

JENKINS, B.M.; TURN, S.Q.; WILLIAMS, R.B.; GORONEA, M.; ABD-EL-FATTAH, H.; MEHLSCHAU, N.; RAUBACH, N.; WHALEN, S.A.; CHANG, D.P.Y.; KANG, M.; TEAGUE, S.V.; RAABE, O.G.; CAMPBELL, D.E.; CAHILL, T.A.; PRITCHETT, L.; CHOW, J.; JONES, A.D. *Atmospheric pollutant emission factors from open burning of sugar cane by wind tunnel simulations*. Final report. Davis: University of California, 1995. (Prepared for the Hawaiian Sugar Planter's Association, Aiea, Hawaii).

JOHNSON, D.E.; WARD, G.M. Estimates of animal methane emissions. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 42, p. 133-141, 1996.

KAISER, E. A.; KOHRS, K.; KUCKE, M.; SCHNUG, E.; HEINEMEYER, O.; MUNCH, J.C. Nitrous oxide release from arable soil: importance of n-fertilization, crops and temporal variation. *Soil Biology Biochemistry*, v. 30, n. 12, p. 1553-1563, 1998.

MAYNARD, L.; LOOSLI, J. *Nutrição animal*. 2. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1974. p. 559.

MINAMI, K., NEUE, H.U. Rice paddies as a methane source. In: WHITE, D. H.; HOWDEN, S. M. (ed.), *Climate change - Significance for agriculture and forestry: systems approaches arising from an IPCC Meeting*, 1994. v. 27, p. 13-26.

POPPI, D.P.; McLENNAN, S.R. Protein and energy utilization by ruminants at pasture. *Journal of Animal Science*, v. 73, n. 1, p. 278-290, 1995.

SCHUTZ, H.; SCHRODER, P., RENNENBERG, R. Role of plants in regulating the methane flux to the atmosphere. In: SHARKEY, T.D.; HOLLAND, E.A.; MOONEY, H.A. (ed.), *Trace gas emissions by plants*. New York: Academic Press, 1991. p. 29-63.

SOLLOD, A. E.; SANTOS, G.B. *Implementation strategy for reducing methane emissions from cattle in México: a prefeasibility survey for the atmospheric pollution prevention division of the United States Environmental Protection Agency*. Washington, DC: US. EPA, 1998.

VENEZUELA. *Preliminary national greenhouse gas inventory*. Venezuela, 1995.

UNEP, OECD, IEA, IPCC. *IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories*. Bracknell: IPCC, 1995. v. 3.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Greenhouse gas emissions from agricultural systems*. Washington: US. EPA, 1989. v. 1

VAN NEVEL, C.J.; DEMEYER, D.I. Control of rumen methanogenesis. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 42, n. 1-2, p. 73-97, 1996.



## 8 Mitigação das Emissões de Gases de Efeito Estufa: Uso de Resíduos da Cana-de-Açúcar Como Fonte de Energia: Situação Atual, Tecnologias, Legislação e Cenários

ISAIAS DE CARVALHO MACEDO  
*Centro de Tecnologia Copersucar, Piracicaba, SP, Brasil*

**Resumo.** *As emissões de gases de efeito estufa (não CO<sub>2</sub>) na queima da cana antes da colheita, constituem uma parcela pequena do total de emissões no ciclo completo da agroindústria, como praticado no Brasil. O valor líquido de emissões evitadas no ciclo é de 206 kg CO<sub>2</sub> (equiv.)/t de cana, enquanto a liberação na queima (não CO<sub>2</sub>) atinge apenas de 1 a 5 kg CO<sub>2</sub> (equiv.)/t de cana. Por outro lado, se os resíduos não queimados forem usados como fonte de energia substituindo combustíveis fósseis, isto promoverá um impacto muito grande na redução de GHG. As rotas tecnológicas mais prováveis para esta utilização foram analisadas, considerando-se a eliminação da queimada em 55% da área de cana comercial. Três rotas para a recuperação (total ou parcial) da palha foram analisadas, e o uso final considerado foi a geração de energia elétrica em ciclos de gasificação/turbinas a gás. Os resultados mostram, para 300 x 10<sup>6</sup> t de cana/ano, reduções de emissões entre 25 e 40 x 10<sup>6</sup> t CO<sub>2</sub>/ano (mesma ordem de grandeza das reduções já obtidas com o uso atual do bagaço e etanol). O uso de tecnologias comerciais de geração (caldeiras a vapor de alta pressão) levará a cerca de 50% destes valores de mitigação. Estas tecnologias comerciais já são disponíveis, e os ciclos de gasificação/turbinas a gás, atualmente em fase final de desenvolvimento, estarão disponíveis na próxima década.*

## Mitigation of Greenhouse Gas Emissions: Use of Sugarcane Wastes as a Source of Energy. Status, Technology, Legislation, and Scenarios

***Abstract.** Greenhouse gas emissions (other than CO<sub>2</sub>) from burning of sugarcane before harvesting constitute a small part of the total emissions from the complete agricultural-industrial cycle practised in Brazil. The net value of emissions avoided during the cycle is 206 kg CO<sub>2</sub> (equiv.)/t. of sugarcane, while that of emissions released during burning (not CO<sub>2</sub>) is only 1 to 5 kg CO<sub>2</sub> (equiv.)/tons. On the other hand, the use of unburned residue to replace fossil fuels as a source of energy would have a very great impact on GHG reduction. The most probable technological routes have been analysed assuming the elimination of burning in 55% of the commercial sugarcane plantation area. Three routes for either total or partial straw recovery were analysed, with the final utilisation being the generation of electric energy in gasification/gas turbine cycles. For 300 x 10<sup>6</sup> tons sugarcane/year, results show a decrease in emissions from 25 to 40 x 10<sup>6</sup> tons CO<sub>2</sub>/year, the same order of magnitude as the reductions already obtained with bagasse and ethanol. The use of commercial technologies (high-pressure steam boilers) would lead to approximately 50% of these mitigation values. Such commercial technologies are already available, while the gasification/gas turbine cycles are in final stage of development and will be available in next decade.*

### Introdução

As emissões de gases de efeito estufa na queima de cana, antes da colheita, são uma parcela pequena do total de emissões evitadas no ciclo completo da agroindústria da cana, como praticado no Brasil. A utilização de bagaço de cana e etanol como combustíveis proporcionaram reduções muito maiores nas taxas de emissões de gases efeito estufa que a liberação na queimada de canaviais.

Um balanço aproximado é mostrado na Tabela 1, indicando que o valor líquido das emissões evitadas é de 206 kg CO<sub>2</sub> (equiv.)/t cana, enquanto a

liberação na queima (outros gases, não  $\text{CO}_2$ ) é de 1 a 5 kg  $\text{CO}_2$  (equiv.)/t cana.

Mesmo assim, a redução da área queimada pode ter impacto significativo na redução de emissões totais de GHG, muito além dos valores de 1 a 5 kg  $\text{CO}_2$  (equiv.)/t cana. Isto será possível se os resíduos (palha) não queimados forem usados na produção de energia, substituindo combustíveis fósseis.

As rotas mais prováveis para esta utilização são analisadas e, com cenários apropriados, seu impacto é quantificado.

### **Emissões na Queima da Cana**

Os principais gases de efeito estufa ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$ ) estão envolvidos, mas o  $\text{CO}_2$  é predominante e o metano aparece em segundo lugar. No cálculo das emissões de gases, em geral, a emissão de  $\text{CO}_2$  é descartada porque o mesmo é reciclado no crescimento (anual) da cana. O metano é avaliado através do GWP (Global Warming Potential), já incluindo o tempo de permanência (médio) do gás na atmosfera.

As emissões na queima foram recentemente calculadas pela Embrapa (1999) e Copersucar (1997) usando fatores de emissões diferentes; a Embrapa utilizou os fatores gerais para “queima de resíduos agrícolas” do IPCC (1995), e a Copersucar usou valores especificamente medidos para a cana-de-açúcar, em testes na Universidade da Califórnia (Jenkins, B.M. et al.). Também foram utilizados os coeficientes da U.S. EPA (1985).

O balanço energético agroindustrial, base dos cálculos das emissões de  $\text{CO}_2$ , foi realizado, em 1996, com valores atualizados da indústria em São Paulo (Macedo, 1998).

Os resultados finais indicam os valores da Tabela 1 (para metano), variando de 1 a 5 kg  $\text{CO}_2$  (equiv.)/t cana.

**Tabela 1** - Balanço de gases de efeito estufa no processo de produção de cana, açúcar e álcool – situação em 1997

<b>Atividades 1: Produção, colheita e transporte da cana</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>/t cana</b>
Estas atividades têm como conseqüências para a taxa de emissão de CO <sub>2</sub> :	
1.a A fixação (fotossíntese) de carbono da atmosfera	+ 694.7
1.b A liberação de CO <sub>2</sub> pelo uso de combustíveis (diesel) na lavoura: tratos culturais, irrigação, colheita, transporte de cana	- 4.7
1.c A liberação de CO <sub>2</sub> na queima do canavial (~80% das pontas e folhas)	- 198.0
1.d A liberação de outros gases de efeito estufa, na queima do canavial (principalmente metano)	- 1.0 a - 5.0
1.e A liberação de N <sub>2</sub> O do solo pelo uso de adubação nitrogenada	- 3.2
1.f A liberação de CO <sub>2</sub> (combustível fóssil) na produção dos insumos da lavoura (mudas, herbicidas, pesticidas etc.)	- 6.7
1.g A liberação de CO <sub>2</sub> (diesel, óleo combustível) na fabricação dos equipamentos agrícolas que serão usados na lavoura	- 2.4
1.h A oxidação dos resíduos não totalmente queimados, no campo	- 49.5
<b>Atividades 2: Industrialização de cana: produção de açúcar e álcool (45% açúcar, 55% álcool)</b>	
As conseqüências na taxa de emissão de CO <sub>2</sub> são:	
2.a A liberação de CO <sub>2</sub> na fermentação alcoólica	- 38.1
2.b A liberação de CO <sub>2</sub> na fabricação dos insumos da indústria(cal, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> etc)	- 0.5
2.c A liberação de CO <sub>2</sub> na produção dos equipamentos e prédios, instalações industriais	- 2.8
2.d A liberação de CO <sub>2</sub> na queima de todo o bagaço, substituindo óleo combustível, na produção de açúcar e álcool	- 231.6
2.e A emissão evitada de CO <sub>2</sub> , pelo uso de bagaço na produção de açúcar (somente), em vez de óleo combustível ou carvão	+ 104.0
<b>Atividades 3: Uso dos produtos finais, açúcar e álcool</b>	
3.a Em princípio, a médio prazo praticamente todo o carbono no açúcar é oxidado (metabolizado etc.) e volta à atmosfera	- 97.0
3.b A liberação de CO <sub>2</sub> na queima do etanol, em motores automotivos	- 79.1
3.c A emissão evitada de CO <sub>2</sub> , pelo uso de etanol em motores automotivos, em vez de gasolina	+ 126.7
<b>Total: Emissões Evitadas</b>	<b>+ 206.8</b>

### *Possibilidades de Mitigação*

A principal ação na mitigação já foi tomada no caso do Estado de São Paulo, com a legislação específica visando reduzir gradativamente a queima de cana. Na situação atual, a legislação (Decreto Estadual nº 42055, de 06/08/1997) prevê a eliminação da queima em 8 anos, a partir de 1998, para as áreas

passíveis de serem colhidas mecanicamente, e em 15 anos para as áreas não mecanizáveis.

Legislação Federal recente (Decreto Federal nº 2661, de 08/07/98) também prevê uma redução da queima de cana, neste caso estabelecendo um cronograma de redução apenas para as áreas mecanizáveis, a uma taxa de 25% a cada 5 anos.

Embora a taxa de redução possa variar de acordo com a região, é seguro afirmar que pelo menos 55% da área de cana, no Estado de São Paulo, passarão a ser colhidos sem queimar. Se os mesmos parâmetros forem aplicados ao Brasil, temos um cenário onde se pode prever os efeitos da mitigação, como um todo, no país.

As estimativas das emissões de metano, NO<sub>x</sub> (óxido de nitrogênio) e CO (monóxido de carbono), resultantes desse estudo, são apresentadas na Tabela 2 (Copersucar, 1998).

**Tabela 2** - Redução nas emissões com colheita de cana sem queimar (55%), e fatores de emissão gerais do IPCC ou específicos, medidos em túnel de vento

Gás	t palha queimada/tc (futura - atual)	Fatores de emissão (kg poluente/ t palha queimada)	Impacto na emissão (kg poluente/ tc)	Impacto na emissão Brasil: 300 x 10 <sup>6</sup> tc/ano (t poluente/ano)
Metano	0,056 - 0,125 = -0,069	IPCC: 2,83	-0,195	-58500
		Túnel: 0,41	-0,028	-8500
CO	0,056 - 0,125 = -0,069	IPCC: 59,5	-4,10	-1230000
		Túnel: 25,48	-1,76	-527000
NO <sub>x</sub>	0,056 - 0,125 = -0,069	IPCC: 4,37	-0,301	-90000
		Túnel: 1,40	-0,097	-29000

tc= tonelada de cana-de-açúcar

Fonte: Jenkins et al., 1995

Os resultados indicam quantitativamente o impacto benéfico da colheita de cana verde, evitando emissões de Metano, CO e NO<sub>x</sub> (Tabela 3).

**Tabela 3** - Impacto da colheita de cana verde nas emissões de gases

Gás	Kg poluente/tc	Método de estimativa
Metano	-0,028	(túnel de vento)
	-1,195	(IPCC)
CO	-1,76	(túnel de vento)
	-4,10	(IPCC)
NOx	-0,097	(túnel de vento)
	-0,301	(IPCC)

tc= tonelada de cana-de-açúcar

Embora a hipótese de corte de cana verde em apenas 55% de área possa parecer “fraca”, para algumas poucas regiões do mundo, ela deve ser válida, como primeira aproximação, para o Brasil, considerando-se a topografia, legislação atual e tecnologia disponível.

No entanto, um fator de utilização muito mais importante está no uso possível da palha não queimada no campo como combustível (substituindo óleo combustível). Análises foram feitas nesse sentido pela Copersucar (1998). Nesta análise, a situação futura considera também o uso de tecnologia mais avançada para o uso da biomassa como energético (essencialmente, gasificação e uso de turbinas a gás). São consideradas 3 rotas tecnológicas para a recuperação da palha (considerando apenas 55% da área), cada uma com seus respectivos consumos internos de energia:

- R1 - Corte da cana inteira com palha, e transporte de 100% da palha
- R2 - Corte da cana picada (sem extrator) e transporte de 100% da palha
- R3 - Corte da cana picada (com extrator) e transporte de 50% da palha

Os resultados são mostrados na Tabela 4; a Tabela 5 resume o efeito total de mitigação para as hipóteses consideradas.

**Tabela 4** - Impacto nas emissões de CO<sub>2</sub> com o uso da palha e aumento nas taxas de conversão

Rota	Palha disponível adicional t ms/t c	Bagaço total t ms/t c	(1) Futuro: Biomassa disponível óleo kg/t c	(2) Futuro: Combustível, equiv. em kg/t c	(3) Hoje: Energia do bagaço, kg/t c	(4) Combustível adicional, equiv. óleo kg/t c	(5) Variação nas emissões, kg CO <sub>2</sub> /t c
R1	0,075	0,14	0,215	77,0	35,5	+41,5	-139,0
R2	0,075	0,14	0,215	77,0	35,5	+41,5	-139,0
R3	0,0375	0,14	0,177	61,7	35,5	+26,2	-87,5

(1) Todo bagaço e a palha recuperada serão usados no ciclo de gasificação/turbinas; a palha corresponde a apenas 55% da área total.

(2) Considerando: 10% de perdas com secagem e acondicionamento (bagaço) 10% de perdas na gasificação; gasificação a 15% umidade (eficiência quente)

(3) Considerando: 10% de perdas com acondicionamento, paradas e partidas, 21,3% de perdas na combustão (eficiência média 78,7% PCI), combustão a 50% de umidade, eficiência de caldeira a óleo (hipotética): 92% (PCI)

(4) Equivalência já no uso final: Coluna 2 - Coluna 3

(5) 0.020 t Carbono/GJ, ou 0.073 t CO<sub>2</sub>/GJ para diesel ou óleo combustível

t c = tonelada de cana-de-açúcar

**Tabela 5** - Variação total nas emissões de CO<sub>2</sub> (uso parcial da palha como combustível)

Rotas	Consumo de diesel na produção (kg CO <sub>2</sub> /t c)	Substituição de combustível fóssil (kg CO <sub>2</sub> /t c)	Total (kg CO <sub>2</sub> /t c)	Brasil: 300 x 10 <sup>6</sup> t c/ano (10 <sup>6</sup> t CO <sub>2</sub> /ano)
R1	+ 2,1	- 139	- 137	- 41,1
R2	+ 7,3	- 139	- 132	- 39,6
R3	+ 2,3	- 87,5	- 85	- 25,5

t c = tonelada de cana-de-açúcar

Portanto, como se esperava, o aumento nas emissões de CO<sub>2</sub> pelo maior consumo de combustível no processamento e transporte da palha é muito pequeno com relação à grande redução advinda da substituição de combustíveis fósseis pela biomassa adicional.

Com as tecnologias atuais a hipótese da rota 3 (R3) é a mais plausível, com parte da palha sendo deixada no campo para reduzir, inclusive, o uso de herbicidas.

## Conclusões

O ciclo de produção de cana e uso dos produtos, no Brasil, representa hoje uma grande contribuição à mitigação das emissões globais de CO<sub>2</sub>, principalmente pelo uso energético do etanol e bagaço na substituição de combustíveis fósseis.

No entanto, dentro deste ciclo a queima da cana antes da colheita é um processo gerador de gases de efeito estufa; sua eliminação, mesmo parcial como proposta hoje, traz um novo potencial de mitigação (eliminação dos GHG não-CO<sub>2</sub> gerados e substituição de combustíveis fósseis).

As tecnologias necessárias estão em grande parte desenvolvidas e poderão ser apropriadas pelo setor industrial a curto prazo (geração convencional, com ciclos a vapor) e a médio prazo, (etanol por hidrólise de lignocelulósicos, ciclos de geração com gaseificação e turbinas a gás).

## Referências

- COPERSUCAR. *Greenhouse gas emissions and avoided emissions in the production and utilization of sugar cane, sugar and ethanol in Brazil: 1990-1994*. Piracicaba: Copersucar, 1997. (RT-002/97).
- COPERSUCAR. *Energy balance/CO<sub>2</sub> emission*: Ativ. 5.1.1, Relat. RLT-018 (MCT-PNUD). Piracicaba: Copersucar/ Projeto BRA/96/G31, 1998.
- EMBRAPA. *Inventário de emissões de gases de efeito estufa provenientes de atividades agrícolas no Brasil*: emissões de gases de efeito estufa provenientes da queima de resíduos agrícolas (relatório revisado). Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 1999a.
- IPCC. *Guidelines for national greenhouse gas inventories*. Bracknell: IPCC, 1995, 3v.
- IPCC. *Methane emissions/other greenhouse gases*: Ativ. 5.1.2, Relat. RLT-019 (MCT-PNUD). Piracicaba: Copersucar/ Projeto BRA/96/G31, 1998.

JENKINS, B.M.; TURN, S.Q.; WILLIAMS, R.B.; GORONEA, M.; ABD-EL-FATTAH, H.; MEHLSCHAU, N.; RAUBACH, N.; WHALEN, S.A.; CHANG, D.P.Y.; KANG, M.; TEAGUE, S.V.; RAABE, O.G.; CAMPBELL, D.E.; CAHILL, T.A.; PRITCHETT, L.; CHOW, J.; JONES, A.D. *Atmospheric pollutant emission factors from open burning of sugar cane by wind tunnel simulations*. Final report. Davis: University of California, 1995. (Prepared for the Hawaiian Sugar Planter's Association, Aiea, Hawaii).

MACEDO, I. C. Greenhouse gas emissions and energy balances in bio-ethanol production and utilization in Brazil (1996), *Biomass and Bioenergy*, v. 14, n. 1, p. 77-81, 1998.

U.S. EPA. *Compilation of air pollutant emission factors*, v. 1. 4. ed. Stationary point and area sources. AP-42. Washington, DC: EPA, 1985.



## Cana-de-Açúcar: Biomassa Energética

TOMÁS CAETANO RIPOLI, WALTER F. MOLINA JR.  
*Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ,  
Piracicaba, SP, Brasil*

MARCO LORENZO CUNALI RIPOLI  
*Pós-Graduação - Escola Superior de Agricultura  
“Luiz de Queiroz – ESALQ, Piracicaba, SP, Brasil*

**Resumo.** *A qualidade de vida das pessoas está diretamente relacionada com a disponibilidade de energia que é fornecida a elas. Países como o Brasil, que dispõem de imensas áreas agricultáveis sob condições climáticas favoráveis, não podem prescindir da energia da biomassa como parte integrante de suas matrizes energéticas. No Brasil, a cultura canavieira é a que mais facilmente poderia ampliar a participação da biomassa pois, além de extensa área, oferece condições de fácil adaptação para transformar o bagaço e o palhiço, proveniente da colheita sem queima prévia, em energia elétrica, o que além de aumentar a oferta, principalmente nos maiores estados produtores, atuaria ainda como uma agregação de valor num setor que vem passando pela sua mais séria crise econômico-financeira. E mais: a queima do palhiço na usina e não no campo reduziria drasticamente a poluição ambiental causada pelas queimadas. O que falta para se ter essa situação é o pagamento paritário do kWh produzido pela biomassa, em relação ao produzido por hidrelétricas; otimização dos sistemas de caldeiras das usinas e destilarias e equipamentos adequados para enfardamento do palhiço para transporte até as unidades transformadoras.*

## Sugarcane: Energy from Biomass

**Abstract.** *The quality of life of human populations is directly related to the availability and use of energy. Countries such as Brazil, with huge extensions of tillable soil under favourable climatic conditions, cannot neglect the role of biomass as a source of energy. Sugarcane could help increase the share of biomass in the energy balance, because the crop*

*occupies very large areas and its bagasse, as well as the straw from unburned sugarcane fields, can be readily transformed into electric energy. Thus, not only would available power increase, especially in the large sugarcane producing states, but the resulting revenue would be much welcomed input in a sector that has undergone a serious economic crisis. In addition, burning the sugarcane straw in the mill instead of the fields would dramatically reduce the environmental pollution caused by burning-over operations. It would be necessary, however, to guarantee equal kilowatt-hour prices for biomass sources of energy and hydroelectric power plants; to optimise mill and distillery furnace systems; and to develop appropriate baling equipment for the straw to be transported to plants.*

## Introdução

Biomassa é definida por Hiler & Stout (1995) como toda a matéria orgânica, exceto combustíveis fósseis, ou seja, todas as culturas agrícolas, material florestal, produtos animais, massa microbiana e resíduos orgânicos renováveis em base anual. A biomassa é utilizada como alimento, fibra, material estrutural, matéria orgânica nos solos, vestuário e como combustível. Por sua vez, Hinrichs (1992) define energia de biomassa como a energia derivada de campos agrícolas, árvores, plantas aquáticas, restos florestais e resíduos sólidos orgânicos de lixos urbanos.

Até 1973, quando ocorreu o primeiro embargo do petróleo pela OPEP<sup>1</sup>, a biomassa como combustível não havia despertado o interesse estratégico e econômico por parte das nações. O preço baixo do petróleo no mercado internacional não motivava atenção maior, ocorrendo apenas pesquisas esporádicas por parte de poucas universidades e órgãos de pesquisa. A partir daquele ano o interesse cresceu e, atualmente, mesmo os países mais desenvolvidos e localizados em regiões de clima temperado apresentam programas de pesquisa buscando alternativas energéticas na área de biomassa.

A energia consumida mundialmente tem, nos combustíveis fósseis, a sua principal fonte, atingindo 90% do total e, segundo Seager (1995), está

---

<sup>1</sup> OPEP - Organização dos Países Produtores e Exportadores de Petróleo.

aumentado 20% a cada 10 anos o que traz sérias preocupações quando se analisa os seus efeitos para o meio ambiente, pois eles são fontes de poluição industrial, chuva ácida e aquecimento global do planeta. Em 1993 as fontes de energia consumidas no mundo estavam assim distribuídas: petróleo, 40%; carvão, 28%; gás, 23%; nuclear, 7% e hidráulica, 2%.

Por sua vez, Stout et al. (1980) observam que tanto as fontes de energia, utilizadas pelo homem, como outros recursos naturais e o meio ambiente estão entrelaçados de maneira bastante complexa e acrescentam que, quando se soma a eles aspectos sociais e econômicos, a interdependência global é impressionante. As perturbações que surgem num ponto do ecossistema podem ter repercussões imediatas em outros. Esses autores listam alguns temas que causam preocupação em termos de desequilíbrio ambiental: contaminação da água, do ar, visual e sonora; esgotamento de recursos naturais; radioatividade; eliminação de resíduos sólidos; contaminação térmica; utilização de agroquímicos; aproveitamento racional de terras; utilização de energia; conservação da flora, fauna e vida silvestre; decadência dos centros urbanos; proliferação de subúrbios; práticas agrícolas abusivas; utilização indevida do solo; inadequada exploração madeireira e vazamentos de petróleo. A inter-relação desses aspectos acarretam quatro grupos de danos ao meio ambiente: ameaças à saúde e a segurança do homem; danos relativos aos recursos econômicos e ao bem estar material da sociedade, redução do “desfrute da vida” no seu caráter psicológico e estético e danos à natureza, de maneira geral.

Um dos meios para minimizar algumas das questões acima citadas é a utilização, em maior escala da energia de biomassa, que reconhecidamente é menos poluidora e, por ser renovável, diminui a dependência de combustíveis finitos da natureza.

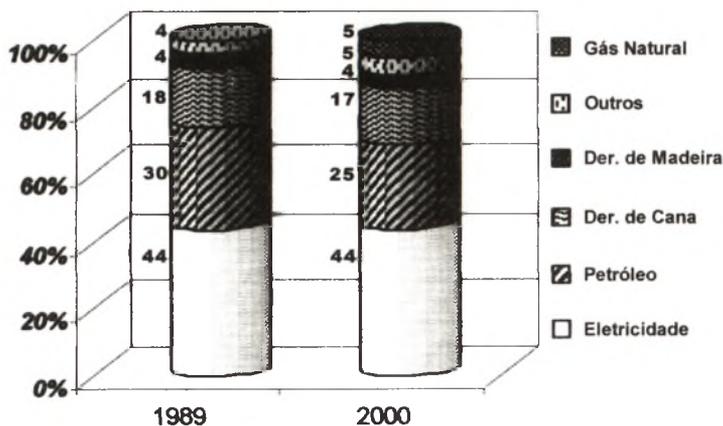
## **A Energia de Biomassa**

Apesar da economia mundial ainda estar calcada no fornecimento energético a partir do petróleo e a estimativa de disponibilidade desse combustível não ser preocupante para os próximos 50 anos, países de alto consumo energético estão buscando alternativas. A biomassa surge com um potencial interessante, principalmente para países de clima tropical e subtropical. Tem ela, ainda, a seu favor, o fato de não estar sujeita a políticas ou *trusts* internacionais, o que é

uma vantagem bastante significativa para países dela produtores, num mundo hoje globalizado e dominado pelas grandes corporações econômicas e empresariais.

O Brasil, pela sua localização geográfica, por sua extensão territorial e pela sua intensa e importante atividade agropecuária, surge como uma nação privilegiada caso decida incluir, com maior ênfase, em sua matriz energética, a energia de biomassa. Não há país no mundo que contemple condições tão satisfatórias para, de fato, ter na biomassa uma opção mais barata, mais viável, com menores investimentos de infra-estrutura e sem sacrificar a produção de alimentos.

A título de ilustração observe-se, para o Estado de São Paulo, a atual previsão da matriz energética realizada por Zatz, 1992 citado por Ripoli (1998b), mostrada na Figura 1. Infelizmente, ao longo do período mostrado, não está prevista nenhuma variação percentual significativa no uso das fontes de energia renováveis, ou seja, cana-de-açúcar (18% para 17%) e madeira (estável em 4%). Em 1989 o Estado consumia  $49,3 \times 10^6$  TEP (toneladas Equivalente em Petróleo) com previsão para o ano 2000, na ordem de  $71,1 \times 10^6$  TEP.



**Figura 1** - Matriz energética do Estado de São Paulo

Fonte: Zatz, 1992, citado por Ripoli, 1998b

A participação da biomassa (álcool e bagaço) foi de  $8,9 \times 10^6$  TEP, com previsão para o ano 2000 de  $12 \times 10^6$  TEP, enquanto que, a madeira, participou com  $1,9 \times 10^6$  TEP, com previsão de  $2,8 \times 10^6$  TEP.

Segundo o Ministério da Agricultura (1984) a madeira utilizada para geração de energia calórica, no Brasil, é originada de matas e florestas naturais, pois os reflorestamentos atendem, basicamente, a demanda da indústria de papel e celulose. Vale dizer que esta é mais uma forma de degradação ambiental.

Essa energia calórica atende, primordialmente, as populações rurais de baixa renda, que dela dependem para a cocção de alimentos e, em menor escala, é utilizada para produção de carvão vegetal e para funcionamento de olarias.

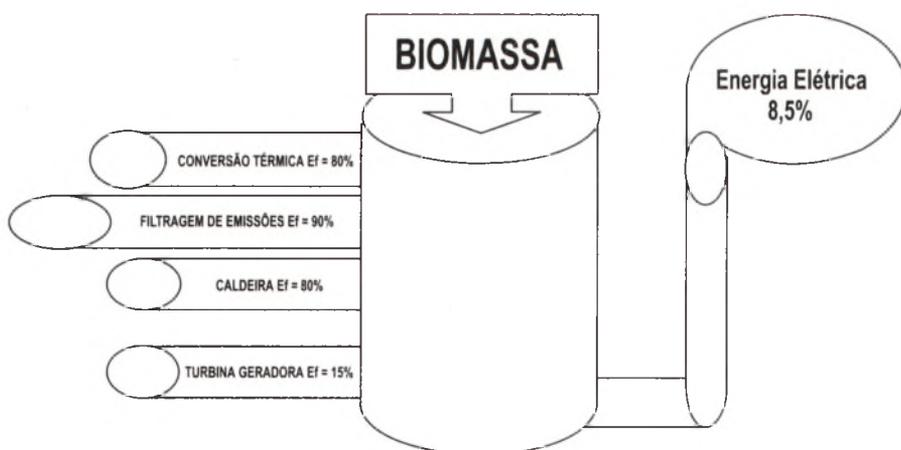
Em contrapartida, o Brasil, com uma área cultivada com cana-de-açúcar da ordem de  $4,59 \times 10^6$  ha oferece uma situação privilegiada em termos de produção de energia a partir da biomassa. Tomando-se como exemplo o Estado de São Paulo, na safra 97-98, foram colhidos  $1,676 \times 10^6$  ha, com uma produção agrícola de  $117,32 \times 10^6$  toneladas de matéria-prima, o que resultou em  $8,6 \times 10^6$  toneladas de açúcar e  $9,4 \times 10^9$  de litros de álcool.

Considerando-se que um barril de petróleo (158,9 litros) contém um poder calorífico de  $1,087 \times 10^6$  kcal e um litro de álcool contém 5.082 kcal, chega-se a relação de que 0,743 barril de petróleo equivale, energeticamente, a 1 barril de álcool. Portanto, a produção alcooleira da safra paulista 97-98, representou, em termos de EBP-Equivalente Barril de Petróleo, um total de 43,95 milhões de barris, ou seja, 120.000 barris por dia. A grosso modo, esse valor representa 30% da importação diária brasileira de petróleo.

Porém, a contribuição que a “biomassa de cana-de-açúcar” pode prestar à matriz energética nacional não se restringe somente ao álcool. Há ainda duas outras formas de aproveitamento: o bagaço e o palhiço.

Bagaço vem a ser o material fibroso (originário dos colmos e acrescido de matéria estranha vegetal que acompanhou a matéria-prima), considerado subproduto, resultante do esmagamento do material recebido pela usina ou destilaria. Esse esmagamento separa o caldo, que será processado para fabricação de açúcar e/ou álcool através de processos fermentativos. Cada tonelada de cana processada fornece, em média, 260 kgf de bagaço com 50% de umidade. Portanto, na safra paulista de 97-98, obteve-se 683 mil toneladas de bagaço. A Figura 2 mostra um esquema de um conversor de biomassa em energia elétrica, através da queima direta do material.

Noventa por cento desse bagaço foi utilizado nas caldeiras das próprias usinas e destilarias, como fonte calórica para suas operações durante a safra, comprovando a sustentabilidade dessa agroindústria em termos de consumo de energia. Em realidade esse autoconsumo poderá ser bem menor, desde que ocorra uma melhoria na eficiência de conversão dessas caldeiras, as quais não estão otimizadas atualmente. Se assim o forem, poderá ocorrer um excedente da ordem de 20% sobre o total de bagaço consumido, ou seja, 136 mil toneladas, o qual poderá ser transformado, pelas próprias usinas e destilarias, em energia elétrica a ser vendida para as concessionárias de energia elétrica que atuam no Estado.



**Figura 2** - Esquema de pequena geradora de eletricidade a partir de biomassa, com perdas durante a transformação

**Fonte:** Adaptado de Hiler & Stout (1995)

Cinco usinas açucareiras da região de Ribeirão Preto (SP) possuem contrato, por 10 anos, junto à CPFL, para fornecimento de energia elétrica, a partir do bagaço excedente. Como exemplo, tem-se a Usina Santa Elisa que fornece 7 MWatt/ano. A questão maior e que não motiva outras agroindústrias a aderirem a um programa desses é o valor pago pelo kWh pelas distribuidoras às usinas de açúcar. É um valor em torno de 40% menor que o preço do kWh proveniente de hidrelétricas.

Outro material, resultante da cultura canavieira, com grande possibilidade de aproveitamento energético é o palhiço que, segundo Ripoli (1991) é a parte de material remanescente e resultante de colheita de cana-de-açúcar, sem queima prévia. Constitui-se das frações: folhas verdes, palha e ponteiros.

Não há dúvidas quanto ao atual esgotamento do Estado de São Paulo no que diz respeito à possibilidade de construção de novas hidrelétricas. É notório que, atualmente, São Paulo importa de outros Estados da Federação 40% de suas necessidades em termos de energia elétrica.

Pelo fato de ser o palhiço proveniente da colheita de cana-de-açúcar um material para produção de energia térmica (combustível), alguns pesquisadores têm estudado sua composição, a quantidade dele existente no canavial e o seu comportamento na produção de calor. Algumas dessas características são mostradas na Tabela 1.

**Tabela 1** - Valores médios de algumas características dos constituintes do palhiço, encontrados na bibliografia

	Ponteiros	Folhas Verdes	Palha	Palhiço	Autores
MASSA (t/ha)	7,52	8,18	10,82	26,52	Ripoli et al. (1996)
				33,85	Molina Jr. et al. (1995a)
				18,92	Furlani Neto et al. (1996)
PCU (Mcal/t)	8,05	11,37	10,87	30,29	Ripoli et al. (1996)
				2991,4	Molina Jr. et al. (1995a)
PCI (Mcal/t)	566,93	940,66	3.320,79		Ripoli et al. (1996)
				3.982,6	Molina Jr. et al. (1995a)
PCS (Mcal/t)	3.850,62	3.738,10	4.070,94	2.232,0	Furlani Neto et al. (1996)
					Ripoli et al. (1996)
				4.321,2	Molina Jr. et al. (1995a)
IP (%)	4.189,2	4.086,4	4.410,6	4.412,5	Furlani Neto et al. (1996)
					Ripoli et al. (1996)
				27,45	Ripoli et al. (1990)
U (%)	84,3	73,8	17,5	21,52	Ripoli (1991)
					Ripoli et al. (1998)
				24,1	Molina Jr. et al. (1995b)
	76,66	67,43	10,59		Ripoli (1991)

PCU= poder calorífico útil; PCI= poder calorífico inferior; PCS= poder calorífico superior; IP= índice de palhiço(massa de palhiço/massa de colmos); U = umidade atual.

As equações [1] e [2], desenvolvidas por RIPOLI et al. (1998b), são uma forma de estimar a quantidade de energia elétrica que pode ser obtida a partir do palhiço e do bagaço e o número de pessoas que poderiam ser atendidas anualmente com essa energia. Assim:

$$Pd = \frac{Pu \cdot \alpha \cdot Ac \cdot Qt \cdot Ef}{313,9 \cdot Cd} \quad [1]$$

onde:

$Pd$  = número de pessoas servidas de energia elétrica gerada a partir de bagaço e/ou palhiço.

$Pu$  (Mcal/t) = poder calorífico útil do bagaço ou do palhiço.

$\alpha$  (%) = massa de palhiço recolhida do canavial para conversão em energia elétrica.

$Ac$  (ha/ano) = área canavieira colhida, por ano.

$Ef$  (%) = Eficiência do processo de conversão de biomassa em energia elétrica.

$Cd$  (kWh/dia) = consumo médio diário por pessoa de baixa renda.

$Qt$  (t/ha) = massa de palhiço remanescente, no campo, após a colheita.

$$Qt = Pa \left[ \beta \frac{1-i}{1-p} - i \right] \quad [2]$$

onde:

$Pa$  (t/ha) = produtividade agrícola do canavial (matéria-prima colhida).

$\beta$  (%) = índice de palhiço.

$i$  (%) = quantidade de palhiço na matéria-prima.

$p$  (%) = percentagem de perdas de colmos, na colheita.

As informações a seguir referem-se, exclusivamente, à região canavieira do Estado de São Paulo, durante a safra 97-98, para aplicação nas equações [1] e [2], anteriormente mencionadas, com o objetivo de ilustrar um cálculo estimativo do número de pessoas que poderiam servir-se da energia elétrica que poderia ser produzida a partir do palhiço e do bagaço e do respectivo, nesta área.

$P_u$  (Mcal/t) = 1.925,60 para o bagaço, Ripoli (1991) e 2.991,4 para o palhiço, Molina Jr. et al. (1995).

$P_a$  (t/ha) = 70 (AGRIANUAL)

$\alpha$  (%) = 50 (Ripoli, 1995)

$A_c$  (ha/ano) =  $1,676 \times 10^6$  (AGRIANUAL)

$\beta$  (%) = 25 para palhiço (Molina Jr., 1991)

$i$  (%) = 8,1 para palhiço (Furlani Neto, 1995)

$p$  (%) = 5 para cana-de-açúcar (Ripoli, 1998b)

$E_f$  (%) = 8,7 estimativa para pequenas transformadoras (Hiler & Stout, 1995)

$C_d$  (kWh/dia) = 1,4 média para pessoas de baixo consumo (informação CPFL)

Para a estimativa de quantidade de energia elétrica que pode ser obtida a partir do bagaço, pode-se utilizar a mesma equação [2], porém as variáveis “i” e “p”, são nulas e a variável “ $\beta$ ” passa ter o significado da quantidade de bagaço total resultante do esmagamento de matéria-prima, durante uma safra.

**Tabela 2** - Número de pessoas/ano que podem ser atendidas por energia elétrica produzida a partir de palhiço e bagaço

	$P_u$ Mcal/t	$\alpha$ %	$A_c$ ha/ano	$Q_t$ t/ha	$C_d$ kWh/dia	$P_d$ n° pessoas/ano
Palhiço	2991,4	0,5	1.676.000	11,26	1,4	5.587.483
Bagaço	1925,6	0,2	1.676.000	18,20	1,4	2.325.634

Por volta de 7,9 milhões de pessoas, como demonstrado, poderão se beneficiar de energia elétrica a partir do palhiço e do bagaço. A grande vantagem é que, relativamente, os investimentos necessários para possibilitar essa utilização, são bem menores do que os investimentos para outros tipos de produção de energia elétrica. Também deve-se levar em conta o aspecto de agregação de valor para o setor sucro-alcooleiro, que deixaria de ser apenas produtor de açúcar e álcool.

Também há que se comentar que, atualmente, com a queima da cana-de-açúcar ocorrem emissões na atmosfera de CO, CO<sub>2</sub> e ozônio, além de outros gases já detectados e o único objetivo dessa atitude é facilitar a colheita do

canavial. É verdade que no ciclo da cultura o carbono é reabsorvido. Porém, a descarga de toneladas de compostos desse gás é imediata, com a queimada e leva um tempo infinitamente maior para que ocorra a reabsorção. Nesse intervalo, ocorre poluição e acúmulo de gases que concorrem para o efeito estufa, na atmosfera. A utilização dos resíduos de colheita como fonte de energia poderiam ter suas emissões controladas e substituir, pelo menos em parte, as emissões de carbono de combustíveis fósseis, contribuindo, assim, para melhoria das condições ambientais da atmosfera.

Considerando-se uma visão macro da problemática de emprego, vale lembrar que esse setor necessita investimentos de US\$ 11,000 para geração de um posto de trabalho, enquanto que o setor automobilístico necessita investir US\$ 91,000 e o setor petroquímico, requer US\$ 220,000 para gerar um mesmo posto de trabalho.

Quanto aos custos comparativos de geração de energia elétrica, Ripoli (1998b) mostra que usinas nucleares produzem energia elétrica na base de US\$ 60-100/MWh; as usinas hidráulicas tem seus custos de produção na ordem de US\$ 25-50/MWh enquanto que as usinas de base biomassa (carvão, bagaço) estão por volta de US\$ 45-70/MWh. São aspectos relativos e não menos importantes que devem ser considerados ao se estudar a matriz energética de um Estado ou país.

Observa-se, pois, que a cana-de-açúcar pode participar ativamente da matriz energética paulista, desde que haja vontade política de governo, ocorra estímulo à co-geração e o setor sucro-alcooleiro vença a profunda crise por que vem passando.

## Referências

- AGRIANUAL. Anuário da Agricultura Brasileira. São Paulo: FNP Consultoria e Comércio, 1997. 435 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. *Proposta de utilização energética de florestas e resíduos agrícolas*. Brasília: CAERG, 1984. 166 p.
- DOOR-OLIVER. *Factores de conversión para ingenieros*. Stanford: Door-Oliver, 1966. 21 p.

FURLANI NETO, V. L. *Colhedora de cana-de-açúcar (Saccharum spp.): avaliação em canaviais com e sem queima prévia*. Piracicaba: ESALQ-USP, 1995. 110 p. Tese de Doutorado.

FURLANI NETO, V. L.; RIPOLI, T.C.; VILLANOVA, N. A. Biomassa de cana-de-açúcar: energia contida no palhicho remanescente de colheita mecânica. *Revista da STAB*, Piracicaba, v. 15, n. 1, p. 6-8, 1996.

HILER, E. A.; STOUT, B.A. *Biomass energy - A monograph*. College Station: Texas Engineering Experiment Station, Texas A&M University Press, 1995. 313 p.

HINRICHS, R.A. *Energy*. New York: State University of New York, Saunders College Publishing, 1992. 540 p.

MOLINA Jr., W. *Enfardamento de resíduo de colheita de cana-de-açúcar (Saccharum spp.): avaliação dos desempenhos operacional e econômico*. Piracicaba: ESALQ-USP, 1991. 101 p. Dissertação de Mestrado.

MOLINA Jr., W. F.; RIPOLI, T.C.; COELHO, J. L. D.; BRITO, O. Energia potencial da biomassa não industrializável de canaviais para emprego como combustível. In: CONBEA, 24., 1995, Viçosa, MG. *Resumos...* Viçosa: SBEA-UFV, 1995a. p. 539.

MOLINA Jr., W. F.; RIPOLI, T.C.; GERALDI, R. N.; AMARAL, J. R. Aspectos econômicos e operacionais do enfardamento de resíduo de colheita de cana-de-açúcar para aproveitamento energético. In: CONBEA, 24., 1995, Viçosa, MG. *Resumos...* Viçosa: SBEA-UFV, 1995b. p. 367.

RIPOLI, M.L.C.; RIPOLI, T.C.; LEÓN, M.J. DE; MIALHE, L.G. Pérdidas de azúcares reductores totales como consecuencia de la quema en pre-cosecha de cañaverales. In: BALBUENA; BENEZ; JORAJURIA. (ed.), *Ingeniería rural y mecanización agrária en el ambito latinoamericano*. La Plata: Ed. Universidad Nacional de La Plata, 1998. p. 250-255.

RIPOLI, T. C. ; MIALHE, L. G. ; BRITO, J. O . *Queima de canavial: o desperdício não mais admissível!* São Paulo: Ed. Geminy, 1990. p. 18-23. (Álcool & Açúcar, 54).

RIPOLI, T.C. O uso energético da biomassa da cana: implicações técnico-econômicas e sócio-ambientais. In: RIPOLI, T.C.; PASCHOAL, A. D. (org.). *Seminário internacional sobre desenvolvimento sustentado agrícola e urbano*. Piracicaba: ESALQ-USP / FEALQ, 1995. 186 p.

RIPOLI, M.L.C.; RIPOLI, T.C. Caracterização dos principais constituintes da biomassa de três variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp). In: SICUSP, 4., 1996, São Paulo, SP. *Resumos...* São Paulo: USP, 1996. v. 1, p. 463.

RIPOLI, T. C. *Utilização do material remanescente da colheita de cana-de-açúcar (Saccharum spp.):* equacionamento dos balanços energético e econômico. Piracicaba: ESALQ-USP, 1991. 150 p. Tese de Livre Docência.

SEAGER, J.; REED, C.; STOTT, P. *The new state of the earth atlas*. New York: Touchstone Books / Simon & Schuster, 1995. 128 p.

STOUT, B. A.; MYERS, C. A.; HURAND, H; FAIDLEY, L.W. *Energia para la agricultura mundial*. Roma: FAO, 1980. 301 p.

## Potencial para Acumulação e Seqüestro de Carbono em Pastagens de *Brachiaria*

ROBERT M. BODDEY, BRUNO J. R. ALVES, OCTÁVIO C. DE OLIVEIRA,  
SEGUNDO URGUAGA  
*Embrapa Agrobiologia, Seropédica-RJ, Brasil*

**Resumo.** Pastagens plantadas com gramíneas de origem africana, principalmente *Brachiaria* spp., atualmente ocupam mais de 80 milhões de hectares (M ha) no Brasil, quase 10% do território nacional. Estudos realizados na Colômbia, nos Llanos Orientales, mostraram que sob uma pastagem de *Brachiaria humidicola* após 9 anos de estabelecimento o conteúdo de carbono no solo aumentou 26 t ha<sup>-1</sup> em comparação com a savana nativa. A taxa de acúmulo de carbono derivado da deposição das raízes mortas depende da produtividade primária líquida (PPL) da gramínea, mas até hoje não foi feito nenhum levantamento satisfatório da PPL de uma pastagem de *Brachiaria* sob pastejo. Foi desenvolvida uma técnica nova para realizar estas avaliações, baseada no monitoramento da deposição de liteira, e o total de liteira depositada foi estimada entre 19 e 29 t matéria seca ha<sup>-1</sup>. Incluindo-se o consumo pelos bovinos, a PPL aérea total foi estimada entre 28 e 34 t matéria seca ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Quando a floresta foi originalmente desmatada para a instalação das pastagens, o conteúdo de carbono do solo diminuiu significativamente, mas após 9 anos de pastagem o carbono do solo voltou a ser aproximadamente 100 t C ha<sup>-1</sup> (0 a 100cm) e os dados indicaram que o carbono do solo continuou acumulando. Estimativas da PPL aérea obtidas num outro sítio em Uberlândia (MG) no Cerrado, utilizando a mesma técnica, situaram-se entre 13,6 e 21,8 t ms ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> para pastagens de *Brachiaria ruziziensis* consorciada, ou não, com *Stylosanthes guianensis*. Os poucos dados disponíveis indicam que a vegetação nativa desta região teria uma PPL aérea consideravelmente menor. Se esta diferença em PPL aérea for refletida na produção das raízes, e supondo que a taxa de decomposição das raízes e a vegetação nativa são semelhantes, o valor do equilíbrio do conteúdo do carbono no solo sob a *Brachiaria* seria maior que o da vegetação nativa. Ambos estudos foram feitos com um bom manejo dos

*animais, evitando o sobrepastejo, e com a aplicação de adubação de manutenção de P e K. Os resultados indicam que com um manejo apropriado para a produção sustentável e lucrativa do gado de corte, a imensa área que o Brasil possui sob pastagens de Brachiaria pode acumular quantidades de carbono bastante significativas em uma escala global.*

## Potential for Accumulation and Sequestration of Carbon in *Brachiaria* Pastures

**Abstract.** Pastures planted with grasses of African origin, mainly *Brachiaria* spp., today occupy over 80 million hectares (M ha) in Brazil, almost 10% of the entire country. Studies performed, in the Llanos Orientales (Eastern savannahs) of Columbia showed that the carbon content of soil under a 9-year-old pasture of *Brachiaria humidicola* increased by 26 t ha<sup>-1</sup> in comparison with the native savannahs. The rate of accumulation of carbon derived from the deposition of dead roots depends on the net primary production (NPP) of the grass, but until now no satisfactory evaluations of the NPP of *Brachiaria* pastures under grazing have been made. A new technique was developed to assess aerial NPP based on the monitoring of the deposition of plant litter, and the total litter deposited was estimated to be between 19 and 29 t dry matter ha<sup>-1</sup>. With inclusion of the dry matter consumed by the cattle, the total aerial NPP was estimated at between 28 and 34 t dry matter ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>. When the forest in this region (extreme south of the state of Bahia, Brazil) was originally cleared for the installation of the pastures, the C content of the soil decreased significantly, but after 9 years of grazing, the C content of the soil returned to approximately 100 t C ha<sup>-1</sup> (0 - 100 cm) and the data indicated that soil C continued to accumulate. Evaluations of NPP using the same technique in pastures of *Brachiaria ruziziensis*, either as monoculture or mixed with the legume *Stylosanthes guianensis*, in the Cerrado region (Uberlândia, State of Minas Gerais) showed that the aerial NPP was 13.6 and 21.8 t dm ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, respectively. Although little data is available, it indicates that the native vegetation of this region has an aerial NPP considerably lower than this. If this difference in aerial NPP is reflected in the net root production, and supposing that the rates of decomposition of the roots of the native vegetation and the *Brachiaria* are similar, then the equilibrium C content of the soil under the *Brachiaria* will be greater than that of the native

*vegetation. Both studies were made under conditions of good animal management, avoiding over-grazing and with the application of P and K maintenance fertilisation. The results indicate that with pasture management appropriate for sustainable and profitable beef cattle production, the immense area of Brazil which is at present under Brachiaria could accumulate in the soil quantities of carbon which are very significant on a planetary scale.*

## Introdução

Recentes levantamentos indicaram que pastagens de gramíneas de origem africana, principalmente do gênero *Brachiaria*, ocupam hoje mais de 80 milhões de hectares (M ha) no Brasil, dos quais aproximadamente 40 M ha no cerrado, 20 M ha na Amazônia e pelo menos 20 M ha na região da mata Atlântica que vai de São Paulo até Maranhão (Macedo, 1995; Zimmer & Euclides, 1997). Esta área corresponde a quase 10% do território nacional e é 50% maior do que a área dedicada a agricultura. É evidente que qualquer mudança no estoque do carbono provocada por introdução dessas espécies de gramíneas já proporcionou um enorme impacto no balanço de gases de efeito estufa (GEEs).

Este assunto foi inicialmente investigado por Fisher et al. (1994), que estimaram que o estoque de carbono até uma profundidade de 80 cm no perfil de um solo sob pastagem de *Brachiaria humidicola*, de 9 anos de idade, era 26 t C ha<sup>-1</sup> maior do que o estoque de C no solo sob vegetação nativa em Carimagua, nos Llanos Orientales da Colômbia. Em duas outras pastagens onde a *Brachiaria* foi consorciada com a leguminosa forrageira *Arachis pintoi*, os mesmos autores também encontraram que o aumento do C no solo chegou a 70 t ha<sup>-1</sup>. O maior ganho de C foi registrado nas camadas de solo abaixo dos 20 cm, o que aponta para uma contribuição derivada, principalmente, das raízes das plantas.

Para que o solo sob essas pastagens acumule mais C do que o existente sob a vegetação nativa, é necessário que: 1) a taxa de deposição da matéria orgânica nestes solos seja maior do que na vegetação nativa e/ou 2) a taxa de decomposição da matéria orgânica das pastagens seja menor. Neste trabalho, inicialmente, foram examinados os dados referentes à deposição da matéria

orgânica no solo sob *Brachiaria* e sob a vegetação nativa, assim como as taxas de decomposição destes materiais. Em seguida discutiu-se sobre as evidências de que os estoques de carbono no solo sob pastagens de *Brachiaria* estejam aumentando, e as condições em que este processo tem potencial para ocorrer.

## **Deposição de Carbono em Solos sob Pastagens de *Brachiaria* e sob Vegetação Nativa**

O carbono depositado no solo sob qualquer tipo de vegetação origina-se de duas fontes:

1. Serrapilheira, ou liteira, originada dos tecidos senescentes da vegetação, onde se incluem folhas e galhos senescentes, ou da morte de toda a planta, inclusive árvores. Este material, em grande parte, decompõe-se na superfície do solo, e uma certa proporção acaba por se integrar ao mesmo, principalmente nas camadas mais superficiais, mediante a ação da macro e mesofauna.
2. Raízes senescentes.

A deposição de matéria orgânica, sob qualquer vegetação, está relacionada à sua produtividade primária líquida (PPL). No caso das savanas e pastagens de *Brachiaria*, existem poucas estimativas da PPL, especialmente no Cerrado brasileiro, e ainda assim, existem grandes problemas metodológicos com estas estimativas. Nos anos 70 foram feitas várias avaliações da PPL de pradarias, utilizando-se a metodologia desenvolvida no *International Biological Program* (IBP) (Singh et al., 1975). Esta metodologia é baseada nas mudanças de biomassa existente (*standing biomass*) durante o ano. Pela aplicação desta técnica, todos os incrementos positivos da biomassa aérea e subterrânea da vegetação são somadas, e o total é considerado como uma estimativa da PPL aérea e subterrânea das plantas, respectivamente. No caso de ecossistemas das regiões temperadas, onde a biomassa (material vivo) no final do inverno é quase nula e, a partir desta época, o material vegetal mostra um acúmulo contínuo de biomassa até o final do verão/outono, esta técnica pode fornecer uma estimativa razoável. No entanto, como discutido por Long et al. (1989), em ecossistemas tropicais e subtropicais, onde, frequentemente, a biomassa se

mantém viva o ano inteiro, esta metodologia é inadequada por não incluir os acúmulos de biomassa que são mascarados pelo ciclo de senescência e crescimento de tecidos aéreos ou raízes.

Várias estimativas da PPL da vegetação nativa do Cerrado foram realizadas utilizando a metodologia do IBP. A vegetação nativa do Cerrado é classificada em quatro tipos de comunidade: *Campo limpo*, onde a vegetação predominante é de gramíneas, com ausência total de árvores; *Campo sujo*, onde algumas árvores estão presentes; *Campo cerrado*, com predomínio de arbustos e árvores de porte baixo; e *Cerradão*, considerada como mata fechada (Eiten, 1972). Meirelles & Henriques (1992) estimaram a PPL aérea de uma área de *campo cerrado*, num latossolo vermelho escuro, próximo a Brasília. Estimou-se 1,7 t massa seca (ms) ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, quando a vegetação sofreu queima antes da avaliação, e 1,2 t ms ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, para uma área não queimada. Estes autores citaram outras estimativas da PPL aérea da vegetação nativa do Cerrado, publicadas em teses de pós-graduação da Universidade de Brasília, as quais variaram entre 3,7 t ms.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>, para área de *campo sujo* após queima (Cezar, 1980), e 2,4 e 3,3 t ms ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> para áreas de campo cerrado, com e sem queima, respectivamente (Batmanian, 1983). Meirelles (1990) também avaliou a PPL aérea de uma pastagem de *Brachiaria decumbens* num latossolo vermelho escuro, perto de Brasília, através da mesma técnica do IBP, e registrou uma estimativa de 3,9 t ms ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>.

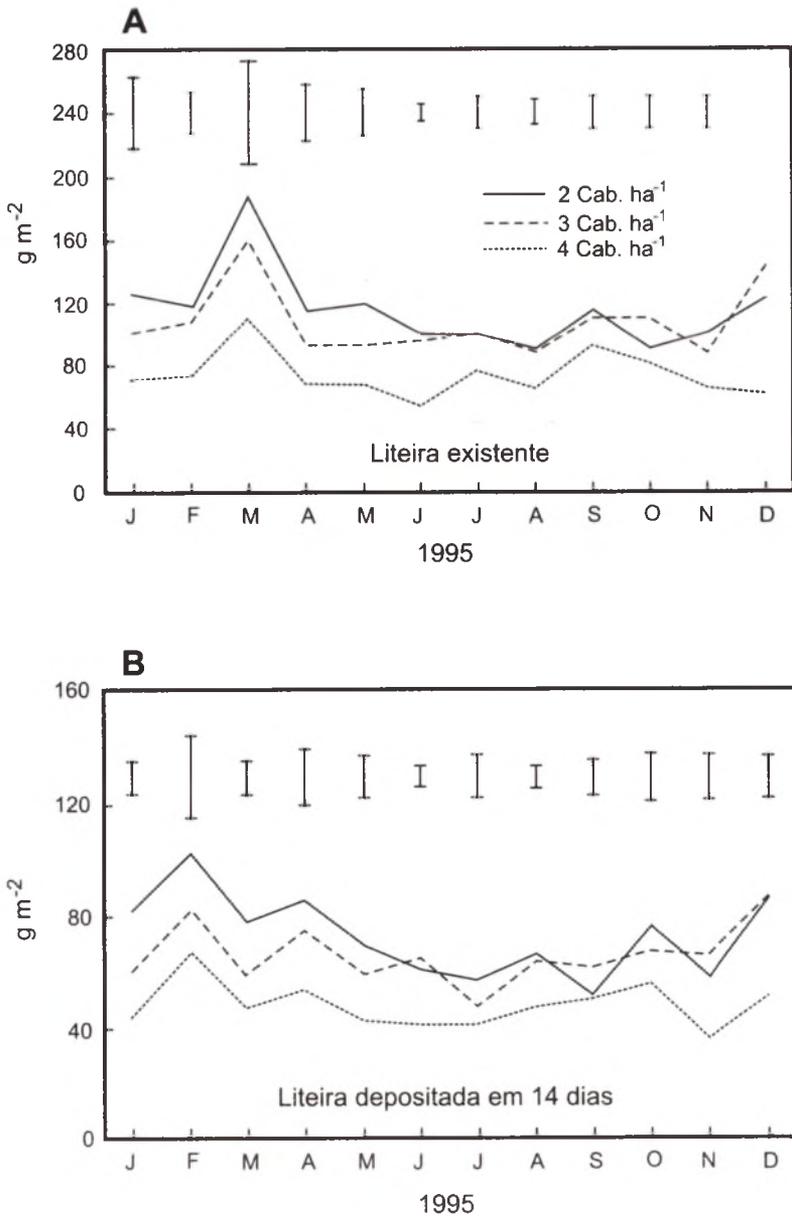
Apesar da metodologia do IBP ter sido desenvolvida nos anos 70, sendo quase que universalmente adotada até anos recentes, o trabalho de Weigert & Evans (1964), anterior a esta época, mostrou os caminhos mais apropriados para as avaliações de PPL. Estes autores observaram que, em um ecossistema em equilíbrio, o desaparecimento (decomposição) de material senescido durante o ano, é equivalente à produtividade primária líquida do sistema. Neste sentido, um ecossistema “em equilíbrio” significa um sistema onde a biomassa pode variar durante o ano, sem que se observe acúmulo de biomassa ao longo dos anos. Este conceito se aplica aos sistemas em clímax, como a mata ou floresta nativa não perturbada pelo homem, ou à vegetação nativa das savanas. A teoria de Weigert & Evans (1964) é baseada na suposição de que, sendo a biomassa vegetal constante ao longo dos anos, ou seja, que ela pode oscilar durante o ano mas sem se alterar significativamente entre os anos, a biomassa existente em qualquer época do ano é, aproximadamente, igual aquela que se encontrará 12

meses depois. Se durante este período forem somados os totais de liteira e raízes mortas formadas, este valor será equivalente à PPL. Baseado nesta teoria, Long et al. (1989) desenvolveram uma técnica para avaliar a PPL de prados e savanas, a qual depende do monitoramento da biomassa da vegetação durante o ano, das quantidades de liteira existentes e da avaliação da taxa de decomposição da liteira através do uso de *litter bags*. Estes autores compararam sua metodologia com aquela do IBP (Singh et al., 1975), em três áreas de savana da Venezuela, México e Tailândia, e concluíram que a PPL aérea destes ecossistemas foram, respectivamente, 8, 10 e 15 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, sendo que a metodologia do IBP proporcionou estimativas entre 47% e 75% menores.

Em estudos de pastagens, a produção total de forragem (equivalente à PPL aérea) é tradicionalmente avaliada através do uso de gaiolas, conforme descrito por Frame (1981), a qual apresenta limitações semelhantes à técnica do IBP, quando aplicada em pastagens tropicais. Recentemente, a equipe da Embrapa Agrobiologia, em parceria com pesquisadores da Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira - CEPLAC e da Universidade Federal de Viçosa, Estado de Minas Gerais, estudaram a ciclagem de nutrientes em pastagens de *Brachiaria humidicola*, consorciada ou não com a leguminosa forrageira *Desmodium ovalifolium*, na Estação de Zootecnia da CEPLAC em Itabela, no extremo sul da Bahia (Rezende et al., 1999). Foram avaliadas, mensalmente, a deposição, no solo, de liteira de cada pastagem, em períodos de 14 dias, assim como as quantidades de liteira existente sobre o solo, em cada mês (Figura 1). Com estes dados, foi possível estimar a taxa de decomposição da liteira, que ocorreu durante os 14 dias de coleta, e, com esta informação, as quantidades realmente depositadas no período. Quando existem animais em pastejo, uma grande proporção do material vegetal (forragem em oferta) é consumido, e a quantidade consumida também deve ser avaliada (Pereira et al., 1992; Boddey et al., 1996) e adicionada à produção total da liteira para computar a PPL aérea. No estudo de Rezende et al. (1999), as estimativas da PPL aérea das pastagens estiveram entre 24 e 34 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, bem mais altas do que as estimativas da PPL aérea da vegetação nativa dos prados, estudados por Long et al. (1989), e dos Cerrados, estimados utilizando-se a técnica do IBP. É importante destacar que as pastagens em questão tinham 7 anos de idade, foram adubadas anualmente com P e K (aproximadamente 25 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O), nunca receberam fertilizante nitrogenado, e foram manejadas de

forma adequada, pois a produtividade animal no sétimo ano foi pelo menos 80% daquela registrada no ano do estabelecimento das pastagens (Boddey et al., 1995).

A técnica utilizada por Rezende et al. (1999) foi baseada num conceito teórico lógico, essencialmente o mesmo daquele de Weigert & Evans (1964) e Long et al. (1989), e os altos valores registrados não são excepcionais, se forem consideradas as produtividades de outras culturas de via fotossintética  $C_4$  como cana de açúcar. Um estudo realizado em uma usina de cana-de-açúcar, em Pernambuco, onde não se aplicou fertilização nitrogenada e não se aplicou a queima na colheita, a produção média anual de colmos frescos, em 7 anos, foi de 65 t (Oliveira et al., 1994). Considerando-se uma percentagem de matéria seca nos colmos de 27 %, e uma produção média de palha de 11,2 t matéria seca  $ha^{-1}$  e 2,1 t ms  $ha^{-1}$  de bandeira (folhas apicais retiradas da cana na hora da colheita), a produtividade média totalizou 26,3 t  $ha^{-1} ano^{-1}$ , o que foi semelhante às estimativas de PPL aérea das pastagens estimadas por Rezende et al. (1999) em uma região com 20% ou 30% a mais de precipitação anual. A mesma técnica utilizada por Rezende et al. (1999) foi aplicada para avaliar a PPL aérea de pastagens de *Brachiaria ruziziensis*, consorciada ou não com *Stylosanthes guianensis*, na região dos Cerrados de Uberlândia, MG. Neste caso, a PPL aérea da pastagem de *B. ruziziensis* em monocultura foi estimada em 13,6 t ms  $ha^{-1} ano^{-1}$ , e do consórcio, 21,8 t ms  $ha^{-1} ano^{-1}$  (Tabela 1).



**Figura 1** - Quantidades de liteira existente (A) e depositadas em períodos de 14 dias (B) em pastagens de *Brachiaria humidicola* em monocultura pastejadas por novilhos azebuados em três diferentes taxas de lotação (2, 3 e 4 cabeças ha<sup>-1</sup>) avaliadas mensalmente no período janeiro a dezembro 1995. Valores são médias de 10 quadrantes (1 x 0,5 m) por piquete, 3 piquetes por tratamento. Barras verticais representam erros de padrão das médias

**Tabela 1** - Produção primária aérea de pastagens de *Brachiaria ruziziensis* e de *B. ruziziensis* consorciadas com *Stylosanthes guianensis*, baseada na diferença de material em oferta, na produção de liteira e no consumo animal, durante os períodos de avaliação (Ayarza et al., 1997)

Pastagem	Material em oferta			Produção de liteira <sup>1</sup>	Consumo animal <sup>2</sup>	Total
	05/02/97	14/01/98	Diferença Mg/ha			
Monocultura	4,12	2,20	- 1,92	11,48	4,03	13,59
Consórcio	6,12	4,34	- 1,78	17,39	6,21	21,82

<sup>1</sup>Somatório da diferença entre a liteira existente no início e no fim do período de amostragem, com o total de liteira depositada durante o mesmo período.

<sup>2</sup>Matéria seca consumida = 0,03 x peso vivo x tempo de pastejo (dias).

Estes dados apresentados, levantaram duas perguntas: 1. A produtividade da vegetação nativa é menor do que a estimada para pastagens de *Brachiaria*; 2. A produção primária das raízes (PPL subterrânea) é proporcional à PPL aérea.

Ainda não foram feitas comparações da PPL aérea, ou subterrânea, da vegetação nativa do Cerrado (ou de outra região) com a de pastagens de *Brachiaria* sp., utilizando-se a metodologia de Long et al. (1989) ou a de Rezende et al. (1999). A única comparação feita até hoje foi aquela citada anteriormente por Meirelles (1990) e Meirelles & Henriques (1992), os quais, mesmo estimando valores muito baixos de PPL, encontraram que a PPL aérea da *B. decumbens* foi mais do que duas vezes superior àquelas calculadas para a vegetação nativa do Cerrado. Como, geralmente, na implantação de pastagens de *Brachiaria* se corrige a acidez e, pelo menos, a deficiência de fósforo, através da aplicação de calcário e fertilizantes, é de se esperar que a produtividade das pastagens em áreas de Cerrado seja maior do que a da vegetação nativa.

Ainda não existem comparações entre a PPL subterrânea de pastagens de *Brachiaria* e da vegetação nativa do Cerrado, ou de qualquer área das savanas de América do Sul. Entretanto, Rao (1998), encontrou que a massa seca de raízes de *Brachiaria dictyoneura*, introduzida em uma área dos Llanos Orientales, na Colômbia, foi de 5,7 t ms ha<sup>-1</sup> (profundidade 0 a 80 cm) em comparação a, somente, 1,4 t ms ha<sup>-1</sup> da vegetação nativa da savana, o que indicou uma superioridade da PPL subterrânea da *Brachiaria* sobre a da savana nativa.

## A Decomposição das Raízes de *Brachiaria* e a Vegetação Nativa

Ainda não foram feitos estudos comparativos da decomposição de raízes de *Brachiaria* e da vegetação nativa de savanas ou de florestas tropicais. Um dos fatores mais importantes que controla a decomposição de diferentes resíduos vegetais é a sua relação C:N, que quanto maior, menor é a velocidade de decomposição dos resíduos. Schlesinger (1995) relatou que a relação C:N da matéria orgânica do solo nas savanas colombianas foi aproximadamente 21,5, bem maior do que a observada sob a floresta Amazônica (10 a 12), e Fisher et al. (1995), encontraram que a relação C:N das raízes mortas de *Brachiaria*, nesta região, variou entre 158 e 224. Estes autores encontraram que, após 9 anos do estabelecimento das pastagens de *Brachiaria* nos Llanos Orientales colombianos, a relação C:N da matéria orgânica do solo se elevou até 33,2. Este comportamento sugere que os resíduos subterrâneos de *Brachiaria* devem se decompor mais lentamente em relação àqueles da vegetação nativa da savana.

## Estoque de Carbono sob Pastagens de *Brachiaria* no Brasil

Ainda não foram feitos estudos específicos sobre o potencial de acúmulo de carbono no solo sob pastagens de *Brachiaria* na região do Cerrado. Entretanto, no estudo sobre decomposição de resíduos de *Brachiaria humidicola*, conduzido por Rezende et al. (1999), em Itabela, na região do Sul da Bahia (Mata Atlântica), os estoques de carbono no solo sob estas pastagens foram avaliados em comparação ao observado sob uma floresta secundária e uma pastagem degradada de *B. humidicola*, adjacentes. Amostras de solo foram retiradas das pastagens de *B. humidicola* do experimento principal (Rezende et al., 1999), até uma profundidade de 30 cm, em 1988 (ano da instalação do experimento), em 1994, e no final do estudo em 1997. Nesta profundidade, os dados obtidos apontaram para um aumento de concentração do carbono com o tempo, o que indica um acúmulo de carbono ao longo dos anos (Tabela 2). Vários estudos também foram feitos nos últimos anos, em diferentes regiões da Amazônia, e mostraram que imediatamente após o desmatamento e a implantação de pastagens, o estoque de C, no início, sofre

uma diminuição, e, subseqüentemente, passa a aumentar (Eden et al., 1990; Choné et al., 1991; Bonde et al., 1992; Feigl et al., 1995; Neill et al., 1997).

**Tabela 2** - Mudanças na quantidade de carbono no solo nas pastagens de *Brachiaria humidicola*, consorciadas ou não, com *Desmodium ovalifolium* na Estação de Zootecnia do Extremo Sul da Bahia (CEPLAC - ESSUL)

Profundidade (cm)	Pastagem					
	Monocultura			Consoiciada		
	1988	1994	1997	1988	1994	1997
Tonelada de C ha <sup>-1</sup> por camada						
0 - 5	9,50	11,66	13,06	8,90	10,70	13,32
5 - 10	9,24	9,44	10,61	8,12	9,50	10,59
10 - 15	7,74		15,61	7,08		15,60
15 - 20	6,65	27,40		6,17	29,08	
20 - 30	11,85		11,46	10,98		12,19
Total	44,99	48,49	50,74	41,25	49,27	51,69

Em 1997, foram realizadas novas amostragens do solo sob as pastagens descritas por Rezende et al. (1999), e, também na floresta secundária e em uma pastagem degradada adjacente. Nesta ocasião, foram abertas trincheiras para a avaliação da densidade aparente, e para a retirada de amostras até uma profundidade de 100 cm (Tabela 3). Embora não tenham sido feitas análises estatísticas, o estoque de carbono do solo sob as pastagens foi ligeiramente maior do que na floresta adjacente (6% a 10%). Por outro lado, os resultados preliminares obtidos na área de pastagem degradada indicaram uma redução no estoque de C em comparação à floresta.

### Manejo de Pastagens e a sua Capacidade em Acumular C no Solo

Os dados do estudo feito por Rezende et al. (1999) em Itabela (Tabela 2), indicaram que o solo sob as pastagens bem manejadas estavam acumulando C, e esta tendência deveria permanecer se mantido o manejo do sistema. Como a taxa de deposição de matéria orgânica no solo e a sua taxa de decomposição são desconhecidos, um novo valor de equilíbrio no estoque de C no solo não

poderia ser estimado, e por isso, não é possível saber até quando, e até que nível, esta acumulação irá ocorrer. De modo contrário, os dados (preliminares) de estoque de C no solo, sob a pastagem degradada, indicaram que, nesta situação, o estoque de C tende a diminuir. Trumbore et al. (1995), também encontraram que estoques de carbono em solos sob uma pastagem degradada de *Brachiaria humidicola*, no Pará, foram menores do que os observados na floresta original. Neste mesmo estudo, uma pastagem recuperada, fertilizada com fosfato e plantada com *Brachiaria brizantha*, apresentou um estoque de C no solo maior do que o da floresta original.

**Tabela 3** - Concentração e quantidade de carbono no solo nas pastagens de *Brachiaria humidicola* consorciadas ou não com *Desmodium ovalifolium*<sup>1</sup> e na mata e uma pastagem degradada adjacentes, na Estação de Zootecnia do Extremo Sul da Bahia (CEPLAC-ESSUL). Médias de 3 perfis, 3 amostras por camada

Profundidade cm	Monocultura	Consórcio	Mata	Pastagem <sup>2</sup>
			Secundária	degradada
		% C		
0 - 5	1,99	2,10	2,04	1,20
5 - 10	1,43	1,49	1,25	1,10
10 - 20	1,02	1,04	0,98	0,91
20 - 30	0,75	0,81	0,84	0,76
30 - 40	0,66	0,69	0,78	0,60
40 - 50	0,57	0,61	0,68	0,53
50 - 60	0,53	0,54	0,57	0,43
60 - 80	0,45	0,48	0,47	0,37
80 - 100	0,38	0,40	0,37	0,35
cm		Toneladas de C/ camada		
0 - 5	13,06	13,32	11,24	8,19
5 - 10	10,61	10,59	8,06	7,30
10 - 20	15,61	15,60	14,06	11,46
20 - 30	11,46	12,19	11,38	8,87
30 - 40	9,88	10,21	10,06	6,11
40 - 50	7,91	8,57	8,80	5,63
50 - 60	7,40	7,48	7,34	4,59
60 - 80	11,77	12,63	11,83	7,18
80 - 100	9,36	10,02	8,95	7,18
Total	97,06	100,60	91,73	66,51

<sup>1</sup> Médias de três taxas (2, 3 e 4 cab. ha<sup>-1</sup>) de lotação.

<sup>2</sup> Amostras de 1 perfil, 3 amostras por camada.

Poucos pecuaristas controlam a taxa de lotação de suas pastagens para evitar o sobrepastejo, e uma minoria faz a adubação de manutenção. Em um estudo conduzido na Colômbia, Lascano & Euclides (1996) mostraram que, com adubação de manutenção (e.g. 25 kg  $P_2O_5$  e 25 kg  $K_2O$   $ha^{-1}$   $ano^{-1}$ ), pastagens de *Brachiaria* bem manejadas poderiam manter sua produtividade por muito tempo. Hoje, com 17 anos de idade, estas pastagens ainda se mantêm produtivas. Resultados semelhantes foram registrados por Boddey et al. (1996) em um período de 8 anos de pastejo contínuo na estação de Itabela, Estado da Bahia. As informações aqui apresentadas permitem concluir que áreas de pastagens de *Brachiaria* sp., bem manejadas, podem ser importantes sítios de acúmulo de C no solo. Ao mesmo tempo, essas pastagens podem suportar taxas de lotação de bovinos de 1 a 3 UA  $ha^{-1}$ , com uma produtividade entre 300 e 1.000 kg de ganho de peso  $ha^{-1}$   $ano^{-1}$ , de forma sustentável.

No desmatamento da floresta Amazônica ou da mata Atlântica, para a instalação de pastagens, o estoque de C retirado da área, na destruição da vegetação nativa, está entre 100 e 300 t C  $ha^{-1}$ . Por isso, além de outras considerações, não faz nenhum sentido desmatar esta vegetação com o objetivo de seqüestrar C no solo. Entretanto, a recuperação de pastagens degradadas nessas regiões é uma opção que não somente permitiria a retomada da produção eficiente de bovinos de corte, mas manteria a integridade física e química do solo, com o simultâneo aumento dos estoques de carbono do solo. No caso das áreas de Cerrado (com exceção ao *cerradão*), onde se encontram as maiores áreas de pastagens de *Brachiaria* do País, a situação é bem diferente. Como o estoque de C na parte aérea da vegetação dos campos sujos e campos limpos dos cerrados é muito menor do que nas florestas, ou seja, geralmente não ultrapassam 15 t C  $ha^{-1}$ , as pastagens produtivas podem aumentar os estoques do carbono no sistema solo/planta além dos níveis da vegetação nativa. Uma vez que existem mais de 40 M ha de pastagens na região do Cerrado, das quais, mais de 50% podem ser consideradas degradadas (Macedo, 1995), tudo indica que a recuperação destas terá um grande impacto do ponto de vista da produção animal. Concomitantemente, o aumento das áreas de pastagens produtivas poderá contribuir significativamente para a melhoria dos parâmetros hídricos e para a redução da erosão nestas regiões, além da diminuição do "efeito estufa" pelo seqüestro de C.

## Agradecimentos

Os estudos preliminares feitos pelo equipe de Embrapa Agrobiologia sobre ao seqüestro do C em solos sob *Brachiaria* foram feitos em cooperação com pesquisadores do CEPEC/CEPLAC (Itabuna, Bahia) e financiadas pelo Department of International Development (DID) do Governo Britânico e pelo Programa PADCT 3 do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), do Brasil. Os autores Segundo Urquiaga e Robert M. Boddey agradecem o CNPq por bolsas de pesquisa.

## Referências

- AYARZA, M.; VILELA, L.; ALVES, B.J.R.; OLIVEIRA, O.C.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M. *Introdução de Stylosanthes guianensis cv. Mineirão em pastagem de Brachiaria ruzizidensis: Influência na produção animal e vegetal*. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 1997. (Embrapa Agrobiologia. Boletim Técnico, 1).
- BATMANIAN, G.J. *Efeitos do fogo sobre a produção primária e a acumulação de nutrientes do estrato rasteiro de um Cerrado*. Brasília, DF: Universidade de Brasília, 1983. 77p. Tese de Mestrado.
- BODDEY, R.M.; RAO, I.M.; THOMAS, R.J. Nutrient cycling and environmental impact of *Brachiaria* pastures. In: MILES, J.W.; MAASS, B.L.; VALLE, C.B. (ed.), *Brachiaria: biology, agronomy and improvement*. Cali: CIAT, 1996. p. 72-86.
- BODDEY, R.M.; REZENDE, C.D.P.; PEREIRA, J.M.; CANTARUTTI, R.B.; ALVES, B.J.R.; FERREIRA, E.; RICHTER, M.; CADISCH, G.; URQUIAGA, S. The nitrogen cycle in pure grass and grass/legume pastures: Evaluation of pasture sustainability. In: FAO/IAEA. (ed.), *Nuclear techniques in soil-plant studies for sustainable agriculture and environmental preservation*. Vienna, Austria :FAO/IAEA, 1995. p. 307-319.
- BONDE, T.A.; CHRISTENSEN, B.T.; CERRI, C.C. Dynamics of soil organic matter as reflected by natural <sup>13</sup>C abundance in particle size fractions of forested and cultivated oxisols. *Soil Biology Biochemistry*, v. 24, p. 275-277, 1992.

CEZAR, H.L. *Efeitos da queima e corte sobre a vegetação de Campo sujo na Fazenda Água Limpa, Distrito Federal*. Brasília, DF: Universidade de Brasília, 1980. 59 p. Tese de Mestrado.

CHONÉ, T.; ANDREUX, J.C.; CORREA, J.C.; VOLKOFF, B.; CERRI, C.C. Changes in organic matter in an oxisol from the central Amazonian forest during eight years as pasture, determined by  $^{13}\text{C}$  composition. In: BERTHELIN, J. (ed.), *Diversity of environmental biogeochemistry*. New York :Elsevier, 1991. p. 307-405.

EDEN, M.J.; MCGREGOR, D.F.M.; VIERA, N.A.Q. III. Pasture development on cleared forest land in northern Amazonia. *Geographical Journal*, v. 156, p. 283-296, 1990.

EITEN, G. Cerrado vegetation of Brazil. *Botanical Review*, v. 38, p. 201-341, 1972.

FEIGL, B.J.; MELILLO, J.; CERRI, C.C. Changes in the origin and quality of soil organic matter after pasture introduction in Rondonia (Brazil). *Plant and Soil*, v. 175, n.1, p. 21-29, 1995.

FISHER, M.J.; RAO, I.M.; AYARZA, M.A.; LASCANO, C.E.; SANZ, J.I.; THOMAS, R.J.; VERA, R.R. Carbon storage by introduced deep rooted grasses in the South American savannas. *Nature*, v. 371, n. 6494, p. 236-237, 1994.

FISHER, M.J.; RAO, I.M.; LASCANO, C.E.; SANZ, J.I.; THOMAS, R.J.; VERA, R.R.; AYARZA, M. Pasture soils as carbon sink. *Nature*, v. 376, p. 472-473, 1995.

FRAME, J. Herbage mass. In: HODGSON, J., ed. *Sward measurement handbook*. Maidenhead: British Grassland Society, p. 36-69, 1981.

LASCANO, C.E.; EUCLIDES, V.P.B. Nutritional quality and animal production of Brachiaria pastures. In: MILES, J.W.; MAASS, B.L.; VALLE, C.B. (ed.), *Brachiaria: biology, agronomy and improvement*. Cali: CIAT, 1996. p. 106-123.

LONG, S.P.; GARCIA MOYA, E.; IMBAMBA, S.K.; KAMNALRUT, A.; PIEDADE, M.T.F.; SCURLOCK, J.M.O.; SHEN, Y.K.; HALL, D.O. Primary productivity of natural grass ecosystems. *Plant and Soil*, v. 115, p. 155-166, 1989.

MACEDO, M.C.M. Pastagens no ecossistema Cerrados: Pesquisa o desenvolvimento sustentável. In: ANDRADE, R.P.; BARCELLOS, A.O.; ROCHA, C.M.C. (ed.), *Pastagens nos ecossistemas brasileiros*. Viçosa: UFV, 1995. p. 28-62.

MEIRELLES, M.L.; HENRIQUES, R.P. Produção primária líquida em área queimada e não queimada de campo sujo de cerrado (Planaltina-DF). *Acta Botânica Brasileira*, v. 6, n. 2, p. 3-13, 1992.

MEIRELLES, M.L. Produção primária de pastagem de *Brachiaria decumbens*. *Revista Ceres*, v. 37, n. 209, p. 16-24, 1990.

NELL, C.; MELILLO, J.; STEUDLER, P.A.; CERRI, C.C.; MORAES, J.F.L.; PICCOLO, M.C.; BRITO, M. Soil carbon and nitrogen stocks following forest clearing for pasture in the southwestern Brazilian amazon. *Ecological Applications*, v. 7, n. 4, p. 1216-1225, 1997.

OLIVEIRA, O.C.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M. Long-term effects of pre-harvest burning on sugar cane production and soil fertility. *Sugar Cane*, v. 2, n. 12, p. 17, 1994.

PEREIRA, J.M.; NASCIMENTO JR, D.; SANTANA, J.R.; CANTARUTTI, R.B.; LEO, M.I. Teor de proteína bruta e digestibilidade *in vitro* da matéria seca da forragem disponível e da dieta selecionada por bovinos em pastagens de *Brachiaria humidicola* (Rendle) Schweickt, em monocultivo ou consorciado com leguminosas, submetida a diferentes taxas de lotação. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 21, n. 1, p. 104-117, 1992.

RAO, I.M. Root distribution and production in native and introduced pastures in the South American savannas. In: BOX, J. E. (ed.), *Root demographics and their efficiencies in sustainable agriculture, grasslands and forest ecosystems*. Dordrecht: Kluwer, 1998 p. 19-41.

REZENDE, C.D.P.; CANTARUTTI, R.B.; BRAGA, J.M.; GOMIDE, J.A.; PEREIRA, J.M.; FERREIRA, E.; TARRÉ, R.M.; MACEDO, R.O.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; CADISCH, G.; GILLER, K.; BODDEY, R.M. Litter deposition and disappearance in *Brachiaria* pastures in the Atlantic region of the South of Bahia, Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 54, n. 2, p. 99-112, 1999.

SCHLESINGER, W.H. An overview of the carbon cycle. In: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; LEVINE, E.; STEWART, B.A., ed. *Soils and global change*. Boca Raton: Lewis Publishers, p. 9-25, 1995.

SINGH, J.S.; LAVENROTH, W.K.; STEINHURST, R.K. Review and assessment of various techniques for estimating net aerial primary production in grasslands from harvested data. *Botanical Review*, v. 41, p. 181-232, 1975.

TRUMBORE, S.; DAVIDSON, E.A.; CAMARGO, P.B.; NEPSTAD, D.; MARTINELLI, L.A. Below-ground cycling of carbon in forest and pastures of eastern Amazonia. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 9, p. 512-528, 1995.

WEIGERT, R.G.; EVANS, F.C. Primary production and the disappearance of dead vegetation on an old field in Southeastern Michigan. *Ecology*, v. 45, p. 49-63, 1964.

ZIMMER, A.H.; EUCLIDES FILHO, K.P. As pastagens e a pecuária de corte brasileira. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUÇÃO ANIMAL EM PASTEJO. 1997, Viçosa. *Anais...* Viçosa: UFV, 1997. p. 350-379.



## 11 Sistemas de Manejo do Solo e Balanço de Carbono no Cerrado

DIMAS VITAL SIQUEIRA RESCK  
Embrapa Cerrados, Planaltina, DF, Brasil

**Resumo.** *O Cerrado contribui significativamente para a produção agropecuária e florestal do País, além de ser uma das últimas fronteiras do planeta para satisfazer as necessidades básicas crescentes da humanidade. Apesar de seus 46 milhões de hectares potencialmente utilizáveis, há muito por se fazer para verticalizar a produção agrossilvipastoril dos seus 75 milhões de hectares atualmente sendo utilizados, nos quais se incluem 21 milhões de hectares com pastagens nativas. Estima-se que o uso da terra e o desmatamento no mundo contribuem anualmente com 1,5 Pg de C para a taxa corrente de aumento anual da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera de cerca de 3,2 Pg. No ecossistema Cerrado, foram detectados sistemas de manejo altamente conservadores de carbono orgânico no solo, tais como: plantio direto, pastagem e áreas reflorestadas com espécies dos gêneros Pinus e Eucalipto. Entretanto, devido às imposições desse ecossistema em relação às condições climáticas (período seco prolongado e veranico na estação chuvosa) e as de solo (solos ácidos e pobres em nutrientes com baixa capacidade de armazenamento de água), a utilização imediata e generalizada desses sistemas de manejo seria, no mínimo, de alto risco. Para isso, outros sistemas de manejo do solo que incluem os arados de discos e de aivecas e escarificadores, aplicados em uma forma dinâmica, têm um papel importante no condicionamento químico, físico, físico-químico e biológico do solo, como mitigadores das restrições do ecossistema Cerrado e, portanto, não podem ser esquecidos ou relegados a um segundo plano, sob pena de não serem resolvidos os problemas cruciais que enfrentaremos neste milênio.*

## Soil Management Systems and Carbon Balance in the Cerrado

***Abstract.** The Cerrado region makes a significant contribution to the national agropastoral and forest production. The Cerrado is among the last agricultural frontiers on Earth to fulfil the ever-growing basic necessities of mankind. Although there remain 46 million hectares yet to be exploited, much could be done to improve agricultural and forest production in the 75 million hectares currently being used, in which are included 21 million ha of native pastures. It is estimated that land use and deforestation contribute 1.5 Pg of C annually to the current annual increase in atmospheric CO<sub>2</sub>, which is about 3.2 Pg. Highly organic carbon conservators management systems, such as no-tillage, pastures and forests of Pinus and Eucalyptus species, have been detected for the Cerrado ecosystem. However, ecosystem constraints related to the prevailing climate (long drought period and dry spells during the rainy season) and soil (acidic, scarce plant nutrients and low water availability) conditions would make the immediate, generalised utilisation of these systems highly risky. Nevertheless, there are other management systems that use implements such as disk and mouldboard ploughs and chisels and could play a very important role in improving the chemical, physical, physicochemical, and biological properties of the soil and, thus, in mitigating the constraints found in the Cerrado ecosystem. Ignoring or thinking these systems unimportant would make it impossible to solve the crucial problems that the country will be facing in this millennium.*

### Introdução

O Cerrado contribui significativamente para a produção agropecuária e florestal do País. Estima-se que no ano 2025, a quantidade de terra, disponível no planeta, para produção de alimento, fibras e energia, para uma pessoa, será menos do que 2 hectares. Particularmente no Cerrado e na Amazônia milhares de hectares de terras com vegetação nativa estão sendo desmatados anualmente e convertidos em pastagens, empresas ou assentamentos agrícolas.

Aproximadamente 46 milhões de hectares das terras do Cerrado são potencialmente agricultáveis, o que corresponde a 61% das terras atualmente sendo ocupadas pelo setor agrossilvipastoril. Apesar dessa enorme extensão de terra que está sendo atualmente utilizada e da importante contribuição dessa região para o País, as produtividades das culturas ainda são, em média, baixas apesar dos avanços tecnológicos conquistados nas últimas três décadas. Isso se deve à falta de harmonia no uso dos sistemas de manejo dos solos, que são facilmente degradados, resultando em quedas de produtividades, perdas de carbono orgânico (C), degradação da estrutura do solo, erosão, enxurrada, sedimentação e contaminação dos rios da região (Resck et al., 2000).

A reserva total de carbono do solo no mundo compreende o reservatório de carbono orgânico que é estimado em 1.500 a 2.000 Pg e o reservatório de carbono inorgânico em 700 a 1.000 Pg (1 Pg = pentagrama =  $10^{15}$ g). A concentração de  $\text{CO}_2$  na atmosfera teve um aumento de 30%, de 280 ppmv em 1850 para cerca de 360 ppmv em 1995. A taxa corrente de aumento anual de  $\text{CO}_2$  na atmosfera de 1,5 ppmv ou 3,2 Pg, é devido a duas fontes principais: a) combustão de combustíveis fósseis, 5,5 Pg C ano<sup>-1</sup>, e b) uso da terra e desmatamento, 1,5 Pg C ano<sup>-1</sup> (International..., 1996).

Existe forte correlação entre carbono orgânico e a qualidade do solo. O solo pode ser um significativo dreno para o  $\text{CO}_2$  da atmosfera e o C então acumulado pode melhorar a qualidade do solo e a produtividade. Para isso, o uso apropriado e o manejo criterioso do sistema solo-nutrientes-água-planta pode aumentar o potencial de seqüestro de  $\text{CO}_2$ , revertendo as tendências históricas de perdas pelo uso das terras agrícolas.

Neste trabalho, pretende-se mostrar que, para as características do ecossistema Cerrado, em relação a fatores como: clima, solo, vegetação e relevo, existe uma dinâmica de sistemas de manejo do solo a ser seguida no tempo, com o objetivo de aumentar a produção de grãos, carne, fibra, madeira e energia para o bem-estar social e econômico da população, além do aumento da oferta de água de boa qualidade, que possa ajudar a reter o carbono no solo, colaborando para minimizar as possíveis mudanças climáticas globais e/ou as condições de vida.

## Estoque de Carbono nos Diferentes Tipos Fisionômicos do Ecossistema Cerrado

O Cerrado possui 204 milhões de hectares de terra, dos quais, aproximadamente, 125 milhões de hectares são apropriados para atividades agrícolas, levando-se em conta apenas os Latossolos que ocupam 46% de toda a região e os 15,2% ocupados pelas Areias Quartzosas (Adámoli et al., 1986). Como o Código Florestal em vigor (Lei 4.771 de 1995 já modificada por lei, decretos e medidas provisórias e, atualmente, em processo de revisão e aprovação pelo Congresso Nacional), requer que 20% de cada propriedade seja preservada, cerca de 100 milhões de hectares estão disponíveis para o cultivo. Destes estima-se que: 12 milhões estão ocupados com culturas anuais e 2 milhões com culturas perenes (Macedo, 1996), e 40 milhões com pastagens cultivadas (Spain et al., 1996). Potencialmente cultiváveis restam, portanto, aproximadamente, 46 milhões de hectares. Dos outros 79 milhões de hectares da região, cerca de 21 milhões são pastagens nativas (27%), e 2,4 milhões (3%), constituem as reservas legais (Embrapa, 1994). Evidentemente que se trata apenas de estimativas, e estudos com maior grau de precisão já há muito se fazem necessários.

A vegetação mostra uma diversidade fisionômica que, de acordo com sua biomassa, é chamada de Campo Limpo onde predominam as gramíneas, o Campo Sujo com alguns arbustos e árvores e dominância de gramíneas, o Cerrado *stricto sensu* onde existe um balanço entre arbustos, árvores e gramíneas, e o Cerradão onde as árvores dominam, com algumas atingindo 6 a 7 metros (Resck & Gomes, 1998).

De acordo com Azevedo & Caser (1980), o Cerrado tem várias influências climáticas (Tabela 1).

Cerca de 80% da precipitação ocorre de outubro a a março, com veranicos de duração média de 2 a 3 semanas. A precipitação em 75% da região varia de 1.000 a 1.800 mm e o déficit em água em 88% da região dura de 4 a 7 meses (Adámoli et al., 1986).

A maioria dos estudos no Cerrado sobre estoque de carbono são incompletos, isto é, foram feitos até profundidades superficiais (no máximo 1 metro) ou estão incompletos com respeito à densidade aparente do solo e/ou outras propriedades físicas, físico-químicas e químicas do solo. Já as propriedades microbiológicas são as menos estudadas.

**Tabela 1** - Cerrado: algumas características das sub-regiões sob diferentes influências climáticas

Cerrado Sub-regiões	Precipitação Total (mm)	Época Seca (Nº de Meses)	Época Chuvosa	Temperatura Média (C°)	Solos Dominantes
Área Nuclear	1400 a 1700	4-5	Primavera e verão	22-24	Latossolo Vermelho-Amarelo e Litossol
Influência Nordeste	500 a 800	8-9	Verão	24-26	Areias Quartzosas e Latossolo Vermelho-Amarelo
Influência Amazônica	2000 a 2300	4-5	Primavera e verão	24-26	Latossolo Vermelho-Amarelo, Areias Quartzosas e Lateritas
Influência Austral-Atlântica	1400 a 1700	4-5	Primavera e verão	18-20	Latossolos Vermelho-Escuro e Vermelho-Amarelo, Podzólicos e Litólicos
Influência Austral-continental	1100 a 1400	2-3	Primavera e verão	20-22	Podzólico Vermelho-Amarelo

Fonte: Adaptado de Azevedo & Caser (1980)

Brossard et al. (1997) fizeram um estudo sobre o estoque de carbono em sete perfis de solo até a profundidade de 2,1 metros em áreas correspondentes a Cerradão, Cerrado, Campo Sujo, Campo Limpo, Mata Ciliar, pastagem nativa sob vegetação de Cerrado (Cerrado pastoreado) e pastagem (Tabela 2).

Concluíram que há um decréscimo dos conteúdos de carbono com a profundidade, sendo que no metro superior os estoques variaram de 1 a 4 kg C m<sup>-2</sup> por camada de 10 cm. A ordem decrescente dos estoques de C foram: Campo Limpo e Campo Sujo > pastagem, Cerrado pastoreado e Mata de Galeria > Cerradão e Cerrado. A partir de um metro de profundidade, a variação não foi significativa, com valores entre 0,5 e 1 kg C m<sup>-2</sup>. Encontraram menos de 25% de carbono nos primeiros 25 cm da superfície e 50% na camada de 0-50 cm, tendo ainda detectado a presença de materiais carbonizados (carvões vegetais), estimada entre 3 e 5 kg C m<sup>-2</sup>.

**Tabela 2** - Estoques corrigidos de carbono ( $\text{kg C m}^{-2}$ ) nas camadas de 0-100 cm e 0-210 cm e estimativa do conteúdo de carbono ( $\text{kg C m}^{-2}$ ) dos carvões nos perfis dos solos estudados

Perfis Analisados	Estoque de carbono ( $\text{kg C m}^{-2}$ )		Carbono em carvão
	0-100	0-210	0-210
Cerradão	12,72	18,95	4,0
Cerrado	12,25	19,56	3,0
Campo Sujo	16,73	23,59	4,6
Campo Limpo	18,47	24,76	4,9
Mata Ciliar	14,42	20,67	4,1
Cerrado Pastoreado	14,82	22,59	5,0
Pastagem	13,66	20,53	4,7

Fonte: Adaptado de Brossard et al. (1997)

Resck et al. (2000) analisando o perfil de Latossolo Vermelho-Escuro argiloso de 56 parcelas virgens cobertas com vegetação de Cerrado encontraram, em média,  $14,52 \text{ kg C m}^{-2}$ , para os primeiros 100 cm de solo (Tabela 3). Cerca de 77% apenas do carbono é recuperado pelo método de Walkley & Black (1934), o que daria  $18,88 \text{ kg m}^{-2}$  para um perfil de 100 cm. Assumindo-se  $3 \text{ kg C m}^{-2}$  obtidos do carvão mineral o estoque seria de  $15,88 \text{ kg m}^{-2}$ .

A diferença em relação ao valor encontrado por Brossard et al. (1997) foi devido aos valores mais elevados de densidade aparente encontrados, nesse caso, no perfil do solo, além de se tratar de um Cerrado muito rico, pois aproximadamente 222 espécies foram encontradas em uma área de 3 ha (Resck & Gomes, 1998).

Em uma estimativa feita nos solos da Bacia Amazônica brasileira, Moraes (1991) estimou o estoque de carbono em  $\text{kg m}^{-2}$  até 100 cm de profundidade para os Latossolos: Amarelo, Vermelho-Amarelo, Vermelho-Escuro e Roxo,  $8,49 \pm 0,38$ ,  $10,51 \pm 0,39$ ,  $9,30 \pm 0,84$  e  $21,65 \pm 11,36$ , respectivamente.

Cerri (1996) estima que o aporte de carbono para os solos da Amazônia vem principalmente da liteira e varia de  $0,35$  a  $0,40 \text{ kg m}^{-2}$ , com rápida mineralização da matéria vegetal e humificação de parte do carbono que é fixado na forma de complexo argilo-húmico. Considerando todos os solos da Bacia, estão estocados  $47 \text{ Pg}$  de carbono, sendo 45% deste total concentrado nos primeiros 20 cm de profundidade.

**Tabela 3** - Estoque de carbono orgânico em um Latossolo Vermelho-Escuro sob vegetação de Cerrado *stricto sensu*

Profundidade	Dap (kg ms <sup>-3</sup> )	C (Dag kg <sup>-1</sup> )	C(kg m <sup>-2</sup> )	C (t ha <sup>-1</sup> )
0-5	0,96	3,19	1,54	15,36
5-10	0,96	2,63	1,26	12,6
10-20	0,93	2,13	1,97	19,74
20-30	1,01	1,33	1,34	13,37
30-40	1,04	1,46	1,52	15,25
40-60	1,07	1,14	2,44	24,40
60-80	1,09	1,02	2,21	22,13
80-100	1,09	1,03	2,24	22,37
Total/média	1,02 ± 0,06	1,74 ± 0,82	14,52	145,22

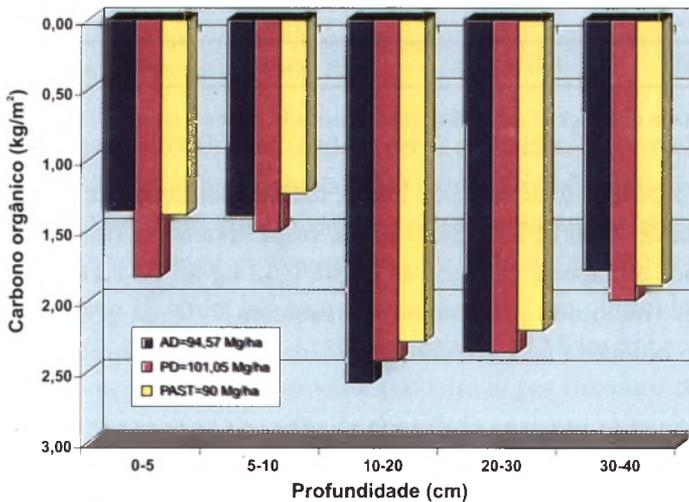
**Fonte:** Adaptado de Resck et al.(2000); Dap= densidade aparente do solo; Dag=decagrama

A produção total anual de liteira, medida nos ecossistemas Cerradão e Cerrado, foi de 7800 kg/ha e 2100 kg/ha, respectivamente (média de 3 anos). Isso significa um aporte de cerca de 0,45 e 0,12 kg m<sup>-2</sup> de carbono. As folhas senescentes (incluindo gramíneas) representam 77% da produção total de resíduos de biomassa no Cerradão, e 84% no Cerrado (Peres et al., 1983).

## O Efeito de Diferentes Sistemas de Manejo nos Teores de Carbono do Solo

Nas últimas três décadas, tem ocorrido grande aumento da atividade agrícola nos trópicos, particularmente no Cerrado, onde a vegetação nativa cedeu lugar às extensas áreas cultivadas para a produção de alimentos, carne, fibras e energia. Tais modificações não seriam possíveis sem a incorporação de corretivos e fertilizantes, pois os solos de Cerrado, reconhecidamente, em sua maioria, são ácidos e apresentam disponibilidades de nutrientes insuficientes para sustentar o crescimento das culturas introduzidas. Paralelamente, têm sido utilizados diferentes usos e sistemas de manejo do solo, o que resulta em maiores ou menores estoques de carbono no solo.

Resck et al. (2000) fizeram a caracterização química e física de parcelas com diferentes sistemas de manejo aplicados ao solo durante 15 anos: uma área em sistema de plantio direto, uma área preparada com arado de discos e uma área de pastagem de braquiária (*Brachiaria decumbens*) degradada, com 18 anos. Todos esses tratamentos localizavam-se em Latossolo Vermelho-Escuro argiloso (média, 48% de argila). Observa-se que em um perfil de solo de 40 cm o sistema de plantio direto acumulou mais carbono orgânico, durante esses anos, do que áreas preparadas com arado de discos ou somente com pastagem, tendo sido as diferenças mais pronunciadas nos primeiros 10 cm de solo (Figura 1).

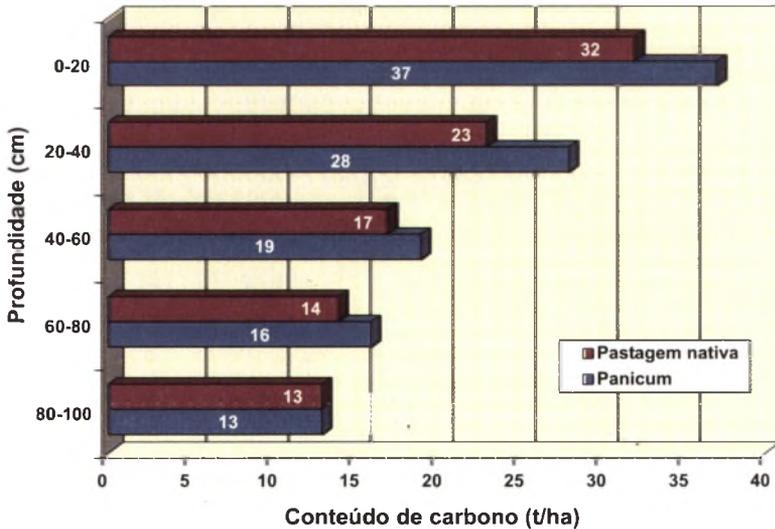


**Figura 1** - Estoque de carbono orgânico em diferentes sistemas de manejo. Adaptado de Resck et al. (2000). AD= arado de disco; PD= plantio direto; PAST= pastagem

Entre os vários tipos de pastagens há, também, significativas diferenças nos estoques de carbono: 113 t/ha de carbono orgânico para uma área plantada com *Panicum maximum* (mais de 3 anos após o plantio) e 99 t/ha para uma área estabelecida com pastagem nativa (Figura 2), considerando-se um perfil de 100 cm do solo.

No Oeste do Estado da Bahia, Silva et al. (1994) observaram a taxa de queda do carbono orgânico do solo com o tempo de cultivo em Areias Quartzosas (AQ), Latossolo Vermelho-Amarelo textura franca (LVm) e Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso (LVa).

Para um período de cinco anos, foi utilizado um modelo exponencial para calcular as perdas de carbono orgânico do solo. O modelo utilizado é expresso pela equação  $CO_t = CO_e + (CO_i - CO_e) e^{-kt}$ , onde  $CO_t$  = teor de carbono orgânico no momento  $t$ ;  $CO_e$  = carbono orgânico em equilíbrio;  $CO_i$  = teor inicial de carbono orgânico,  $k$  = taxa de perda de carbono orgânico ( $\% \text{ ano}^{-1}$ ), e  $t$  = tempo (Dalal & Mayer, 1986).

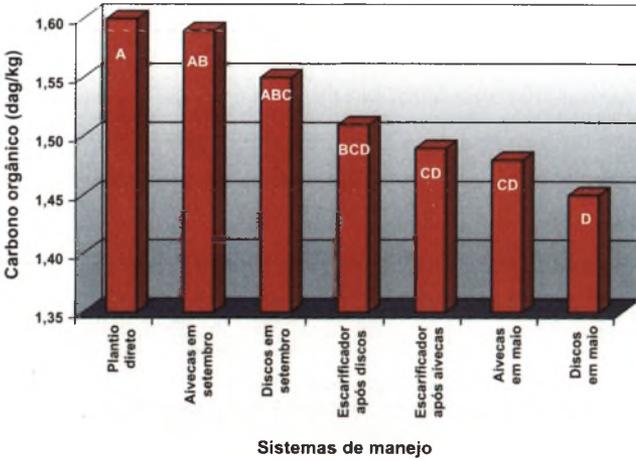


**Figura 2** - Distribuição do carbono orgânico no perfil de um Latossolo Vermelho-Escuro argiloso sob pastagem. Adaptado de Silva et al. (1997)

A taxa de perda de carbono orgânico do solo foi 0,32, 0,30 e 0,24%  $\text{ano}^{-1}$ , respectivamente, na AQ, LVm, e LVma (LVm com argila > 30% e LVa).

A meia-vida ( $t_{1/2}$ ) do carbono do LVma (2,90 anos) foi um pouco maior do que da AQ e do LVm (2,16 and 2,31 anos, respectivamente), e, após cinco anos, as perdas relativas de C em relação ao estoque inicial foram 73, 68 e 45%, respectivamente, na AQ, LVm, e LVma.

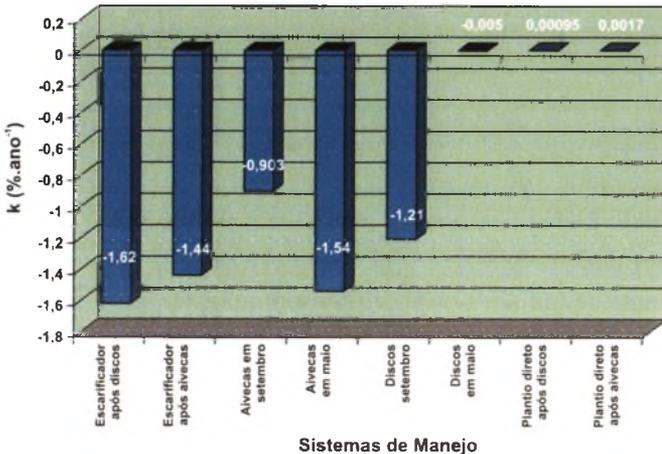
Os sistemas de manejo afetam o carbono orgânico do solo diferentemente, como se mostra na Figura 3, não somente pelo modo que cada sistema de preparo (implemento) atua no solo, mas também pela época do ano em que os restos culturais são incorporados ao solo.



**Figura 3** - Efeito de diferentes sistemas de manejo no teor de carbono orgânico do solo em uma camada de 0 a 40 cm, durante o período de 1986 a 1988

Fonte: Adaptado de Resck & Silva (1995)

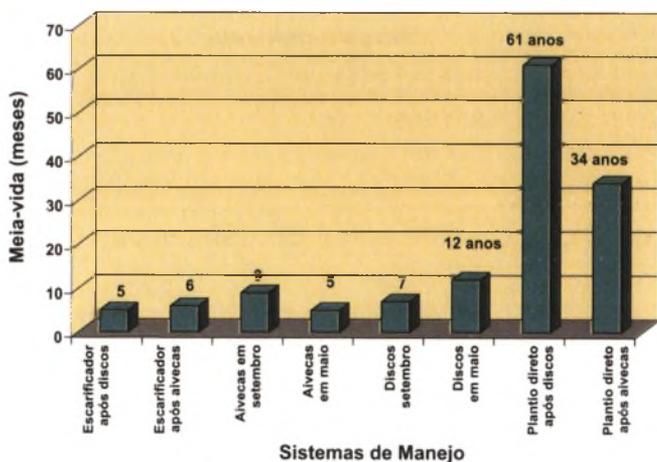
A incorporação, com o arado de alvecas, de resíduos de cultura no mês de setembro, isto é, antes da época de plantio no Cerrado e no mês de maio, ou após a colheita da cultura principal, implica, no segundo caso, uma operação de aração a mais, o que resulta em uma taxa de decomposição do carbono orgânico do solo mais alta (Figura 4), emitindo mais CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Isso se dá devido à quebra da proteção física do carbono orgânico, proporcionada pelos agregados do solo.



**Figura 4** - Taxas de decomposição do carbono orgânico em Latossolo Vermelho-Escuro argiloso durante o período de 1986 a 1988

Fonte: Adaptado de Resck & Silva (1995)

A taxa de decomposição do carbono orgânico causada pelo arado de discos, no mês de setembro é comparável àquela do arado de aivecas, no mês de maio. Para o mês de maio, entretanto, no caso de arado de discos, que revolve e homogeneiza inteiramente o solo, obteve-se valores de meia-vida para o carbono orgânico de 12 anos. No caso da incorporação de restos culturais em setembro, essa meia-vida foi de 7 meses, demonstrando, possivelmente, no caso de maio, um grau extremamente avançado de decomposição, humificação e de lignificação (Figura 5). Isso é devido a um maior grau de pulverização do solo, expondo a matéria orgânica à decomposição pelos microorganismos, já que, no caso deste sistema de preparo, ara-se em maio e novamente em setembro, na época do início das chuvas.

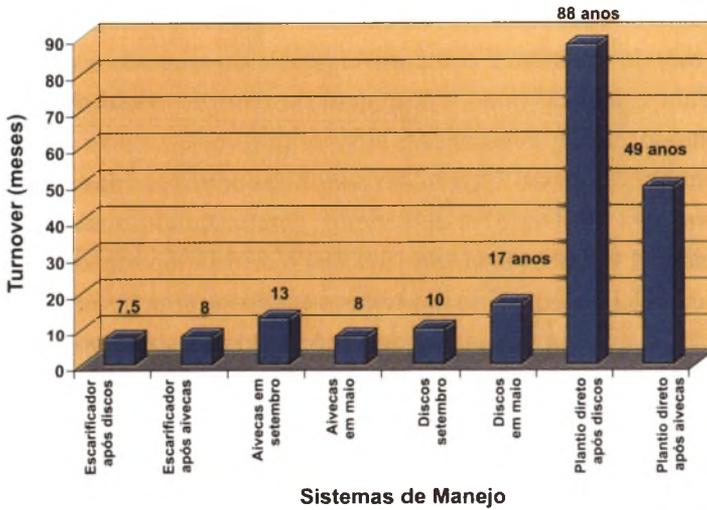


**Figura 5** - Meia-vida do carbono orgânico em diferentes sistemas de manejo do solo

Fonte: Adaptado de Resck & Silva (1995)

Acredita-se que se tenha chegado a um grau tão alto de lignificação, em que o tempo de *turnover*, isto é, o tempo necessário para a completa decomposição e transformação dos restos culturais, é longo, 17 anos, comparado com o de apenas 10 meses para a época de setembro (Figura 6).

Dos sistemas estudados, o plantio direto é aquele que conserva mais carbono orgânico. Portanto, esse sistema possui taxas de decomposição até positivas, o que significa que no tempo, não há perda, mas sim acúmulo de carbono (Figura 4).



**Figura 6** - Tempo de *turnover* do carbono orgânico em diferentes sistemas de manejo do solo  
**Fonte:** Adaptado de Resck & Silva (1995)

## Evolução de C-CO<sub>2</sub> em Diferentes Ecossistemas

A continuidade e a sobrevivência dos ecossistemas naturais são mantidas pela estreita e harmônica integração da cobertura vegetal com o sistema biológico do solo, através de processos essenciais, como a ciclagem de nutrientes e a formação e decomposição da matéria orgânica. Com a retirada da cobertura vegetal, essa harmonia é quebrada, fisicamente, com as operações de preparo do solo e alterada quimicamente, pela incorporação de corretivos e fertilizantes, causando o desequilíbrio do sistema. Como consequência, há modificação dos fluxos de troca de gases pela aceleração ou retardamento dos processos biológicos de ciclagem de nutrientes e dos processos de formação e/ou decomposição da matéria orgânica.

Resck et al. (1996) fizeram ensaios para o monitoramento de CO<sub>2</sub> em vários agroecossistemas, incluindo experimentos com culturas anuais, pastagem e floresta, instalados na Embrapa Cerrados (Planaltina-DF), além de uma área de vegetação nativa de Cerrado.

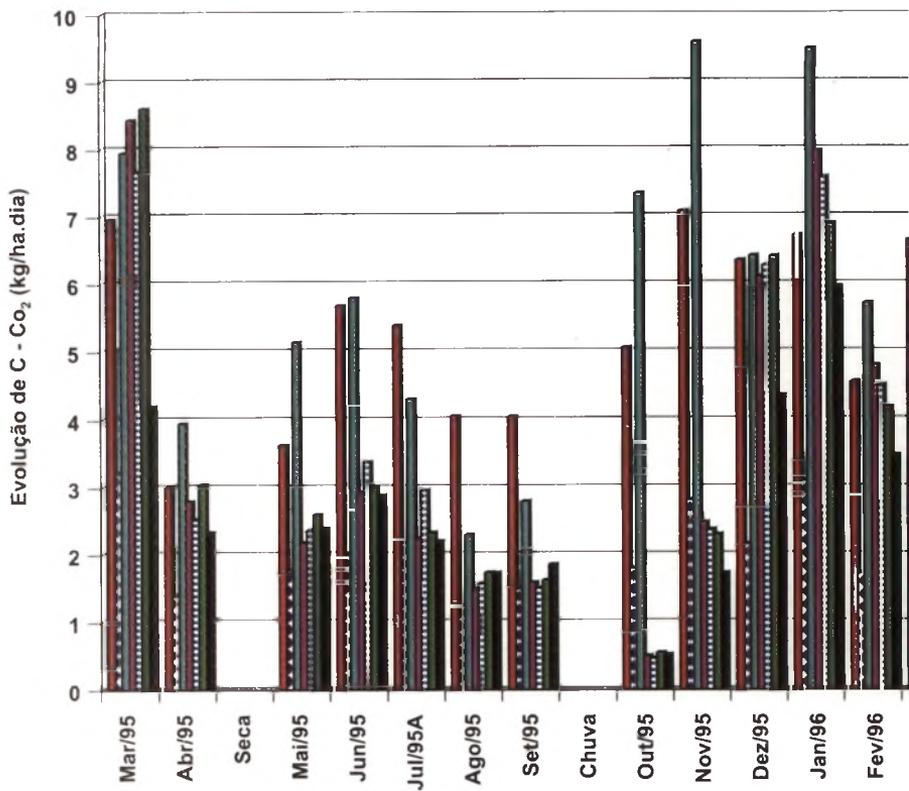
Selecionaram-se oito tratamentos de sistemas de preparo do solo em duas épocas de incorporação de restos culturais: pré-plantio (setembro) e pós-colheita (maio) aplicados durante 16 anos: 1) preparo com arado de discos pré-

plantio (ADPP); 2) preparo com arado de aivecas pré-plantio (AAPP); 3) preparo com arado de discos pós-colheita (ADPC); 4) preparo com arado de aivecas pós-colheita (AAPC); 5) preparo com escarificador em área preparada com arado de discos, para correção química (calagem e adubação corretiva), somente no primeiro ano de cultivo, em 1979 (ESCAD); 6) preparo com escarificador em área preparada com arado de aivecas, para correção química, somente no primeiro ano de cultivo, em 1979 (ESCAA); 7) plantio direto em área preparada com arado de discos, para correção química, somente no primeiro ano de cultivo, em 1979 (PDAD); 8) plantio direto em área preparada com arado de aivecas, para correção química, somente no primeiro ano de cultivo em 1979 (PDAA);

Foram ainda selecionados uma área reflorestada com espécies do gênero *Pinus* (PIN) e uma área de pastagem com *Brachiaria decumbens* (PAST), com 17 anos de existência, além de uma área com vegetação nativa de Cerrado *stricto sensu* (CER) e uma área recém-desmatada de vegetação nativa de Cerrado *stricto sensu* (CERDES). As medições de C-CO<sub>2</sub> foram iniciadas em 17 de março de 1995 e terminadas em 17 de julho de 1996. Da área desmatada foram emitidos 1.375 kg de C-CO<sub>2</sub>/ha, cerca de 63% da área nativa de Cerrado, a qual emitiu 2.183 kg C-CO<sub>2</sub>/ha. Todas as áreas selecionadas encontravam-se em Latossolo Vermelho-Escuro argiloso (48% de argila em média), sendo feitas caracterizações químicas e físicas de cada local amostrado. Dados diários de precipitação, umidade relativa, velocidade do vento, temperaturas máxima, mínima e média do ar e temperaturas do solo nas profundidades de 2, 5, 10, 20 e 40 cm foram obtidos da estação climatológica da Embrapa Cerrados, situada em um raio médio de 700 m das áreas estudadas.

Béquers de 250 ml de capacidade contendo 100 ml de KOH 1 M foram colocados sobre a superfície do solo e cobertos com um balde plástico com capacidade de 0,0139 m<sup>3</sup> (área de 0,063 m<sup>2</sup>) em cada um desses tratamentos (2 repetições por tratamento). Ao lado dos béqueres contendo KOH, foram colocados também béquers de 250 ml com 100 ml de água destilada, para manter o ambiente úmido. O CO<sub>2</sub> produzido e reagido com KOH, por um período exato de 3 dias, era levado ao laboratório para a determinação titulométrica do CO<sub>2</sub> com HCl 0,5N, usando-se fenolftaleína como indicador.

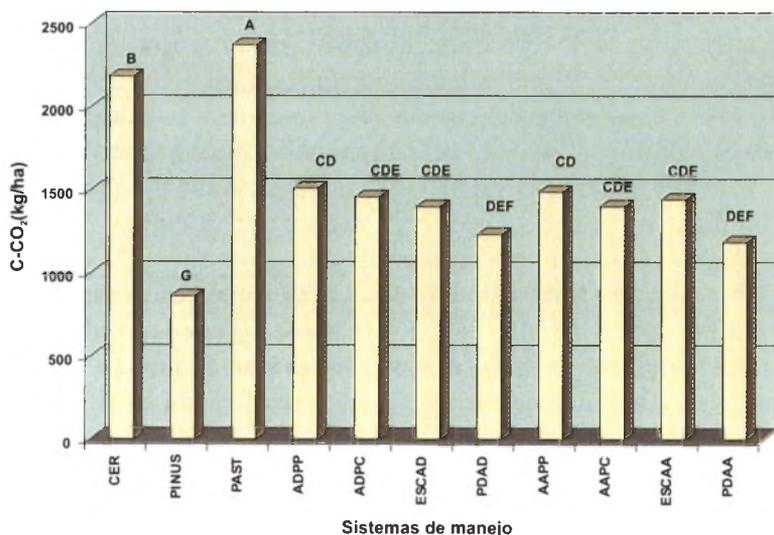
O monitoramento das emissões de CO<sub>2</sub> foi feito nos períodos chuvoso e seco, sendo registrados 55 intervalos, durante um período total de 486 dias (Figura 7).



**Figura 7** - Evolução de C-CO<sub>2</sub> de vários sistemas de manejo nos períodos seco e chuvoso durante o ano de 1995/96.  
**Fonte:** Adaptado de Resck et al. (1996)

Observa-se que há uma queda acentuada na produção de C-CO<sub>2</sub> durante o período da seca na pastagem em contraste com uma queda mais amena no Cerrado. Em todo o período, a ordem decrescente da produção média de C-CO<sub>2</sub> foi a seguinte (em kg ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>): Pastagem: 4,87 ± 2,91 > Cerrado: 4,47 ± 1,97 > Discos: 3,15 ± 2,42 > Aivecas: 3,10 ± 2,49 > Escarificador: 3,05 ± 2,41 > Plantio Direto: 2,45 ± 1,60 > *Pinus*: 1,78 ± 0,86. Monteiro & Miranda (1996) medindo fluxos de CO<sub>2</sub> sobre um Cerrado *stricto sensu*, de julho a novembro de 1994, na Estação de Águas Emendadas-DF, verificaram que o Cerrado funcionou como dreno de CO<sub>2</sub> nos meses de julho e novembro, e como fonte nos meses de agosto, setembro e outubro. Os fluxos líquidos de carbono (fotossíntese menos respiração) foram iguais a 8, -2, -5, -5,5 e 0,5 em kg/ha/dia, nos respectivos meses considerados.

A soma de C-CO<sub>2</sub> produzido para as duas estações (seca e chuva), para cada tratamento, foi calculada por Resck et al. (1996), sendo os totais apresentados na Figura 8. Foi aplicado o teste de Tukey (p<0,05) para a diferenciação das médias.



**Figura 8** - Total de C-CO<sub>2</sub> produzido durante um período de 486 dias. Adaptado de Resck et al. (1996). CER= Cerrado; PINUS= *Pinus*; PAST = Pastagem; ADPP= preparo com arado de discos pré-plantio; ADPC= preparo com arado de discos pós-colheita; ESCAD= preparo com escarificador em área preparada com arado de discos; PDAD= plantio direto em área preparada com arado de discos; AAPP= preparo com arado de aivecas pré-plantio; AAPC= preparo com arado de aivecas pós-colheita; ESCAA= preparo com escarificador em área preparada com arado de aivecas; PDAA= plantio direto em área preparada com arado de aivecas

Durante o período de 486 dias, a pastagem produziu mais CO<sub>2</sub> do que a área de Cerrado. Em seguida vem um grupo intermediário constituído pelas áreas que foram preparadas com arado de discos, aivecas e escarificador e com o sistema de plantio direto e, por último, a área sob *Pinus*.

Seqüência semelhante para os diferentes sistemas foi encontrada por Reicosky (1997), isto é, maior produção de CO<sub>2</sub> pelo arado de aivecas, seguido do escarificador e por fim plantio direto, durante as estações de outono e primavera no Estado de Minnesota, Estados Unidos. Foram encontrados valores de 2.440 kg de C-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> produzidos no outono, em contraste com 950 kg produzidos na primavera para o arado de aivecas e valores de 280 kg e 250 kg de C-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> obtidos para o plantio direto, respectivamente, para um período de apenas 80 horas após cada início de medição nos respectivos tratamentos. As diferenças das características e propriedades desses solos, impedem que se faça comparações, como por exemplo, com os resultados obtidos em Latossolo por Resck et al. (1996), e enfatiza a necessidade de se obter mais registros de dados em nossas condições.

Embora a maior produção de C-CO<sub>2</sub> tenha sido obtida na pastagem, devido à sua capacidade fotossintética com formação de biomassa e a grande capacidade de enraizamento profundo, a pastagem tem alta capacidade de formar agregados maiores que 2 mm, à uma taxa de cerca de 1,1% de agregados para cada centímetro de profundidade no perfil do solo (Guedes et al., 1996; Guedes, 1997). Esses agregados constituem os reservatórios onde está localizada e protegida a maior quantidade de carbono dos sistemas pouco perturbados (sem a ação dos implementos de preparo do solo), como a própria pastagem, uma floresta de eucalipto ou áreas com vegetação de Cerrado.

Após a análise dos parâmetros climáticos, durante os 55 intervalos em que se fez o monitoramento das emissões de CO<sub>2</sub>, foram encontradas em todos os tratamentos baixas correlações (entre 0,30 e 0,52) entre a produção total de CO<sub>2</sub> e as temperaturas máxima, mínima, velocidade do vento e temperaturas do solo a 10, 20 e 40 cm de profundidade. A temperatura máxima sempre se correlacionou negativamente com a evolução de C-CO<sub>2</sub> nos tratamentos CER, ADPP, ADPC, PDAD, AAPP, ESCAA, enquanto a temperatura mínima correlacionou-se positivamente em todos os tratamentos com exceção de *Pinus*. Houve correlação positiva com as temperaturas do solo nas profundidades de 10 cm e 20 cm, somente para o tratamento AAPC. Houve correlações na profundidade de 40 cm para os tratamentos AAPC e ESCAA, que é a profundidade normal de atuação desses implementos. A velocidade do vento correlacionou-se negativamente com 7 tratamentos (PAST, ADPP, ADPC, ESCAD, PDAD, PDAA e CERDES), em torno de -0,38 (p<0,05). Em todos os tratamentos estudados, C-CO<sub>2</sub> correlacionou-se positivamente com a umidade relativa,  $r = 0,68$  (p<0,001) e também com a precipitação,  $r = 0,62$  (p<0,001),

com exceção dos tratamentos PIN e PAST.

Foi feita uma seleção de modelos de regressão dentro de cada tratamento, utilizando o procedimento *stepwise* (Tabela 4) para se determinar a influência de cada fator climático na produção total de C-CO<sub>2</sub>. Observa-se que, em geral, a umidade relativa (média 48% ± 13%; p<0,001) foi o fator que mais influenciou na produção total de C-CO<sub>2</sub>, para todos os tratamentos, durante o período estudado.

**Tabela 4** - Modelos de regressão utilizando o procedimento *stepwise* para a determinação da produção total de C-CO<sub>2</sub> durante o período estudado

Tratamento	Regressão
CER	SC = -3,66 <sup>n.s.</sup> +0,081t <sup>n.s.</sup> (3%)+0,91pp <sup>*</sup> (11%)+1,57ur <sup>***</sup> (45%)
CERDES	SC = -146,78 <sup>n.s.</sup> +0,95pp <sup>**</sup> (6%)+8,44tm <sup>**</sup> (20%)-20,36vv <sup>*</sup> (7%) + 1,27ur <sup>**</sup> (39%)
PIN	SC = -20,29 <sup>n.s.</sup> +0,082t <sup>*</sup> (9%)+0,72ur <sup>*</sup> (12%)
PAST	SC = -490,87 <sup>**</sup> +12,72tx <sup>***</sup> (16%)-37,68vv <sup>**</sup> (7%)+4,95ur <sup>***</sup> (44%)
ADPP	SC = -58,02 <sup>n.s.</sup> +0,19t <sup>**</sup> (12%)+1,12pp <sup>*</sup> (4%)-34,18vv <sup>**</sup> (4%) + 2,52ur <sup>***</sup> (57%)
ADPC	SC = -35,00 <sup>n.s.</sup> +0,17t <sup>**</sup> (12%)+1,29pp <sup>*</sup> (5%)-35,15vv <sup>**</sup> (4%) + 2,21ur <sup>***</sup> (55%)
ESCAD	SC = -143,83 <sup>*</sup> +1,18pp <sup>**</sup> (3%)-22,80vv <sup>*</sup> (4%)+2,73ur <sup>***</sup> (62%) + 11,39ts <sub>5</sub> <sup>*</sup> (12%)-8,00ts <sub>40</sub> <sup>n.s.</sup> (3%)
PDAD	SC = 18,50 <sup>n.s.</sup> +0,14t <sup>***</sup> (16%)+1,23pp <sup>***</sup> (10%)-29,28vv <sup>***</sup> (5%) + 1,19ur <sup>***</sup> (51%)
AAPP	SC = -184,54 <sup>***</sup> +0,18t <sup>*</sup> (8%)+3,62ur <sup>***</sup> (56%)
AAPC	SC = -153,18 <sup>*</sup> +0,15t <sup>**</sup> (19%)+1,51pp <sup>**</sup> (4%)-10,61tm <sup>n.s.</sup> (2%)-25,9vv <sup>*</sup> (5%) + 2,03ur <sup>***</sup> (50%)+14,50ts <sub>10</sub> <sup>*</sup> (6%)
ESCAA	SC = -94,45 <sup>n.s.</sup> +1,68pp <sup>***</sup> (5%)-15,25tm <sup>*</sup> (4%)-18,66vv <sup>n.s.</sup> (1%) + 3,10ur <sup>***</sup> (57%)+40,32ts <sub>10</sub> <sup>***</sup> (14%)-24,98ts <sub>40</sub> <sup>*</sup> (6%)
PDAA	SC = -38,77 <sup>n.s.</sup> +1,07pp <sup>**</sup> (4%)-7,97tm <sup>n.s.</sup> (2%)-20,89 <sup>*</sup> (5%)+1,91ur <sup>**</sup> (49%) + 14,82ts <sub>5</sub> <sup>*</sup> (11%)-7,08ts <sub>40</sub> <sup>n.s.</sup> (5%)

Fonte: Adaptado de Resck et al. (1996)

<sup>1</sup> SC = soma total de C-CO<sub>2</sub>; t = tempo; tx = temperatura máxima; tm = temperatura média; ur = umidade relativa; pp = precipitação; vv = velocidade do vento; ts<sub>5,10</sub> e <sub>40</sub> = temperatura do solo a 5, 10 e 40 cm, respectivamente.

<sup>2</sup> O números entre parênteses significa a contribuição de cada variável para a soma total de C-CO<sub>2</sub> ou o coeficiente de determinação parcial (r<sup>2</sup>).

<sup>3</sup> \*, \*\* e \*\*\* : significativo pelo teste de Tukey (p<0,05, p<0,01 e p<0,001, respectivamente).

A precipitação teve influência pequena (média:  $6\% \pm 3\%$ ;  $p < 0,01$ ) para nove tratamentos, com exceção de PIN, PAST e AAPP, talvez devido ao fato de não ter sido ainda considerado o efeito da precipitação separadamente na época seca e chuvosa. No Cerrado, quando foi feito o desmatamento (CERDES), a temperatura média do ar passou a ter uma importância relativamente alta ( $20\%$ ;  $p < 0,01$ ), na produção de C-CO<sub>2</sub>.

Concluiu-se que no Cerrado (CER E CERDES) e nos agroecossistemas considerados nesse trabalho, devido às suas propriedades intrínsecas, físicas, químicas e microbiológicas, a biomassa microbiana reagiu diferentemente aos estímulos externos, principalmente à umidade relativa e em uma magnitude bem menor à precipitação e à temperatura do ar e do solo.

Sistemas agrícolas pouco perturbados tais como de pastagem, plantação de eucalipto e plantio direto podem acumular mais carbono em 100 cm de um perfil de solo do que uma área com vegetação de Cerrado. Corazza et al. (1998) observaram baixa acumulação de carbono nas parcelas que foram trabalhadas com arado de discos ou com grade pesada (Tabela 5).

**Tabela 5** - Estoque de carbono nas camadas de solo sob diferentes sistemas de manejo

Camada do solo cm	Sistemas de Manejo					
	Plantio Direto	Discos	Grade + Pastagem	Pastagem	Eucalipto	Cerrado
	Mg ha <sup>-1</sup>					
0-20	47.35 (31)*	37.34 (30)	36.51 (29)	42.18 (28)	44.87 (30)	39.77 (30)
20-40	33.79 (22)	29.25 (23)	28.76 (23)	32.59 (22)	33.50 (23)	30.09 (23)
40-100	73.83 (47)	62.23 (47)	60.00 (48)	75.44 (51)	69.81 (51)	63.72 (47)
Total	154.97 a**	128.81 bc	125.28 c	150.22 a	148.18 a	133.59 b

Fonte: Adaptado de Corazza et al. (1998)

\*Valores entre parenteses representam as percentagens de estoque de C em cada camada do solo.

\*\* Mesmas letras não são significativamente diferentes - Tukey ( $p < 0,05$ ).

Como estes sistemas estão sendo trabalhados há pelo menos 12 anos, nas áreas estudadas, pode-se concluir que sistemas agrícolas pouco perturbados podem acumular mais carbono do que é encontrado em um sistema natural de Cerrado (Tabela 6).

Áreas com sistemas que causam mais perturbação do solo como arado de discos e grade pesada funcionam, portanto, como fonte de  $\text{CO}_2$  para a atmosfera. A causa é a destruição da proteção física da matéria orgânica. Entretanto, o arado de discos tem papel importante no processo de correção do pH do solo, aumento da saturação por bases e dos níveis de fósforo e potássio, normalmente baixos nos solos do Cerrado. O arado de discos revolve e mistura o solo, acelerando a reação química e facilitando a distribuição do calcário e do fertilizante dentro do perfil do solo. Esta ação pode atingir de 25 cm a 30 cm de profundidade sob condições favoráveis de umidade e com consistência friável. A grade pesada, por sua vez, atinge somente de 10 cm a 12 cm dentro do perfil, cortando o solo, destruindo os reservatórios de proteção física da matéria orgânica, sem misturá-lo. O arado de aivecas atinge facilmente 40 cm de profundidade no perfil do solo; além disso, a leiva é tombada, sem destruir os agregados, incorporando os restos culturais (carbono orgânico) no perfil e melhorando a estrutura e aumentando as condições de armazenamento de água do solo. Com a melhoria das condições físicas, químicas até uma profundidade de 40 cm no perfil do solo, o escarificador poderá ser o implemento escolhido para se fazer apenas o cultivo mínimo ou o agricultor poderá optar pelo sistema de plantio direto (Resck, 1998).

**Tabela 6** - Estimativas dos efeitos de diferentes sistemas de manejo sobre o balanço total de carbono em relação a uma área natural de Cerrado em um Latossolo Vermelho-Escuro argiloso

Sistemas (Mg ha <sup>-1</sup> )	Estoque de C (Anos)	Tempo	Taxa de Estoque de C (Mg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )
Plantio Direto	+ 21.4	15	+ 1.43
Pastagem	+ 16.6	18	+ 0.92
Eucalipto	+ 14.6	12	+ 1.22
Arado de Discos	- 4.8	15	- 0.32
Grade Pesada + Pastagem	- 8.3	12	- 0.69

Fonte: Adaptado de Corazza et al. (1998)

A pequena diferença em relação à perda de carbono entre a área preparada com arado de disco e a área trabalhada com grade pesada por dez anos foi causada pelo crescimento nesta área, durante dois anos posteriores, de

uma pastagem de braquiária (*Brachiaria decumbens*), a qual recuperou o solo até certo nível de agregação, protegendo assim o carbono orgânico do ataque microbiano e da perda de CO<sub>2</sub> (Santos et al., 1996; Pereira, 1997).

## Considerações Finais

Com a proximidade do século XXI a humanidade depara-se com dois grandes problemas: aumento da população com a conseqüente necessidade de alimentos e a diminuição da disponibilidade de água de boa qualidade. Diariamente, a população da Terra aumenta em 127 mil pessoas e isso significa que a população mundial cresce, aproximadamente, quase um Brasil a cada três anos (170 milhões de habitantes). Com uma taxa de crescimento de 1,89% na década de 90, é possível que o Brasil atinja a população de 266 milhões de habitantes no ano de 2075 (Embrapa, 1994). Em 1980, a região Centro-Oeste, que compreende a grande maioria do Cerrado brasileiro, tinha 68% das pessoas na área urbana e 32% na rural. Em 1990, já existiam 81% das pessoas na área urbana e 19% na rural (Resck, 1996), com fortes indicativos de intensificação desse processo de urbanização. Como conseqüência, aumenta-se a demanda pela água de boa qualidade para o abastecimento da população e por um eficiente sistema de saneamento, como também o aumento da produção de lixo urbano e lodo de esgoto. Com o aumento da frota de veículos e maior queima de combustíveis fósseis, espera-se um incremento significativo de produção e emissão de gases para a atmosfera, principalmente de CO<sub>2</sub>. Na área rural, onde se produz alimentos para essa população urbana crescente, pode-se, dependendo do uso e do manejo dos solos, estar contribuindo mais ou menos para esse processo de emissão de gases.

Entretanto, as imposições climáticas (período seco prolongado e veranico na estação chuvosa) e as de solo (solos ácidos, pobres em nutrientes e com baixa capacidade de armazenamento de água) têm que ser respeitadas ao se optar por determinado sistema de manejo. Entende-se por manejo do solo como todas as operações efetuadas em uma área, como sua abertura (com a aplicação das práticas conservacionistas e obediência ao Código Florestal em vigor - Lei 4.771 de 1995 já modificada por lei, decretos e medidas provisórias e, atualmente, em processo de revisão e aprovação pelo Congresso Nacional), a correção da acidez superficial e da alta saturação de alumínio subsuperficial, a adubação corretiva e de manutenção, os sistemas de preparo do solo e a rotação de

culturas, incluindo-se as práticas culturais, a pastagem e a floresta (Resck, 1996). Esses elementos que compõem o manejo têm que ser harmonicamente aplicados ao solo e são os pilares que sustentam uma agricultura produtiva e estável. Sistemas conservadores de carbono no solo como o plantio direto, a pastagem e áreas florestadas ou reflorestadas devem fazer parte de um programa que busque o aumento da produção de grãos, carne, madeira, fibra e energia e da qualidade ambiental.

Entende-se, no entanto, que a despeito de existirem milhões de hectares potencialmente agricultáveis, é preferível otimizar a produção daqueles já em processo de exploração. Sob este aspecto, a utilização imediata e generalizada desses sistemas de manejo conservadores de carbono, seria, no mínimo, de alto risco, devido à má distribuição de chuvas e os frequentes períodos de veranicos no Cerrado, além da baixa capacidade de armazenamento de água, baixa fertilidade e acidez dos solos. Para isso, outros sistemas de manejo que incluem os arados de discos e de aivecas e escarificadores, utilizados em uma forma dinâmica, têm papel importante no condicionamento físico, químico e biológico do solo, como mitigadores das restrições ambientais do Ecossistema Cerrado e, portanto, não podem ser esquecidos ou relegados a um segundo plano, sob pena de não serem resolvidos os problemas cruciais que enfrentaremos no próximo milênio.

## Referências

ADÂMOLI, J.; MACEDO, J.; AZEVEDO, L. G.; MADEIRA NETTO, 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, 1986. p. 33-74.

AZEVEDO, L.G. de.; CASER, R.L. Regionalização do Cerrado. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 5., 1979, Brasília, DF. *Cerrado: uso e manejo*. Brasília: Editerra, 1980. p. 211-229.

BROSSARD, M.; LOPES ASSAD, M.L.; CHAPUIS, L.; BARCELLOS, A.O. Estoques de carbono em solos sob diferentes fitofisionomias de Cerrados. In: LEITE, L.L.; SATO, C.H. (org.), *Contribuição ao conhecimento ecológico do Cerrado*. Brasília: UnB, 1997. p. 272-277. Trabalhos selecionados do 3º Congresso de Ecologia do Brasil, Brasília, 1996.

CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; VOLKOFF, B.; MORAES, J.L. Dinâmica do carbono nos solos da Amazônia. In: ALVAREZ, V. H.; FONTES, L.E.; FONTES, M. P. F. (ed.), *O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado*. Viçosa: SBCS/UFV, 1996. p. 61-69.

CORAZZA, E.J.; SILVA, J.E. de; RESCK, D.V.S.; GOMES, A.C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de Cerrado. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO DE CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 12., 1998, Fortaleza, CE. *Anais...* Fortaleza: UFC, 1998. p. 352-353.

DALAL, R.C.; MAYER, R.J. Long term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland. II. Total carbon and its rate of loss from the soil profile. *Australian Journal of Soil Research*, v. 24, p. 281-292, 1986.

EMBRAPA. *Atlas do meio ambiente do Brasil*. Brasília: Terra Viva/EMBRAPA-SPI, 1994. 130 p.

GUEDES, H.M.; RESCK, D.V.S.; PEREIRA, I. da S.; SILVA, J.E. da; RODRIGUEZ CASTRO, L.H. Caracterização da distribuição do tamanho de agregados de diferentes sistemas de manejo e seu conteúdo de carbono em latossolo vermelho-escuro na região dos Cerrados, Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 8.; INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TROPICAL SAVANNAS, 1., 1996, Brasília, DF. *Biodiversidade e produção sustentável de alimentos e fibras nos Cerrados: anais / Biodiversity and sustainable production of food and fibers in the tropical savannas: proceedings*. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1996. p. 329-333.

GUEDES, H.M. *Efeito de diferentes sistemas de manejo na distribuição de classes de agregados e nos teores de carbono orgânico em um Latossolo Vermelho-Escuro argiloso na região dos Cerrados*. Brasília: UnB, 1997. 153 p. Dissertação Mestrado.

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CARBON SEQUESTRATION IN SOIL, 2., 1996, Columbus, Ohio. *Recommendations and conclusions*. Columbus: Ohio State University, 1996. 6 p. Editado por R. LAL, J. KIMBLE e R. FOLLETT.

MACEDO, J. *Produção de alimentos: o potencial dos Cerrados*. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1996. 33 p. (EMBRAPA-CPAC. Documentos, 59).

MONTEIRO, J.M.G.; MIRANDA, A.C. Fluxos de CO<sub>2</sub> sobre um Cerrado *stricto sensu*. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 8.; INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TROPICAL SAVANNAS, 1., 1996, Brasília, DF. *Biodiversidade e produção sustentável de alimentos e fibras nos Cerrados: anais / Biodiversity and sustainable production of food and fibers in the tropical savannas: proceedings*. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1996. p. 312-316.

MORAES, J.F.L. *Conteúdos de carbono e nitrogênio e tipologia de horizontes nos solos da Bacia Amazônica*. Piracicaba: USP-CENA, 1991. 85 p. Dissertação Mestrado.

PEREIRA, I. da S. *Efeito de diferentes sistemas de manejo na distribuição de macro e microagregados e nos teores de carbono orgânico em um Latossolo Vermelho-Escuro argiloso na região dos Cerrados*. Brasília: UnB, 1997. 160 p. Dissertação Mestrado.

PERES, J.R.R.; SUHET, A.R.; VARGAS, M.A.T.; DROZDOWICZ, A. Litter production in areas of Brazilian Cerrados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 18, n. 9, p. 1037-1043, 1983.

REICOSKY, D.C. Tillage methods and carbon dioxide loss: fall versus spring tillage. In: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; FOLLET, R.F.; STEWART, B.A. (ed.), *Management of carbon sequestration in soil*. New York: CRC Press, 1997. p. 99-111.

RESCK, D.V.S. *Manejo e conservação do solo em microbacias hidrográficas na região dos Cerrados*. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1992. 17 p. (EMBRAPA-CPAC. Documentos, 40).

RESCK, D.V.S.; SILVA, J.E. da. Efeito de diferentes sistemas de preparo do solo no teor e na meia-vida da matéria orgânica de um Latossolo argiloso na região dos Cerrados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., 1995, Viçosa, MG. *Anais... Viçosa: SBCS, 1995. v. 4, p. 1837-1839*.

RESCK, D.V.S.; GOMES, A.C.; RODRIGUES, D.C.; SANTOS, A.L.; SILVA, J.E. da. Influência do uso e manejo do solo na produção de CO<sub>2</sub> em diferentes agroecossistemas na região dos Cerrados. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13.; REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 11., 1996, Águas de Lindóia, SP. *Anais... Águas de Lindóia: SLACS-SBCS, 1996. CD-ROM*.

RESCK, D.V.S. Manejo de solos e sustentabilidade dos sistemas agrossilvipastoris na região dos Cerrados. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 8.; INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TROPICAL SAVANNAS, 1., 1996, Brasília, DF. *Biodiversidade e produção sustentável de alimentos e fibras nos Cerrados: anais / Biodiversity and sustainable production of food and fibers in the tropical savannas: proceedings*. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1996. p. 81-89.

RESCK, D.V.S.; GOMES, A.C. Effects of soil physical and chemical properties on plant species distribution in the Cerrados region of Brazil. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 16., 1998. Montpellier. *Anais...* Montpellier: ISSS, 1998. CD ROM.

RESCK, D.V.S. Agricultural intensification systems and their impact on soil and water quality in the Cerrados of Brazil. In: LAL, R. (ed.), *Soil quality and agricultural sustainability*. Michigan: Ann Arbor Press, 1998. p. 288-300.

RESCK, D.V.S.; VASCONCELLOS, C.A.; VILELA, L.; MACEDO, M.C.M. Impact of conversion of Brazilian Cerrados to cropland and pastureland on soil carbon pool and dynamics. In: LAL, R.; KIMBLE, J. M.; STEWART, B. A. (ed.), *Global climate change and tropical ecosystems*. Boca Raton, CRC/Lewis Publishers, 2000. p. 169-196.

SANTOS, M.N. dos; RESCK, D.V.S.; SILVA, J.E. da; RODRIGUEZ CASTRO, L.H. Influência de diferentes sistemas de manejo no teor de matéria orgânica e no tamanho e distribuição de poros em latossolo vermelho-escuro argiloso na região dos Cerrados, Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 8.; INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TROPICAL SAVANNAS, 1., 1996, Brasília, DF. *Biodiversidade e produção sustentável de alimentos e fibras nos Cerrados: anais / Biodiversity and sustainable production of food and fibers in the tropical savannas: proceedings*. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1996. p. 372-374.

SILVA, J.E.; LEMAINSKI, J.; RESCK, D.V.S. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de Cerrados do Oeste Baiano. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 18, n. 3, p. 541-547, 1994.

SILVA, J.E.; RESCK, D.V.S.; CORAZZA, E.J.; VILELA, L.; BARCELLOS, A.O. Carbon storage under cultivated pastures in a clayey Oxisol in the Cerrados Region. In: ASA ANNUAL MEETING, 89., 1997, Anaheim. *Building strength through diversity: abstracts*. Anaheim, CA, 1997. p. 303.

SPAIN, J. M.; AYARZA, M.A.; VILELA, L. Crop pasture rotation in the Brazilian Cerrados. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 8.; INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TROPICAL SAVANNAS, 1., 1996, Brasília, DF. Biodiversidade e produção sustentável de alimentos e fibras nos Cerrados: *anais* / Biodiversity and sustainable production of food and fibers in the tropical savannas: proceedings. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1996. p. 39-45.

WALKLEY, A.; BLACK, I.A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic titration method. *Soil Science*, v. 37, p. 29-38, 1934.



## O Efeito da Sucessão Floresta/Pastagem Sobre o Estoque de Carbono e o Fluxo de Gases em Solos da Amazônia

BRIGITTE J. FEIGL, MARTIAL BERNOUX, CARLOS C. CERRI,

MARISA C. PICCOLO

*Centro Nacional de Energia Nuclear na Agricultura - Cena/USP,  
Piracicaba, SP, Brasil*

**Resumo.** O efeito do desmatamento para introdução de pastagens sobre o estoque de carbono no solo e o fluxo de gases foi avaliado em um Podzólico Vermelho-Amarelo da região central de Rondônia. Observou-se um acúmulo crescente de C no solo sob pastagem, que chegou a 2 kg C.m<sup>2</sup> após 80 anos. Essa mitigação foi considerável (10-20%) em relação aos 14,2 kg C.m<sup>2</sup> inicialmente imobilizados na biomassa da floresta. Por outro lado, a emissão anual média de CO<sub>2</sub> aumentou de 1.350 para 1.750 g C-CO<sub>2</sub>.m<sup>2</sup> da floresta para as pastagens, e o CH<sub>4</sub>, que era oxidado à taxa anual de 470 mg C-CH<sub>4</sub>.m<sup>2</sup> pela floresta, passou a ser produzido pelas pastagens. A emissão de N<sub>2</sub>O foi em média 30% menor nas pastagens com mais de 4 anos do que na floresta (240 mg N-N<sub>2</sub>O.m<sup>2</sup>.ano<sup>-1</sup>). Os resultados indicam que é imprescindível melhorar o manejo das pastagens já implantadas para mitigar a emissão dos gases do efeito estufa.

### Effect of Forest/Pasture Succession on Carbon Stocks and Gas Fluxes in Amazonian Soils

**Abstract.** The effect of the conversion of tropical forest to pasture on soil carbon stocks and trace gas fluxes was analysed on a Ultisol (Podzolic Vermelho-Amarelo) in the central region of the State of Rondônia, Brazil. The soil under pasture showed a C increase of up to 2 kg C.m<sup>2</sup> after 80 years. This C accumulation represented a mitigation of 10-20% in relation to the 14.2 kg C.m<sup>2</sup> initially immobilised in the forest biomass. The mean annual CO<sub>2</sub> emission increased from 1,350 to 1,750 g C-CO<sub>2</sub>.m<sup>2</sup> after the replacement of the forest with pasture, and the CH<sub>4</sub>, previously oxidised at a rate of 470 mg C-CH<sub>4</sub>.m<sup>2</sup> by the forest

*soil, was thereafter produced by the pastures. Pastures older than 4 years emitted 30% less  $N_2O$  than the forest ( $240 \text{ mg N-N}_2\text{O.m}^{-2}.\text{year}^{-1}$ ). Results suggest that the management of existing pastures must be optimised in order to mitigate trace gas emission.*

## Introdução

Mudanças no uso da terra alteram profundamente os processos biogeoquímicos do solo, com reflexos no estoque de carbono e no fluxo de gases entre o solo e a atmosfera. Em escala global, o solo representa o maior reservatório de carbono dos ecossistemas terrestres, contendo entre 1.300 e 1.500 Gt (Gigatoneladas), o dobro do fixado na biomassa vegetal (Post et al., 1982; Schlesinger, 1986). O interesse pelo dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) advém do fato deles serem produtos de processos biológicos naturais e atuarem na intensificação do chamado “efeito estufa”.

A Bacia Amazônica tem sido vítima de um processo rápido e amplo de desmatamento, estimado em  $2,1 \times 10^6$  ha por ano no período de 1978 a 1989 (Fearnside, 1993). Uma documentação detalhada dos dados oficiais sobre o desmatamento da região pode ser encontrada em uma série de publicações (Tardin et al., 1980; Fearnside et al., 1990; Tardin & Pereira da Cunha, 1990; INPE, 1992; Skole & Tucker, 1993).

A implantação da pastagem é citada como o destino predominante (aproximadamente 70%) das áreas desmatadas (Serrão, 1992; Fearnside, 1993; Skole et al., 1994). Apesar disso, existe ainda pouca informação sobre como o estoque de matéria orgânica e o ciclo dos nutrientes são alterados após a introdução de gramíneas em solos antes cobertos por floresta tropical úmida. Alguns autores relatam um decréscimo do estoque de C no solo sob pastagens em relação à floresta original (Detwiler, 1986; Reiners et al., 1994; Veldkamp, 1994), enquanto outros demonstram que as entradas de C promovidas pelo sistema radicular das gramíneas aumentam o estoque de C no solo à longo prazo (Lugo et al., 1986; Choné et al., 1991; Fisher et al., 1994; Moraes et al., 1996).

Relatos sobre o efeito do desmatamento na emissão dos gases  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  são escassos. Keller et al. (1983) foram os primeiros a observar que os solos sob floresta Amazônica podiam oxidar o metano do meio ambiente. Diversos outros estudos (Keller et al., 1990; Steudler et al., 1991; Delmas et al., 1992) confirmaram essa afirmação, tendo-se estimado em 1-2  $\text{mg CH}_4.\text{m}^{-2}$  a média diária desse processo. Goreau & Mello (1988) observaram que a

introdução de pastagens reduziu esse sorvedouro de metano, tornando o solo uma eventual fonte desse gás para a atmosfera, provavelmente devido à compactação do solo. Keller & Reiniers (1994) também observaram que as variações sazonais na capacidade de difusão de gases no solo podem ser a causa da predominância alternada entre microrganismos consumidores e produtores de metano no solo sob pastagens. A emissão de óxido nitroso pelo solo após o desmatamento é aumentada a curto prazo devido à aceleração da ciclagem do nitrogênio (Matson & Vitousek, 1990). Luizão et al. (1989) relataram emissões de  $N_2O$  até três vezes maiores que as da floresta original de Manaus por pastagens de quatro anos. Aumentos temporários ainda maiores (de até oito vezes) foram observados por Keller et al. (1993) em pastagens com idades variando entre 2 e 10 anos, na Costa Rica. Após esse período, a tendência, no entanto, é de ocorrer um declínio para níveis até inferiores ao do fluxo da floresta, devido, provavelmente, à exaustão do estoque de N mineralizável dessas áreas.

### **Estudo de um Caso de Sucessão Floresta/Pastagem em Rondônia**

Apresentamos a seguir um resumo dos resultados obtidos no estudo das alterações biogeoquímicas decorrentes do desmatamento para implantação de pastagens conduzido na Fazenda Nova Vida, situada na região central do Estado de Rondônia (10°30'S, 62°30'O). Nela estão localizadas duas das mais longas e bem documentadas cronosseqüências da Bacia Amazônica, com floresta nativa e pastagens entre 3 e 80 anos de idade (Tabela 1). Ambas apresentam topografia e histórico de implantação (derrubada e queima da vegetação natural, sem uso de maquinário pesado, adição de fertilizantes ou pesticidas) similares. Outra característica que torna esse local particularmente útil para a avaliação dos efeitos causados pelo uso contínuo da terra como pastagem é o fato delas não terem sido precedidas por culturas anuais, prática bastante comum que pode interferir nas avaliações.

O solo das cronosseqüências, cujas principais características estão apresentadas na Tabela 1, foi classificado como Podzólico Vermelho-Amarelo (Moraes et al., 1996). Em escala regional, esse tipo de solo cobre em torno de 22% da área total da Bacia Amazônica brasileira (Moraes et al., 1995) e, em escala global, mais de 700 milhões de ha da região tropical. O clima no Estado de Rondônia é tropical úmido, com média anual de chuvas de 2.200 mm e uma estação mais seca entre junho e setembro. A floresta nativa foi submetida a uma extração seletiva de madeira (3-4 árvores por ha) e todas as pastagens tiveram manejo semelhante, suportando o pastoreio de 1½ animal por hectare.

**Tabela 1** - Uso da terra e principais características dos 10 cm superficiais do solo  
Nova Vida

Uso da terra	Gramínea	Argila	pH
		%	H <sub>2</sub> O
<b>Cronossequência 1</b>			
Floresta		22	4.78
Pastagem 3 anos	<i>Brachiaria brizantha</i>	24	6.60
Pastagem 5 anos	<i>B. brizantha</i>	29	7.18
Pastagem 9 anos	<i>Panicum maximum</i>	25	6.05
Pastagem 13 anos	<i>P. maximum</i>	22	6.06
Pastagem 20 anos	<i>B. brizantha</i>	23	5.67
Pastagem 41 anos	<i>P. maximum</i>	25	5.74
Pastagem 81 anos	<i>B. brizantha</i>	15	5.86
<b>Cronossequência 2</b>			
Floresta		11	4.92
Pastagem 3 anos	<i>B. brizantha</i>	23	5.12
Pastagem 5 anos	<i>B. brizantha</i>	13	6.51
Pastagem 20 anos	<i>P. maximum</i>	19	6.10

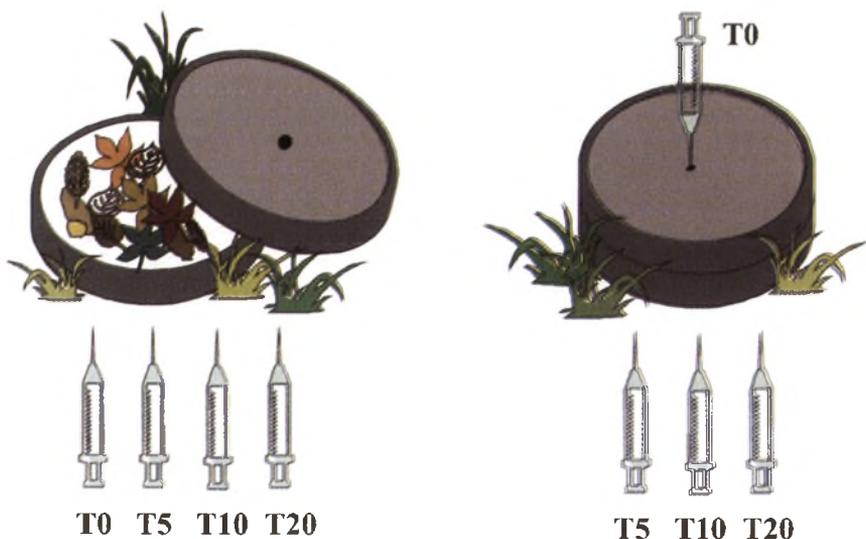
Fonte: Adaptado de Neill et al. (1998)

\* Desvio padrão da média entre parênteses.

\*\* Significativamente diferente da floresta de referência (Teste de Bonferroni,  $p < 0,05$ ).

Amostras de solo foram coletadas em cinco mini-trincheiras de até 50cm abertas em cada local. A densidade foi aferida no campo com anéis volumétricos. Após a preparação tradicional foram feitas análises de textura, pH e CTC, entre outras, pelos métodos descritos por Anderson & Ingram (1989). O carbono total foi analisado por combustão em equipamento LECO CR-412.

Os fluxos de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  foram medidos *in situ* tomando-se amostras dos gases do interior de câmaras de incubação constituídas de duas peças: uma base fixa ao solo para assegurar que as repetições periódicas fossem feitas sempre nos mesmos locais, e uma tampa móvel, de volume conhecido. Durante a incubação de 20 minutos, a tampa foi ajustada à base e o ar do seu interior da câmara foi coletado com seringas de nylon (20 ml) nos tempos 0, 5, 10 e 20 min (Figura 1). Foram usadas três câmaras em cada local. Amostragens foram feitas três vezes por dia, coincidindo com as temperaturas ambiente mínima, máxima e média (7:00, 12:00 e 17:00 horas), registrando-se também a temperatura a 2,5 cm de profundidade e a umidade do solo.



**Figura 1** - Câmaras de incubação, constituídas de base e tampa, para coleta de amostras dos gases evoluídos do solo. A série de seringas é levada ao laboratório para a análise da concentração dos gases  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$

As concentrações de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$  foram medidas por cromatografia gasosa (Shimadzu-GC 14A), sendo os dois primeiros em detector ECD (Electron Capture Detector), enquanto que o último em detector FID (Flame Ionization Detector). As amostragens foram feitas a cada dois meses, entre junho de 1992 e dezembro de 1993.

### *Alterações no Estoque de Carbono do Solo*

As alterações na concentração de carbono manifestaram-se com maior intensidade na camada 0-10 cm, porém os estoques foram calculados para a profundidade 0-50 cm, corrigidos com base em uma mesma massa de solo para todos os locais. De um modo geral, o estoque de C do solo mostrou uma tendência de aumento após a introdução das pastagens. Todos os locais amostrados apresentaram estoques maiores que os da floresta (Tabela 2), com ganhos variando entre 0,28 e 2,27 kg C.m<sup>-2</sup>. O acúmulo foi mais intenso nas pastagens jovens, entre 3 e 5 anos, decrescendo com o passar do tempo (Neill et al., 1998).

Verificamos que o aumento do estoque de C nas pastagens da Fazenda Nova Vida foi de aproximadamente 2 kg C.m<sup>-2</sup> em 80 anos. Esse valor representa uma mitigação de 10 a 20% do total de C lançado na atmosfera ( $\text{CO}_2 + \text{CH}_4$ ) durante a queima e o subsequente processo de mineralização do material remanescente, tomando-se por base um estoque inicial de 14,2 kg C.m<sup>-2</sup> na biomassa vegetal da floresta (Graça et al., 1999).

### *Alterações na Taxa de Emissão de $\text{CO}_2$*

A variação sazonal dos fluxos de  $\text{CO}_2$  constitui um dado importante para os modelos que pretendem prever alterações globais na concentração desse gás na atmosfera terrestre. Em geral, a temperatura e a umidade do solo são considerados os fatores determinantes da variabilidade da taxa respiratória. Nos ecossistemas tropicais a presença de água tem papel preponderante (Rajvanshi & Gupta, 1986), já que a variação na temperatura é pequena ao longo do ano.

**Tabela 2** - Estoques de carbono total nos 50 cm superficiais do solo, determinados na Fazenda Nova Vida. A taxa de acúmulo de C foi calculada pela diferença entre os estoques de carbono dividida pelo número de anos com pastagem

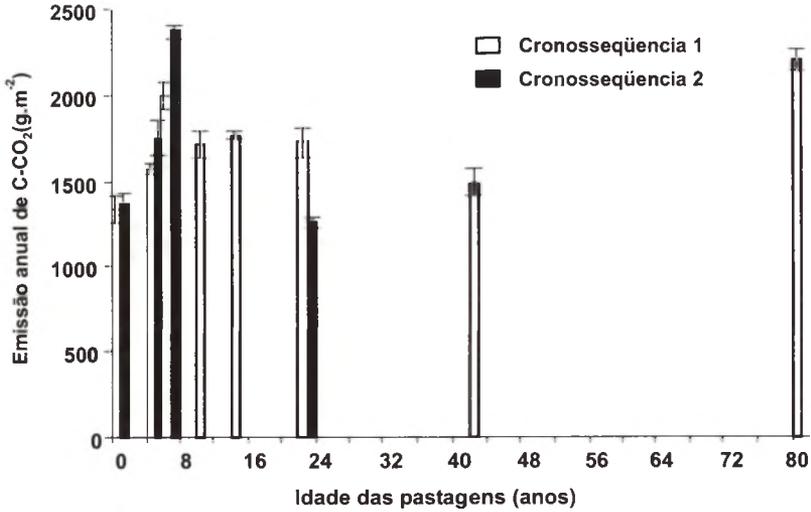
Uso da terra	Estoque de C	Ganho total de C	Taxa média de acúmulo de C
	kg.m <sup>-2</sup>		kg.m <sup>-2</sup> .ano <sup>-1</sup>
<b>Cronossequência 1</b>			
Floresta	4,33 (0,72)*		
Pastagem 3 anos	4,61 (0,66)	0,28	0,093
Pastagem 5 anos	5,85 (2,09)	1,52	0,304
Pastagem 9 anos	5,26 (0,85)	1,21	0,134
Pastagem 13 anos	4,64 (1,58)	1,07	0,082
Pastagem 20 anos	5,28 (0,64)	1,22	0,061
Pastagem 41 anos	6,56 (0,73)**	2,27	0,055
Pastagem 81 anos	6,12 (0,88)**	1,79	0,022
<b>Cronossequência 2</b>			
Floresta	3,69 (0,72)		
Pastagem 3 anos	5,44 (0,80)**	1,75	0,583
Pastagem 5 anos	4,75 (1,67)	1,06	0,212
Pastagem 20 anos	4,82 (2,37)	1,13	0,056

\* Desvio padrão da média entre parênteses.

\*\* Significativamente diferente da floresta de referência (Teste de Bonferroni,  $p < 0,05$ ).

Fonte: Adaptado de Neill et al. (1998)

Nas áreas com floresta das cronossequências 1 e 2 da Fazenda Nova Vida, a respiração do solo variou entre 89 e 112 mg C-CO<sub>2</sub>.m<sup>-2</sup>.hora<sup>-1</sup> durante a estação seca, quando a umidade do solo se manteve relativamente constante em 16% de umidade volumétrica (u.v.) e a temperatura do solo, a 2,5 cm de profundidade, entre 19 °C e 24 °C. Na estação das chuvas, a u.v. aumentou para 40%, a temperatura variou entre 23 °C e 28 °C, e a taxa de emissão de CO<sub>2</sub> aumentou para 186-230 mg C-CO<sub>2</sub>.m<sup>-2</sup>.hora<sup>-1</sup>. A integração das taxas respiratórias médias diárias dos solos sob floresta resultou em um total anual de 1.347 g C.m<sup>-2</sup> (Figura 2) liberado para a atmosfera (Feigl et al., 1995; Paul Stuedler, comunicação pessoal).



**Figura 2** - Médias anuais de emissão de  $\text{CO}_2$  para as áreas com floresta (ano 0) e pastagens de diferentes idades das cronossequências 1 (coluna vazia) e 2 (coluna preenchida)

A emissão de  $\text{CO}_2$  pelas pastagens foi similar ao da floresta durante a estação seca, embora as condições de temperatura ( $17\text{-}33\text{ }^\circ\text{C}$ ) e umidade ( $7\text{-}10\%$  u.v.) do solo tenham variado mais. Na estação de chuvas, no entanto, observou-se um aumento significativo da emissão, com variações entre  $120$  e  $340\text{ mg C-CO}_2\text{.m}^{-2}\text{.hora}^{-1}$ , correlacionado positivamente ao aumento da umidade do solo, que variou entre  $48\%$  e  $73\%$  u.v., sempre superior ao do solo sob floresta. A emissão média anual variou entre  $1.300$  e  $2.365\text{ g C.m}^{-2}$ , verificando-se um aumento com a idade da pastagem pelos primeiros seis anos, após o que houve uma estabilização em torno de  $1.750\text{ g C.m}^{-2}$  (Figura 2). Segundo Steudler (comunicação oral), não houve correlação entre a respiração do solo e o ciclo anual de temperatura, porém a u.v. mostrou uma relação linear positiva com a respiração ( $r^2$  entre  $0,44$  e  $0,79$ ) em ambos os sistemas (pastagem e floresta). A disponibilidade de água, que acelera tanto a ação decompositora dos microorganismos como a taxa respiratória do sistema radicular das plantas, parece ter sido o fator determinante do aumento de emissão de  $\text{CO}_2$  durante o período de chuvas. Variações na quantidade e na distribuição das chuvas nos trópicos poderão ter importantes conseqüências para o ciclo do carbono nesses sistemas.

Conclui-se que, além da entrada principal de  $\text{CO}_2$  na atmosfera por ocasião da queima da floresta derrubada, que é da ordem de  $4.850 \text{ g C-CO}_2.\text{m}^{-2}$  (Graça et al., 1999), a mudança do uso da terra aumenta a entrada desse gás na atmosfera em  $400 \text{ g C-CO}_2.\text{m}^{-2}$  ao ano, correspondente à diferença entre a emissão média da floresta e das pastagens. A mitigação dessa fonte de  $\text{CO}_2$  somente poderá ser obtida pela intensificação do uso das áreas que já sofreram o processo, através de um manejo que eleve a produtividade das pastagens, evitando que novas áreas sejam desmatadas.

### Alterações na Taxa de Emissão de $\text{CH}_4$

Nas cronossequências 1 e 2 da Fazenda Nova Vida, foi medido um consumo anual de metano de, respectivamente,  $340$  e  $590 \text{ mg C-CH}_4.\text{m}^{-2}$  nas áreas com floresta. Avaliações similares feitas em florestas tropicais, mostraram que o solo desse ecossistema tem a capacidade de oxidar  $\text{CH}_4$  (fixar carbono) a taxas que variam entre  $150$  e  $530 \text{ mg C-CH}_4.\text{m}^{-2}$  (Keller et al., 1990; Steudler et al., 1991; Tathy et al., 1992; Keller & Reiners, 1994).

As áreas com pastagem, por sua vez, emitiram entre  $37$  e  $1.170 \text{ mg C-CH}_4.\text{m}^{-2}$  para a atmosfera, a uma média de  $270 \text{ mg C-CH}_4.\text{m}^{-2}$  (Figura 3). Valores comparativos, para pastagens com tempo similar de implantação, densidade de cobertura vegetal e tipo de manejo, não existem na literatura.

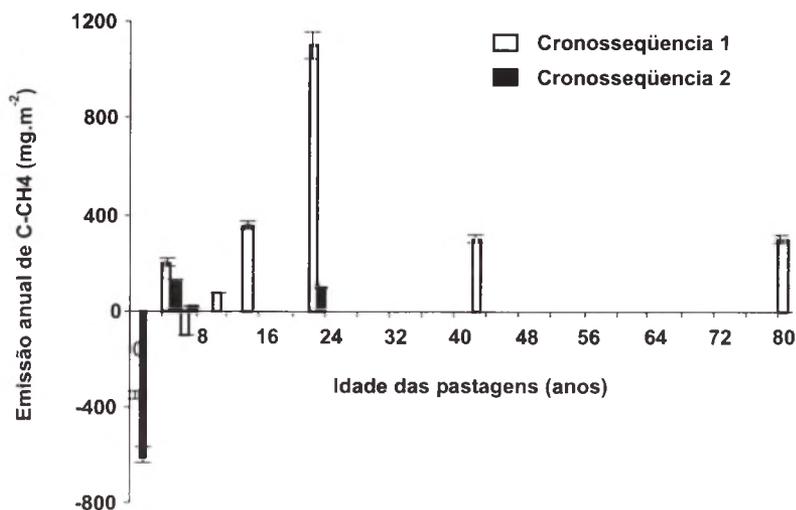


Figura 3 - Médias anuais de emissão de  $\text{CH}_4$  para as áreas com floresta (ano 0) e pastagens de diferentes idades das cronossequências 1 (coluna vazia) e 2 (coluna preenchida)

Os fatores que determinam a mudança de comportamento desse solo de sorvedouro para emissor de C (que em parte também determinam a grande variabilidade entre as taxas de emissão por pastagens de idades diferentes) são diversas. O mais importante deles é a presença de água. Steudler et al. (1996) verificaram que quando a umidade volumétrica está acima de 35-40%, os solos da Fazenda Nova Vida passam a emitir  $\text{CH}_4$ , enquanto que abaixo dessa faixa predomina o processo da oxidação. Sob floresta, não foram registrados valores maiores do que 40% de u.v., o que pode justificar o fato de não haverem sido detectadas emissões de metano nessas áreas.

A falta de aeração do solo favorece as bactérias metanogênicas, de maneira que a emissão de  $\text{CH}_4$  passa a predominar nas pastagens, onde há compactação do solo, com redução da porosidade e limitação à difusão do oxigênio. O pH mais elevado, a maior disponibilidade de aceptores de elétrons como o  $\text{N-NO}_3^-$ , além da maior disponibilidade e qualidade de matéria orgânica também contribuem com a produção de  $\text{CH}_4$  pelos solos sob pastagem.

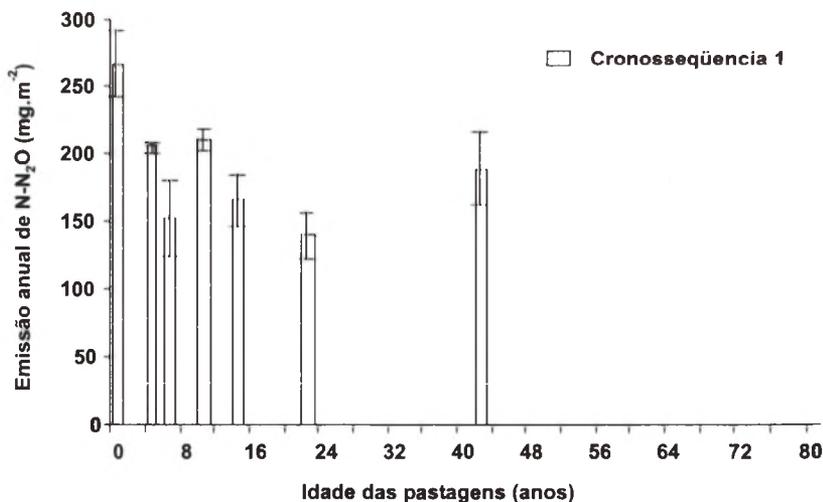
O processo de conversão da floresta em pastagem na Fazenda Nova Vida resultou em uma taxa líquida de emissão de metano pelo solo de 740 mg  $\text{C-CH}_4\cdot\text{m}^{-2}$  ao ano (Steudler et al., 1996), considerando-se a quantidade que deixou de ser consumida pela floresta mais a que passou a ser emitida pelas pastagens. Comparada às outras fontes relacionadas com o desmatamento, como a queima de biomassa vegetal, a introdução de gado e o crescimento da população de cupins, estima-se que esse valor represente somente 5% do total do aumento da taxa de emissão de  $\text{CH}_4$  acarretado pela mudança no uso da terra.

### *Alterações na Taxa de Emissão de $\text{N}_2\text{O}$*

Medidas feitas na bacia Amazônica brasileira e em outras regiões tropicais indicam que os solos das florestas representam uma fonte global importante de  $\text{N}_2\text{O}$ , mas os efeitos da interferência humana no sistema ainda não foram bem documentados. Luizão et al. (1989) e Keller et al. (1993) afirmam ter observado um aumento na taxa de emissão de  $\text{N}_2\text{O}$ , que variou entre 3 e 8 vezes após o desmatamento e a introdução de pastagens. Esse aumento, no entanto, foi temporário, uma vez que pastagens mais antigas apresentaram valores menores que os da floresta original.

Na Fazenda Nova Vida, a média anual de emissão de  $\text{N}_2\text{O}$  pelos solos sob floresta variou entre 190 e 280 mg  $\text{N-N}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}$  no período amostrado. Na cronosequência 1 foi analisada também uma área recém-desmatada, onde a

pastagem ainda se encontrava em fase de implantação (menos de 2 anos). Verificou-se neste local um aumento do fluxo de  $N_2O$  de 1,6 a 2,3 vezes em relação à floresta, chegando a  $440 \text{ mg N-NO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$  (Melillo et al., comunicação pessoal). Já as pastagens com mais de 4 anos emitiram em média 30% menos  $N_2O$  do que a floresta, mitigando o efeito pós-desmatamento (Figura 4). A emissão líquida de  $N_2O$  do processo de transformação da floresta em pastagem foi efetivamente nula quando as pastagens atingiram 9 anos de idade.



**Figura 4** - Médias anuais de emissão de  $N_2O$  para as áreas com floresta (ano 0) e pastagens de diferentes idades da cronossequência 1

O fluxo de óxido nítrico entre o solo e a atmosfera geralmente está relacionado com a ciclagem do nitrogênio, ou mais precisamente, com os processos da nitrificação e denitrificação (Parton et al., 1996). Durante o período de implantação da nova pastagem na cronossequência 1, o aumento da taxa de emissão de  $N_2O$  foi coincidente com maiores concentrações de  $N-NO_3^-$  no solo em comparação com a floresta. Nas pastagens com mais de quatro anos a diminuição na taxa de emissão de  $N_2O$  foi acompanhada por uma redução na concentração de  $N-NO_3^-$ .

Os resultados apresentados indicam que o desmatamento para a introdução de pastagens na Amazônia pode não resultar em um aumento de  $N_2O$  na atmosfera, desde que as pastagens sejam mantidas por mais de uma década. Entretanto, essa evolução da ciclagem do nitrogênio precisa ser confirmada em outras regiões da Amazônia, com outros solos e regimes climáticos.

## Conclusão

O recente conceito de atribuir um valor ao carbono imobilizado, quer seja na forma de biomassa vegetal, quer seja na forma de aumento do estoque no solo agrícola, vem de encontro à necessidade de valorização das áreas já desmatadas. O manejo adequado das pastagens produtivas e a reabilitação das degradadas e/ou de baixa produtividade, contribuem para a mitigação da emissão de gases do efeito estufa na medida que evitam que novas áreas com floresta primária sejam derrubadas. Fearnside & Barbosa (1998) calcularam que cerca de 40% das pastagens deveriam ser bem manejadas para que, em escala regional da Amazônia, os solos sob pastagem se tornassem um sumidouro líquido de carbono.

## Referências

- ANDERSON, J. M.; INGRAM, J. S. I. (ed.), *Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods*. Oxon: Wallingford, 1989. 171 p.
- CHONÉ, T.; ANDREUX, F.; CORREA, J. C.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C. Changes in organic matter in an oxisol from the central Amazonian forest during eight years under pasture, determined by <sup>13</sup>C composition. p. 307-405. In: BERTHELIN, J. (ed.), *Diversity of environmental biogeochemistry*. New York: Elsevier, 1991. 537 p.
- DELMAS, R. A.; SERVANT, J.; TATHY, J. P.; CROS, B.; LABAT, M. Sources and sinks of methane and carbon dioxide exchanges in mountain forest in equatorial Africa. *Journal of Geophysical Research*, v. 97, p. 6169-6179, 1992.
- DETWILER, R. P. Land use change and the global carbon cycle: the role of tropical soils. *Biogeochemistry*, v. 2, p. 67-93, 1986.
- FEARNSIDE, P. M.; TARDIN, A. T.; MEIRA, L. G. M. *Deforestation rate in Brazilian Amazonia*. Brasília: National Secretariat of Science and Technology, 1990.
- FEARNSIDE, P. M. Deforestation in Brazilian Amazonia: the effect of population and land tenure. *Ambio*, v. 22, p. 537-545, 1993.

FEARNSIDE, P. M.; BARBOSA, R. I. Soil carbon changes from conversio of forest to pasture in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management*, v. 108, p. 147-166, 1998.

FEIGL, B. J.; STEUDLER, P. A.; CERRI, C. C. Effects of pasture introduction on soil CO<sub>2</sub> emissions during the dry season in the state of Rondônia, Brazil. *Biogeochemistry*, v. 31, p. 1-14, 1995.

FISHER, M. J.; RAO, I. M.; AYARZA, M. A.; LASCANO, C. E.; SANZ, J. I.; THOMAS, R. J.; VERA, R. R. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature*, v. 371, p. 236-238, 1994.

GOREAU, T. J.; MELLO, W. Z. Tropical deforestation: some effects on atmospheric chemistry. *Ambio*, v. 17, p. 275-281, 1988.

GRAÇA, P.M.L.A.; FEARNSIDE, P.M.; CERRI, C.C. Burning of Amazonian forest in Ariquemes, Rondônia, Brazil: biomass, charcoal formation and burning efficiency. *Forest Ecology and Management*. No prelo.

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). *Deforestation in Brazilian Amazonia*. São José dos Campos: INPE, 1992.

KELLER, M.; GOREAU, T. J.; WOFSY, S. C.; KAPLAN, W. A.; McELROY, M. B. Production of nitrous oxide and consumption of methane by forest soil. *Geophysical Research Letters*, v. 10, p. 1156-1159, 1983.

KELLER, M.; MITRE, M. E.; STALLARD, R. F. Consumption of atmospheric methane in soils of Central panama: Effects of agricultural development. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 4, p. 21-27, 1990.

KELLER, M.; VELDKAMP, E.; WEITZ, A. M.; REINERS, W. A. Effect of pasture age on soil trace-gas emissions from a deforested area of Costa Rica. *Nature*, v. 365, p. 244-246, 1993.

KELLER, M.; REINERS, W. A. Soil-atmosphere exchange of nitrous oxide, nitric oxide, and methane under secondary succession of pasture to forest in the Atlantic lowlands of Costa Rica. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 8, p. 399-409, 1994.

LUGO, A. E.; SANCHEZ, M. J.; BROWN, S. Land use and organic carbon content of some subtropical soils. *Plant and Soil*, v. 96, p. 185-196, 1986.

- LUIZÃO, F.; MATSON, P.; LIVINGSTON, G.; LUIZÃO, R.; VITOUSEK, P. Nitrous oxide flux following tropical land clearing. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 3, p. 281-285, 1989.
- MATSON, P. A.; VITOUSEK, P. M. Ecosystem approach to a global nitrous oxide budget. *BioScience*, v. 40, p. 667-672, 1990.
- MORAES, J. F. L.; CERRI, C. C.; MELILLO, J. M.; KICKLIGHTER, D.; NEILL, C.; SKOLE, D. L.; STEUDLER, P. A. Soil carbon stocks of the Brazilian Amazon basin. *Soil Science Society of America Journal*, v. 59, p. 244-247, 1995.
- MORAES, J. F. L.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. *Geoderma*, v. 70, p. 63-81, 1996.
- NEILL, C.; CERRI, C. C.; MELILLO, J. M.; FEIGL, B. J.; STEUDLER, P. A.; MORAES, J. F. L.; PICCOLO, M. C. Stocks and dynamics of soil carbon following deforestation for pasture in Rondônia. In: LAL, R.; KIMBLE, J. M.; FOLLETT, R. F.; STEWART, E. B. A. (ed.), *Soil processes and the carbon cycle*. Boca Raton: CRC Press, 1998, p. 9-28.
- PARTON, W. J.; MOSIER, A. R.; OJIMA, D. S.; VALENTINE, D. W.; SCHIMEL, D. S.; WEIER, K.; KULMALA, A. E. Generalized model for N<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O production from nitrification and denitrification. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 10, p. 401-412, 1996.
- POST, W. M.; EMANUEL, W. R.; ZINKE, P. J.; STANGENBERGER, A. G. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, v. 298, p. 156-159, 1982.
- RAJVANSHI, R.; GUPTA, S. R. Soil respiration and carbon balance in a tropical Dalbergia sissoo forest ecosystem. *Flora*, v. 178, p. 251-260, 1986.
- REINERS, W. A.; BOUWMAN, A. F.; PARSONS, W. F. J.; KELLER, M. Tropical rain forest conversion to pasture: changes in vegetation and soil properties. *Ecological Applications*, v. 4, p. 363-377, 1994.
- SCHLESINGER, W. H. Changes in soil carbon storage and associated properties with disturbance and recovery. In: TRABALKA, J. R.; REICHLER, D. E. (ed.), *Changing carbon cycle*. New York: Springer, 1986, p. 194-220.
- SERRÃO, E. A. S. Alternative models for sustainable cattle ranching on already deforested lands in the Amazon. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 64. Supplement 1, 1992. p. 97-104.

SKOLE, D. S.; TUCKER, C. Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988. *Science*, v. 260, p. 1904-1910, 1993.

SKOLE, D. S.; CHOMENTOWSKI, W. H.; SALAS, W. A.; NOBRE, A. D. Physical and human demensions of deforestation in Amazonia. *BioScience*, v. 44, p. 314-322, 1994.

STEUDLER, P. A.; MELILLO, J. M.; BOWDEN, R. D.; CASTRO, E. M. C. The effect of natural and human disturbance on soil nitrogen dynamics and trace gas fluxes in a Puerto Rican wet forest. *Biotropica*, v. 23. n. 4a, p.356-363, 1991.

STEUDLER, P. A.; MELILLO, J. M.; FEIGL, B. J.; NEILL, C.; PICCOLO, M. C.; CERRI, C. C. Consequences of forest-to-pasture conversion on CH<sub>4</sub> fluxes in the Brazilian Amazon Basin. *Journal of Geophysical Research*, v. 101, p. 18547-18554, 1996.

STEUDLER, P. A.; FEIGL, B. J.; MELILLO, J. M.; NEILL, C.; PICCOLO, M. C.; CERRI, C. C. Annual patterns of soil CO<sub>2</sub> emissions from brazilian forests and pastures. *Biogeochemistry*, 1999.

TARDIN, A. T.; LEE, D. C.; SANTOS, R. J. R.; ASSIS, O. R.; BARBOSA, M. P.; MOREIRA, M.; PEREIRA, M. T.; FILHO, C. P. Subprojeto: Desmatamento. *Relatório do Convênio IBDFICNP-INPE*. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1980. p. 44.

TARDIN, A. T.; PEREIRA DA CUNHA, R. *Evaluation of deforestation in the legal Amazonia using landsat-TM images*. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1990.

TATHY, J. P.; CROSS, B.; DALMAS, R. A.; MERENCO, A.; SERVANT, J.; LABAT, M. Methane emission from flooded forest in Central Africa. *Journal of Geophysical Research*, v. 97, p. 6159-6168, 1992.

VELDKAMP, E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. *Soil Science Society of America Journal*, v. 58, p. 175-180, 1994.



## Zoneamento Agrícola e Balanço de Carbono

EDUARDO DELGADO ASSAD  
*Embrapa Cerrados, Planaltina, DF, Brasil*

MARIA LEONOR R. C. LOPES ASSAD  
*Universidade de Brasília, DF, Brasil*

**Resumo.** *O presente trabalho procurou apresentar o estágio atual dos estudos de zoneamentos no Brasil, centrando a discussão no zoneamento ecológico-econômico e no zoneamento de riscos climáticos. Em cada caso são apresentados os objetivos e as possíveis contribuições para o ordenamento territorial, e como as propostas sugeridas poderiam minimizar os efeitos da concentração de carbono na atmosfera. O exemplo específico da cultura da soja no cerrado é discutido, bem como a variação espaço temporal da distribuição da precipitação pluviométrica no centro-sul do Brasil e suas implicações no balanço de carbono. Na última parte, são apresentados cenários de crescimento da produção agrícola e quais seriam os possíveis efeitos na concentração de dióxido de carbono na atmosfera.*

## Agricultural Zoning and Carbon Balance

**Abstract.** *The paper focuses on the current status of zoning studies in Brazil, with special emphasis on ecological-economic zoning and climatic risk zoning. The purpose of each type of zoning and their potential contribution to land-use planning are presented, together with suggestions for minimising the effects of increasing concentrations of atmospheric carbon. Soybean farming in the Cerrado ecosystem and the variations in spatial-temporal rainfall distribution in the central-southern areas of the country are discussed, as well as their implications for the carbon balance. In the last part, sceneries of growth of the agricultural production are presented and which would be possible effects in the concentration of carbon in the atmosphere.*

## Introdução

A discussão sobre o aquecimento global da terra tem adquirido dimensões extraordinárias, uma vez que a própria sobrevivência da espécie humana está em questão. Com dados muitas vezes conflitantes, estima-se que a concentração de CO<sub>2</sub> no ar aumentou cerca de 30% desde 1750, ano de referência para o início da revolução industrial. Este aumento do CO<sub>2</sub> provoca o aumento do efeito estufa e conseqüentemente, aumento da temperatura. Já se constatou que a superfície terrestre está 0,6 graus centígrados mais quente (Cunha, 1997) do que em 1860, ano em que ocorreram as primeiras medições da temperatura média da Terra.

Qual a importância de diferentes tipos de *zoneamentos* na mitigação dos efeitos da agricultura sobre o clima global? Parte-se do princípio de que qualquer estudo sobre zoneamentos buscará delimitar áreas que tenham potencial produtivo e que mantenham essas potencialidades ao longo do tempo com um mínimo de impactos para o ambiente. Portanto, não se trata somente de delimitar terras que tenham *aptidão agrícola* em diferentes níveis de manejo, ou que tenham capacidade de uso diferenciadas, mas sim, de incluir também áreas de preservação permanente, áreas de uso restrito (terras indígenas, reservas extrativistas, florestas nacionais), áreas produtivas, áreas a serem recuperadas e, finalmente, áreas de ocupação rápida e conflitantes. Respeitando-se essas indicações, é possível estabelecer limites regionais, onde se atinjam bons níveis de produção agrícola com equilíbrio ambiental. Isto está sendo feito no Brasil? Sim, muitos estudos têm recomendado esta prática.

## Zoneamento Ecológico Econômico

O primeiro deles com abrangência nacional, o *Zoneamento Ecológico Econômico* (ZEE), coordenado pela SAE (Secretaria de Assuntos Estratégicos da presidência da República) (1995), é um tipo de zoneamento com abrangência nacional que tem por objetivo servir de base para o reordenamento territorial. Iniciado na Amazônia Legal, o estudo foi estruturado em três níveis de abrangência e detalhamento: O *diagnóstico ambiental*, na escala de 1:1.000.000,

que proporciona a visão de conjunto da região e sua setorização em macrozonas; o zoneamento ecológico econômico propriamente dito em nível regional, que considera os interesses dos Estados da região em escala de trabalho 1:250.000; e o estudo de áreas críticas visando ações de recuperação ou prevenção, na escala igual ou superior a 1:100.000. Esses estudos estão em andamento desde 1991, e extrapolaram a atuação restrita à Amazônia legal, atingindo hoje a maioria dos Estados brasileiros. Nesse caso, no que diz respeito ao balanço de carbono, o trabalho não atua diretamente, mas indiretamente, uma vez que são claramente delimitadas as áreas de preservação, as áreas de uso restrito e as áreas produtivas. Tais indicações são suficientes para se evitar os desastres já observados em diversas regiões do Brasil onde se verificam processos erosivos acentuados, redução ou perda da biodiversidade, queda do potencial produtivo do solo por usos inadequados etc.

O uso de práticas agrícolas corretas, em solos que sejam recomendados para aquele fim, tem promovido o seqüestro de carbono, como é o caso de observações já feitas para o sistema de plantio direto (Caruso, 1997). O manejo correto da cultura da *cana de açúcar*, sem promoção de queimadas, tem efeito altamente positivo no balanço anual de carbono no Estado de São Paulo (Rocha, 1998). A manutenção da vegetação de cerrado, evitando-se a expansão desorganizada e incontrolada das fronteiras agrícolas, também tem efeito positivo no balanço anual de carbono (Monteiro, 1995). Ou seja, tudo indica que uma agricultura bem planejada, explorada nos locais certos, com manejos corretos, pode ser benéfica para a redução dos impactos conseqüentes do aumento da concentração de carbono na atmosfera.

## **Zoneamento de Riscos Climáticos**

Um segundo estudo, também de caráter nacional, que vem sendo aplicado operacionalmente em toda a região centro-sul do Brasil, e atualmente se expandindo para o Nordeste, é o *Zoneamento de riscos climáticos*, coordenado pelo Ministério da Agricultura. Este zoneamento partiu de uma necessidade econômica, quando se constatou que 95% das perdas na agricultura brasileira eram provocadas por secas ou chuvas excessivas. Como essas perdas eram cobertas indiscriminadamente pelo Programa de Garantia da Produção Agrícola (PROAGRO), chegou-se ao disparate de executar pagamentos de

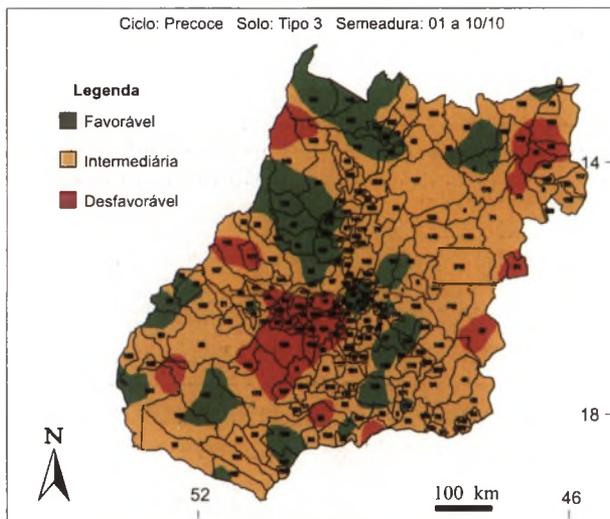
perdas por seca em agricultura irrigada (Rossetti, 1998). Era, portanto, urgente um reestudo do programa e a implantação de linhas de crédito baseadas em informações climáticas, as quais evidenciariam a ocorrência de riscos climáticos diretamente relacionados com o regime pluviométrico, e em algumas regiões, as alterações de temperatura (risco de geada). Foram indicadas as datas de plantio para cada município dos Estados da região Centro-Sul do país (Tocantins, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Distrito Federal) para as culturas de arroz, feijão, milho e soja. Nos estados produtores de trigo foi feito também a avaliação climática para esta cultura.

A relação deste zoneamento com o balanço de carbono também é indireta. Partiu-se do princípio que o *déficit hídrico* nos períodos de floração ou enchimento de grãos das culturas é o fator limitante para definir as datas de plantio (Assad et al., 1998). Este tipo de raciocínio mudou radicalmente a prática de cultivo em algumas regiões, onde a definição do plantio era determinada pelas primeiras chuvas. Diversas simulações de modelos de *balanços hídricos* indicavam que, muitas vezes, havia chuva na época de plantio, mas existia o risco de faltar água nos períodos críticos das culturas, o que provocaria uma redução da produção ou mesmo perda total das lavouras. Do ponto de vista fisiológico, estas condições implicam em redução da atividade fotossintética das culturas e são, portanto, altamente limitantes na fixação de carbono pelas plantas. Cabe destacar que quando existe perda total da lavoura, ocorre redução da cobertura vegetal e aumentam conseqüentemente, os riscos de *erosão*.

As conseqüências diretas do zoneamento de riscos climáticos foram: mudança nas regras do crédito agrícola; economia anual de 150 milhões de reais; orientação mais precisa ao agricultor quanto à data de plantio e as variedades e tipo de solos onde cultivar. Ressalte-se que até o ano de 1998, foram liberadas para o Ministério da Agricultura um milhão e oitocentas mil informações sobre riscos climáticos, traduzidas na forma de datas de plantio. Nas Figuras 1, 2 e 3 encontram-se ilustrados mapas para soja no Estado de Goiás, onde se percebe a variação espaço-temporal das datas de plantio.

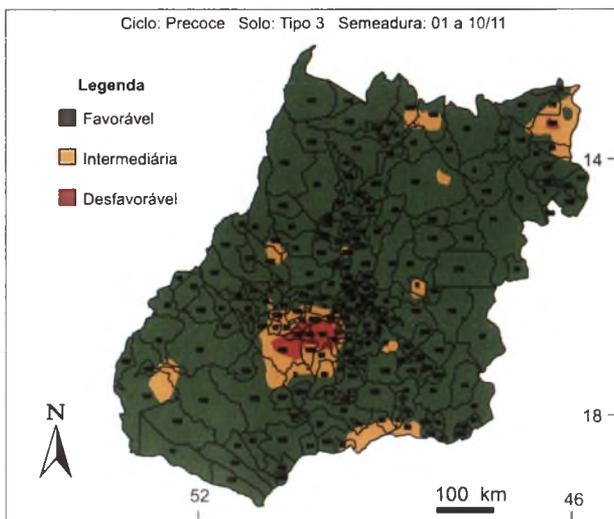
O estudo do Zoneamento de Riscos Climáticos permitiu, além da definição das datas de plantio, aprofundar a delimitação de zonas pluviometricamente homogêneas (Assad, 1994). Na Figura 4 é ilustrada a distribuição espacial da precipitação pluviométrica nos cerrados brasileiros.

**Zoneamento Agroclimático da Cultura da Soja  
Estado de Goiás**

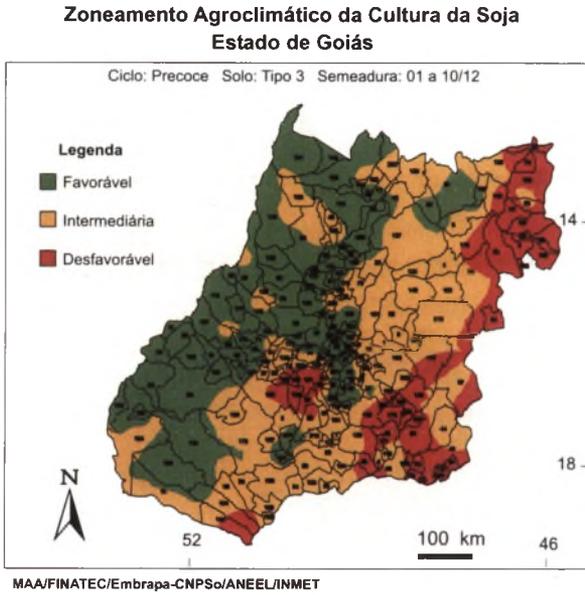


**Figura 1** - Variação espacial do plantio de soja no Estado de Goiás, no período de 01 a 10 de outubro

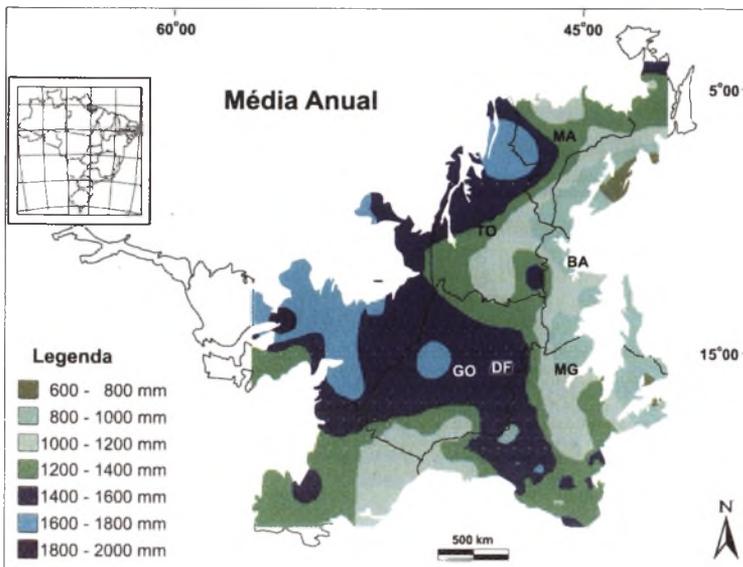
**Zoneamento Agroclimático da Cultura da Soja  
Estado de Goiás**



**Figura 2** - Variação espacial do plantio de soja no Estado de Goiás, no período de 01 a 10 de novembro



**Figura 3** - Variação espacial do plantio de soja no Estado de Goiás, no período de 01 a 10 de dezembro



**Figura 4** - Distribuição espacial da precipitação pluviométrica média anual nos cerrados brasileiros

No caso da chuva nos cerrados, surgiram alguns indicativos. Verificou-se que a variação espacial da precipitação nesta região situa-se entre 600 mm à 2.000 mm. A faixa predominante (cerca de 56% da superfície dos cerrados) corresponde à variação de 1.200 mm à 1.600 mm. Parte da região recebe anualmente 600 mm de chuva. Nesta situação não é recomendada a prática de culturas anuais intensivas, a não ser que se utilize irrigação. Portanto, quando se preconiza que “soja vai bem nos cerrados”, é importante verificar em quais condições de oferta pluviométrica. Fica evidente que, tomando-se por base o parâmetro chuva, a adoção de sistemas de produção diferenciados constituem o fundamento para a definição de políticas públicas regionais. Quanto mais adaptado o sistema de produção às suas condições ambientais, mais favorável será o balanço de carbono.

Os dois exemplos citados, de Zoneamento Ecológico Econômico e de Zoneamento de Riscos Climáticos, mostram que as ferramentas para ordenamento territorial e para avaliação da variação das condições climáticas de cultivo existem, e podem ser aplicadas imediatamente, favorecendo o balanço de carbono e, portanto, reduzindo a ação do efeito estufa na atmosfera.

## **Cenários Indicativos**

Com os zoneamentos estabelecidos, é possível traçar cenários sobre possíveis mudanças que poderão ocorrer com relação ao balanço de carbono e a crescente demanda mundial por alimentos. Especificamente nesta seção será tratado somente o caso dos cerrados brasileiros, uma vez que esta região é considerada a última fronteira para expansão da agricultura no globo. Alguns dados ainda preliminares auxiliaram no estudo dos cenários: parte-se do princípio que a capacidade de armazenamento de carbono do cerrado *sensu strictu* é de 2 t/ha/ano (Monteiro, 1995); que as pastagens armazenam em torno de 0,5 t/ha/ano e que os sistemas de cultivo armazenam em torno de 0,3 t/ha/ano (Resck, 1998, comunicação pessoal, dados preliminares de pesquisas na Embrapa Cerrados); que a produtividade média de grãos nos cerrados é de duas toneladas/ha (Embrapa, 1997).

### *Primeiro Caso: Situação Atual*

O Cerrado brasileiro ocupa uma superfície de 204 milhões de hectares, onde destes, 35 milhões estão ocupados com pastagens, 10 milhões com agricultura e dois milhões com culturas perenes (Embrapa, 1997). Esta região contribui hoje com 35% da produção de grãos do Brasil (cerca de 20 milhões de toneladas/ano) e com 45% do rebanho bovino nacional. Mantendo-se esta situação, e não havendo nenhuma política de expansão de fronteira agrícola ou de verticalização de produção, pode-se estimar que o armazenamento do carbono está em torno de 334 milhões de toneladas/ano, assim distribuídos: 314 milhões referentes à vegetação natural (aqui considerada cerrado *sensu strictu*); 17 milhões referentes às pastagens (não se consideram os diversos níveis de degradação em que se encontram) e 3,6 milhões referentes às culturas anuais e perenes. Estes números prospectivos estão relacionados com uma produção anual de 50 milhões de toneladas de alimentos (grãos, carne, fibras etc). Para “fechar” o balanço de carbono, é importante quantificar as emissões que ocorrem na região por meio de queimadas, de queima de combustíveis fósseis etc.

### *Segundo Caso: Expansão da Fronteira Agrícola*

Estudos desenvolvidos na Embrapa Cerrados, considerando apenas a noção de aptidão agrícola proposta por Ramalho & Beek (1995), indicam que nesta região existem 127 milhões de hectares de terras aráveis, onde 47 milhões já estão ocupados com agricultura, pastagens e culturas perenes, conforme apresentado no primeiro caso. Adotando-se a política de expansão da fronteira agrícola, restam, portanto, a ocupar 80 milhões de hectares, que podem ser assim adicionados aos já existentes da seguinte maneira: 20 milhões para pastagens, 55 milhões para agricultura (incluindo 10 milhões para agricultura irrigada) e 7 milhões com culturas perenes. Aproximadamente 77 milhões de hectares ficariam com a cobertura natural. Com este cenário, o armazenamento de carbono seria da ordem de 203 milhões de toneladas/ano assim distribuídos: 154 milhões para a vegetação natural; 27,5 milhões para pastagens; 19,5 milhões para agricultura; 2,1 milhões para culturas perenes. Este armazenamento de carbono estaria atrelado a uma produção de aproximadamente 300 milhões de toneladas de alimentos (grãos, carne, fibras etc).

Um cenário como este deve ser considerado com cuidado sob vários aspectos: primeiro, a demanda de alimentos depende de um mercado flutuante e tornar disponível 300 milhões de toneladas/ano de alimentos requer estudos detalhados de comercialização e abastecimento; segundo, os 127 milhões de hectares potenciais são baseados em estudos de aptidão agrícola e requerem hoje um reestudo detalhado, levando-se em consideração a legislação ambiental existente e a sustentabilidade dos solos em condições de práticas intensivas; terceiro, observa-se, pelos cálculos prospectivos, uma redução drástica do armazenamento de carbono, conseqüentemente, maior contribuição para o aumento do efeito estufa na atmosfera; quarto, não é considerada neste cenário a redução da biodiversidade, talvez hoje o maior patrimônio dos cerrados brasileiros.

### *Terceiro Caso: Verticalização*

Neste caso, não haveria expansão de fronteira, buscar-se-ia atingir patamares de produção agrícola compatíveis com a demanda nacional, por meio da indução de tecnologia. Manter-se-ão os 157 milhões de hectares com a vegetação natural; dos 47 milhões de hectares com produção agrícola, serão estimulados o plantio direto nas áreas com grãos (10 milhões de hectares) e a integração agricultura-pecuária nos 35 milhões de hectares com pastagens. Na verdade, a proposta básica é de se implementar um grande programa de recuperação de pastagens degradadas integrando-se agricultura e pecuária. O armazenamento de carbono totalizaria 345,6 milhões de toneladas/ano, assim distribuídos: 314 milhões na superfície com vegetação natural (aqui considerada cerrado *sensu strictu*); 28 milhões de toneladas/ano nas áreas com integração agricultura-pecuária; 3 milhões de toneladas/ano nas áreas somente com agricultura e 0,6 milhões toneladas/ano nas áreas com culturas perenes. Ao armazenamento de carbono, estaria atrelada uma produção agrícola próxima de 100 milhões de toneladas de alimentos. Os pontos questionáveis deste cenário seriam: forte dependência de créditos oficiais, principalmente para pecuária; verticalização fundamentada no aporte de insumos importados, principalmente fertilizantes. Os pontos favoráveis seriam: aumento de produção sem abertura de novas fronteiras agrícolas; recuperação das pastagens degradadas; melhoria na ciclagem de nutrientes nas áreas de pastagens recuperadas; melhoria do vigor das pastagens e conseqüentemente, melhoria da qualidade da carne;

aumento no armazenamento de carbono nos 35 milhões de hectares com pastagens e redução de erosão.

Este terceiro e último cenário parece ser o mais adequado. Em termos de técnicas de zoneamento, entretanto, é apresentado um novo problema: como identificar as pastagens nos seus mais diversos níveis de degradação (Spain & Gualdrón, 1988). Neste sentido, recentes trabalhos (Rodrigues, 1998) mostram que é possível identificar pelo menos cinco níveis diferentes de degradação de pastagens em área representativa da região dos cerrados, por meio de técnicas de classificação de imagens de satélites de observação da Terra, utilizando segmentadores.

Estes três cenários evidenciam a complexidade das possíveis soluções para se manter a produção agrícola, evitar a degradação ambiental e promover o armazenamento de carbono. Os números apresentados são preliminares e devem ser vistos com cautela, uma vez que os estudos do balanço de carbono na região apenas começaram. Por outro lado, é razoável afirmar que o uso dos produtos originários dos diversos tipos de zoneamentos podem orientar melhor a ocupação do espaço agrícola e reduzir as perdas provocadas pelas flutuações climáticas regionais.

## Referências Bibliográficas

- ASSAD, E.D. *Chuvas nos cerrados*. Brasília: Embrapa Cerrados/SPI, 1994. 423 p.
- ASSAD, E.D.; SANO, E. E.; BEZERRA, H. S.; SILVA, S. C.; LOBATO, E. J. V. Uso de modelos numéricos de terreno na espacialização de épocas de plantio. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. (ed.), *Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura*. Brasília: Embrapa Cerrados/SPI, 1998. 434 p.
- CARUSO, R. *Cerrado brasileiro: desenvolvimento, preservação e sustentabilidade*. Campinas: Fundação Cargill, 1997. 112 p.
- CUNHA, G.R. *Meteorologia, fatos & mitos*. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1997. 268 p.
- EMBRAPA-Cerrados. *Embrapa Cerrados e a região dos cerrados*. Informações básicas e dados estatísticos. Planaltina, DF, 1997. 24 p.

MONTEIRO, J.M.G. *Fluxos de CO<sub>2</sub> em um cerrado sensu strictu*. Brasília: Universidade de Brasília, Depto. de Ecologia, 1995, 61 p. (Dissertação de Mestrado).

RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K.J. *Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras*. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1995. 65 p.

ROCHA, H.R. *Modelagem e observações das relações biosfera-atmosfera na região sudeste*. São Paulo: USP-Instituto Astronômico e Geofísico - Departamento de Ciências Atmosféricas, 1998. 142 p. (Tese de Doutorado).

RODRIGUES, L.M.R. *Geoprocessamento aplicado ao estudo da evolução e adequação do uso agrícola das terras na microbacia do córrego Lamarão*, D.F. Brasília: UnB, Instituto de Geociências, Depto. de Geologia, 1998. 107 p. (Dissertação de Mestrado).

ROSSETTI, L.A. Seguridad e zoneamento Agrícola no Brasil. Novos Rumos. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE SEGURIDADE E ZONEAMENTO AGRÍCOLA NO MERCOSUL, 1., Brasília, 1998. *Anais...*, Brasília, 1998. p. 1-11.

SAE/MMA. *Detalhamento da metodologia para execução do zoneamento ecológico e econômico pelos estados da Amazônia Legal*. Brasília, 1995. 36 p. mimeo.

SPAIN, J.M.; GUALDRÓN, R. Degradación y rehabilitación de pasturas. In: REUNIÓN DEL COMITÉ ASESOR DE RIEPT, 4., Veracruz, 1988. *Memórias...* Veracruz: Red Internacional de Evaluación de Pastos Tropicales: CIAT., 1988. p. 269-283.



## Manejo de Dejetos e de Alimentação da Pecuária Leiteira como Estratégia para a Redução das Emissões de Metano

ALOÍSIO TORRES DE CAMPOS, PEDRO BRAGA ARCURI,  
MARIA DE FÁTIMA ÁVILA PIRES, JOSÉ VALENTE  
*Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora, MG, Brasil*

ALESSANDRO TORRES CAMPOS  
*UNIOESTE, Marechal Cândido Rondon, PR, Brasil*

**Resumo.** *O problema ambiental hoje, no mundo, estende-se à toda a biosfera na forma de efeito estufa, de redução da camada de ozônio, chuvas ácidas e conseqüências globais, como alterações de clima, elevação do nível do mar, aumento de radiações ultravioleta, contaminação das águas superficiais e subterrâneas, perdas de solo pela erosão, aumento das áreas de deserto, redução da cobertura vegetal pelo desmatamento, redução da diversidade biológica animal e vegetal. Os principais agentes alteradores do clima mundial originados pela atividade humana são provavelmente resultantes imediatos de atividades industriais. As atividades agropecuárias são menos danosas ao ambiente devido ao efeito de reciclagem do CO<sub>2</sub> pelas plantas. Da mesma forma, a pecuária contribui para a reciclagem de produtos vegetais ricos em celulose, não digeríveis por monogástricos, produzindo carne, leite, lã e trabalho, fundamentais para a existência humana. Com o aumento da produtividade dos ruminantes domésticos, por meio de práticas de manejo e estratégias de alimentação, estes poderão reduzir significativamente sua emissão de metano por unidade de produto. Atualmente, o uso de sistemas intensivos de produção, em que grande número de vacas leiteiras permanecem confinadas, causa impacto ao ambiente por meio do acúmulo de dejetos e resíduos em áreas adjacentes. Dejetos e resíduos, quando não devidamente manejados, geram poluição do solo, do ar e de cursos e lençóis d'água. A origem dos resíduos, seu potencial poluidor, bem como algumas formas de tratamento de resíduos da atividade leiteira intensiva, são apresentados e discutidos neste trabalho.*

## Food and Waste Management in Dairy Cattle Farming as a Strategy for Reducing Methane Emissions

*Abstract.* Current environmental problems, such as the greenhouse effect, reduction of the ozone layer and acid rains, affect the whole biosphere. Trends suggest climate changes, elevation of sea levels, increased ultraviolet radiation on the surface of the planet, as well as the already proven contamination of superficial and underground waters, increased desertification and soil losses from erosion, deforestation, and decreased animal and plant biodiversity. The main anthropogenic agents of climate changes throughout the world are associated with industrial activities. Agricultural activities are less harmful to the atmosphere due to the CO<sub>2</sub> recycling effect of photosynthesising organisms. Similarly, ruminant livestock contribute to the recycling of vegetables rich in cellulose that monogastric animals cannot digest, while producing meat, milk, wool, and labour to meet man's needs. Since the productivity of domestic ruminants increases through improved management practices and feeding strategies, their methane emission per product unit can be significantly reduced. Intensive production systems, with facilities for large numbers of confined milking cows, can cause a localised environmental impact through the accumulation of animal wastes and other residues within a small area. When inadequately managed, animal wastes and excreta generate soil, air and water pollution. The origin of the animal wastes, their pollution potential, as well as the principles of treatment of animal wastes and residues from the intensive milk production systems are presented and discussed in the paper.

### Introdução

Apesar de sua presença ser relativamente recente no planeta, os seres humanos desenvolveram padrões de atividades que contribuem para as mudanças climáticas (Douglis, 1996). A química da atmosfera vem sendo alterada por milhões de toneladas de poluentes lançados no ar. Enquanto alguns compostos provocam chuvas ácidas, outros corroem a camada protetora de ozônio (O<sub>3</sub>). Entretanto, a atividade mais prejudicial parece ser a emissão de vastas

quantidades de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) resultante da queima de combustíveis fósseis nos veículos e nas usinas termoeletricas. Douglis (1996) cita que atualmente são lançados na atmosfera cerca de 6 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> todos os anos somente com a queima de petróleo e carvão. Esse gás, embora seja um dos componentes naturais do ar, pode, quando em excesso, causar o efeito estufa, aumentando potencialmente a temperatura média global. O autor ressalta que a interferência humana mais significativa na instabilidade das condições climáticas esteja no uso de combustíveis fósseis. Segundo Branco (1989), cerca de 83% das formas de energia utilizadas no mundo provêm de energia química fóssil, e apenas 0,1% é proveniente de energia limpa e renovável, ou seja, a energia eólica e a energia solar direta (Tabela 1).

**Tabela 1** - Formas de energia utilizadas no mundo

Formas de energia	Utilização (%)
Energia eólica + energia solar direta	0,1
Energia nuclear	2,9
Energia hidráulica e maremotora	4,0
Energia bioquímica (alimento, tração animal e combustão de biomassa)	10,0
Energia química fóssil (petróleo, carvão, gás)	83,0
Total	100,0

**Fonte:** Branco (1989)

Embora a responsabilidade pela emissão da maior parte dos gases que podem causar o aumento do efeito estufa seja dos países industrializados, o Brasil tem sido responsabilizado por cerca de 4% das emissões globais de CO<sub>2</sub> dos quais grande parte provém da queima de florestas, pastagens e plantações de cana-de-açúcar (Flores & Nascimento, 1992). Entretanto, esses autores argumentam que a queima da biomassa não pode ser a causa do enriquecimento da atmosfera com CO<sub>2</sub>, uma vez que qualquer biomassa, ao ser queimada, retorna à atmosfera somente o carbono retirado anteriormente pela fotossíntese, contrastando com a queima dos combustíveis fósseis armazenados no subsolo por milhões de anos. De acordo com esse raciocínio, portanto, a agropecuária não deve ser considerada a atividade econômica causadora de maior impacto ambiental na terra.

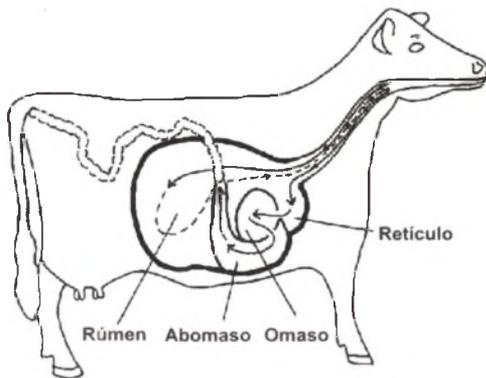
Nas últimas décadas, a economia brasileira transformou-se radicalmente. O processo de industrialização alcançou seu momento máximo, a urbanização da sociedade tornou-se uma realidade e a agropecuária reduziu sua participação na economia nacional (Brasil, 1991). No passado, o campo foi o responsável pela geração de divisas essenciais para a nossa industrialização, e, no presente, é o responsável pelos eventuais superávits na balança de pagamentos (Menezes, 1987). O Brasil tem um grande mercado potencial para produtos lácteos e condições favoráveis para produzir leite, suprir a demanda interna e gerar excedentes exportáveis. A possibilidade de produzir leite em todo o território nacional, aliada à disponibilidade de terra, principalmente nos Cerrados, com custo de produção relativamente baixo e grande oferta de grãos, podem favorecer este mercado (Vilela et al., 1998). A produção animal é uma das atividades agrícolas mais importantes para o suprimento de alimentos de qualidade e ricos em proteínas à população mundial (Kirchgessner et al., 1993). O leite é o alimento natural mais completo, mais importante e mais utilizado na dieta dos povos (Naufel, 1984). Entretanto, quando os animais são mal manejados nos diversos sistemas de produção, a atividade pecuária pode promover riscos ecológicos. O cultivo intensivo do solo com o objetivo de produzir alimentos para os sistemas de produção animal, utilizando grandes quantidades de fertilizantes químicos, altamente poluentes e energeticamente intensivos, pode aumentar significativamente a poluição do solo, das águas superficiais e subterrâneas por nitritos e nitratos (Kirchgessner et al., 1993). Constitui-se, portanto, um desafio atingir a produção sustentável e econômica de leite em quantidade e qualidade demandadas pela sociedade brasileira, preservando-se o ambiente nas regiões produtoras.

### **Produção de Metano em Sistemas de Produção de Bovinos**

Animais ruminantes produzem metano em seus sistemas digestivos, considerado um dos gases responsáveis pelo efeito estufa. A concentração de metano no ar é muito inferior que a de gás carbônico, porém o seu significativo aumento tem sido considerado um sério problema, porque seu potencial para o efeito estufa para cada mole foi estimado em cerca de 20 vezes superior ao do dióxido de carbono. Segundo o relatório de 1990 do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), os ruminantes produzem de 60 a 100 milhões (média

de 80 milhões) de toneladas de metano produzido no mundo por ano. A origem metabólica do metano é apresentada a seguir.

Nenhum mamífero fabrica enzimas (celulases) que decomponham a celulose em açúcares solúveis. Os ruminantes conseguiram contornar essa desvantagem da dieta herbívora devido à simbiose com microorganismos que decompõem a celulose (Van Soest, 1994) em um tipo de estômago altamente especializado, dividido em quatro compartimentos. Os dois primeiros, conhecidos como “retículo-rúmen” ou “rume” (Figura 1), são essencialmente câmaras de incubação para bactérias (1010/mL), protozoários (108/mL) e fungos (106/mL). Na vaca, o rúmen é uma bolsa com capacidade de cerca de 100 litros, dependendo do tamanho do animal. Os alimentos ingeridos pelo animal são misturados com saliva (150 litros/dia ou mais) e depois passados ao rúmen, onde bactérias e protozoários rapidamente se aderem. A ruminação, então, facilita a degradação do alimento pelos microrganismos, através da redução dos alimentos em partículas menores e tamponamento via saliva. Os dois compartimentos subseqüentes são o “omaso”, cujas funções básicas são a seleção de partículas pelo tamanho e retenção de água, e o “abomaso”, onde se processa a digestão gástrica propriamente dita.



**Figura 1** - Diagrama do aparelho digestivo de uma vaca, formado por quatro compartimentos: a) rúmen ou pança, b) retículo ou barrete, c) omaso, livro ou folhoso d) abomaso ou estômago verdadeiro. A posição relativa dos órgãos e o trato digestivo inferior estão apenas indicados

Fonte: Adaptado de Foley et al. (1973)

O trato gastrointestinal dos animais superiores, inclusive dos ruminantes, é anaeróbio, o que significa ser um ambiente caracterizado pela ausência de oxigênio. Existem no rúmen muitos microrganismos diferentes, que interagem de forma muito complexa (Hungate, 1966). O resultado final é muito simples: a celulose e outros compostos presentes na forragem ingerida são catabolizados através de um número relativamente pequeno de vias metabólicas. Durante a fermentação da parede celular, ocorre a transformação das moléculas de carboidratos em produtos orgânicos, por exemplo: ácidos graxos voláteis (principalmente acético, propiônico e butírico), ácido lático e etanol. Devido à ausência de oxigênio, esses compostos retêm grande parte da energia química originalmente presente na molécula de carboidrato e, portanto, são a forma mais comum de absorção de energia pelos ruminantes. Uma segunda característica é a limitação dos microrganismos quanto à sua capacidade de degradação dos componentes da parede celular. Essa limitação está relacionada com a capacidade da microbiota ruminal em utilizar o oxigênio contido nas próprias moléculas de carboidrato, a fim de liberar (ou produzir)  $\text{CO}_2$  e os produtos orgânicos. A diferença em energia liberada é grande: o metabolismo aeróbio de um mol de glicose até  $\text{CO}_2$  e água produz 38 moles de ATP, enquanto o metabolismo anaeróbio produz entre 2 e 6 moles de ATP, dependendo do ambiente (quantidade de oxigênio presente nas moléculas), da microbiota envolvida (tipos de organismos fermentando ativamente) e do produto final (isto é, do tipo de ácido graxo ou outro composto formado). A reação hidrolítica principal é mostrada abaixo, e caracteriza a via glicolítica, também chamada Embden Meyerhoff Parnas (via EMP). Através dessa via metabólica, glicose é transformada em piruvato por meio de uma série de reações que podem ser sumarizadas como:



Onde:

NAD, NADH = adenina nicotinamida, adenina nicotinamida reduzida, uma coenzima necessária para a dehidrogenação oxidativa de glicose e outros substratos;

ADP, ATP = adenosina difosfato e adenosina trifosfato, um nucleotídeo encontrado em todas as células, importante no armazenamento de energia em reações químicas.

As moléculas de piruvato formadas pela glicólise podem participar como precursores de uma grande variedade de reações metabólicas cujos produtos finais (por exemplo, succinato, etanol, lactato,  $H_2$ , acetato, propionato, butirato etc.) têm a função primordial de absorver elétrons, de modo que oxide e recicle coenzimas e ferredoxinas reduzidas durante a etapa de glicólise (Macfarlane & Gibson, 1997). Devido ao alto conteúdo energético desses compostos, especialmente os ácidos graxos voláteis, acetato, propionato e butirato, o ruminante os absorve através da parede ruminal e os utiliza como fonte de energia (Hungate, 1966). Conseqüentemente, um excesso de prótons (hidrogênio ionizado) ocorre, e uma das mais eficientes formas de “drenar” esse excesso é através de uma série de reações (transferência interespecífica de hidrogênio) no rúmen, que culminam com a produção de metano ( $CH_4$ ).

A estimativa da contribuição relativa potencial (% do total de  $CH_4$  emitido/ano) das principais fontes de metano é calculada dividindo-se a estimativa da produção anual total de metano (0,55 bilhões de toneladas em 1992) pela estimativa da produção de cada uma das fontes (Van Soest, 1994). Esses dados podem ser melhor visualizados pela Tabela 2.

**Tabela 2** - Fontes de produção mundial de metano ( $CH_4$ )

Fontes de produção de metano	Quantidade (%)	Estimativa (milhões de toneladas)
Pântano	26,00	143,00
Tabuleiros de arroz	20,00	110,00
Grandes ruminantes domésticos	11,00	60,50
Pequenos ruminantes	2,70	14,85
Ruminantes selvagens	1,00	5,50
Vazamentos de petróleo, gás natural e carvão mineral	14,00	77,00
Queima de biomassa	10,00	55,00
Aterros	7,00	38,50
Resíduos de animais	3,00	16,50
Térmitas (cupins)	2,00	11,00
Equídeos	2,00	11,00
Suíños	1,00	5,50
Humanos	0,30	1,65
Total	100,00	550,00

Fonte: Adaptado de Van Soest (1994)

Assumindo-se que o rebanho de gado leiteiro é muito menor do que o rebanho de corte, fica evidente que a contribuição do gado leiteiro para a produção de metano é relativamente pequena quando comparada com outras fontes.

Do total de  $1,3 \times 10^9$  cabeças de gado bovino existentes no mundo (FAO Yearbook, 1999, [www.fao.org](http://www.fao.org)), a grande maioria encontra-se nos países em desenvolvimento. Nestes países, a eficiência média de utilização dos alimentos é significativamente mais baixa quando comparada à eficiência de conversão alimentar obtida nos países industrializados devido a problemas de manejo, características genéticas e valor nutritivo dos alimentos utilizados. Além disso, forragens tropicais apresentam maiores taxas de conversão da energia bruta dos alimentos em metano (Kurihara et al., 1999). Portanto, a redução da emissão de metano originada por bovinos leiteiros implica na melhora da eficiência de conversão alimentar e no uso de sistemas intensivos de produção a pasto nos países em desenvolvimento. Tais sistemas visam a melhoria do valor nutritivo de forragens tropicais (maior digestibilidade, maior consumo) para o incremento da eficiência de conversão alimentar em leite e carne.

Outros fatores de manejo também apresentam potencial para redução de metano, por exemplo, a redução ou eliminação da população ruminal de protozoários, uso de esteróides e ionóforos. Ionóforos são moléculas que têm afinidades por íons monovalentes, especialmente sódio e potássio, no caso do composto monensina, o ionóforo mais usado (Lana, 1997). Os ionóforos interferem no transporte de hidrogênio entre diferentes espécies de microorganismos, alterando a transferência interespecífica de hidrogênio e consequentemente impedindo que a população de microorganismos metanogênicos reduza  $\text{CO}_2$  a  $\text{CH}_4$ . Neste caso, ocorre uma alteração no balanço de carbono, havendo aumento na produção de mais ácidos graxos voláteis, especialmente propionato. Como este é rico em energia, a redução de metano pela inibição dos microrganismos metanogênicos é nutricionalmente interessante.

## **Produção de Dejetos por Bovinos**

A quantidade de dejetos produzidos por dia, os teores de umidade, de matéria seca (MS) e a composição química variam de acordo com o peso do animal, idade, tipo de alimentação consumida, digestibilidade do alimento, quantidade de água ingerida, estação do ano e outros fatores. O conteúdo real

de sólidos depende ainda do tipo de cama usada nos confinamentos, restos de alimentos, águas de limpeza e evaporação (Buckman & Brady, 1968; Barber, 1979; Van Horn, 1992; Morse et al., 1994). A produção diária de dejetos frescos (sólidos e líquidos), por animais de raças leiteiras, é da ordem de 8% - 11% de seu peso vivo, com teor 10% - 12% de MS (Garcia-Vaquero, 1981; ASAE, 1983; Midwest, 1974; Bath, 1985; Hermeto Bueno, 1986). A relação fezes/urina (F/U) nas dejeções de gado leiteiro, segundo Giessmann (1981) e Midwest (1974), é de 1,5 e 2,2, respectivamente. Segundo dados da ASAE (1983), a densidade média do esterco fresco de vacas em lactação é de 1.005 kg/m<sup>3</sup>. Morse et al. (1994), trabalhando com vacas holandesas em lactação, com 567 kg de peso vivo médio, ingerindo uma alimentação fixa de 20 kg de MS, por animal, por dia, e 16 kg de MS por 454 kg de peso vivo, encontraram uma relação média de F/U, nas dejeções de 1,6, com uma variação de 1,4 a 1,9. Alguns valores característicos dessa produção podem ser vistos na Tabela 3.

**Tabela 3** - Produção diária de esterco (fezes + urina), por animais de raças leiteiras, com 87,3% de umidade, 933,00 kg/m<sup>3</sup> de densidade e conteúdo em nutrientes

Peso do Animal (kg)	Produção Total de Esterco (m <sup>3</sup> /dia)	Conteúdo em Nutrientes (g/dia)		
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
68	0,005	27,22	10,40	21,85
113	0,009	45,36	20,78	38,25
227	0,019	90,72	37,42	76,49
454	0,037	185,97	75,87	147,52
635	0,052	258,55	106,02	207,63

Fonte: Midwest (1974)

A reciclagem de nutrientes e da matéria orgânica do esterco de animais, como forma de evitar a poluição ambiental e preservar as características físicas, químicas e biológicas do solo, é o destino mais nobre que se pode dar a esses resíduos. Campos (1997), estudando a viabilidade da reciclagem de dejetos de bovinos com tratamento biológico aeróbio, em sistema intensivo de produção de leite (SIPL), concluiu que a reciclagem total do efluente tratado (como

biofertilizante), no solo, promove o saneamento ambiental e restitui parte dos nutrientes consumidos pelas culturas, podendo contribuir significativamente para o desenvolvimento de uma agricultura sustentável. Neste sentido, Flores & Nascimento (1992) argumentam que a idéia central da agricultura sustentável é o uso de tecnologias adequadas às condições do ambiente regional e local, com previsão e prevenção dos impactos negativos, sejam eles sociais, econômicos ou ambientais.

### **Tratamento Biológico de Resíduos e Reciclagem como Forma de Mitigação da Poluição Ambiental**

Segundo pesquisa da EPA (1994), 4% das emissões globais antropogênicas de metano (14,16 milhões t) são originados dos sistemas de manejo de esterco, especialmente nos Sistemas de Produção em Confinamento em grande escala.

Tecnicamente, a medida mais eficiente e econômica para mitigação da emissão global de metano oriundos do manejo de dejetos de animais é a utilização de sistemas de tratamento biológico aeróbio, onde a produção de metano é nula ou quase nula. Esses aspectos serão abordados mais detalhadamente a seguir.

O tratamento mais recomendado aos dejetos e águas residuárias de instalações de bovinos é do tipo biológico (Taiganides, 1977; Giessmann, 1981). Os processos de tratamento biológico podem ser aeróbios e anaeróbios, conforme os tipos de respiração dos microrganismos decompositores. Esse tratamento consiste, basicamente, no aceleração dos processos naturais de decomposição, utilizando os mesmos microrganismos decompositores existentes na natureza, porém, fornecendo-lhes as condições físicas e químicas ideais a sua atividade, para que eles possam reproduzir-se ativamente em menor tempo e espaço reduzido para decompor maiores quantidades de resíduos (Branco, 1978).

O ambiente aeróbio, com abundância de ar, é o mais propício à decomposição, quando o objetivo do tratamento dos resíduos for a sua mineralização de forma mais rápida possível, e quando os custos com energia gasta durante o processo não forem proibitivos. No tratamento biológico aeróbio, procura-se repetir, em curto espaço de tempo, os mesmos processos que se

verificam ao longo da correnteza de um rio, ou na área de um lago, com respeito a autodepuração (Branco, 1983; Branco, 1986; Figueiredo, 1988). Para isso, é necessário que se proporcionem ao resíduo, na estação de tratamento, as condições ideais, que favoreçam a oxidação biológica. Os vários métodos de sistemas de tratamento procuram, exatamente, conseguir uma elevada taxa de oxidação biológica, por diferentes processos de fornecimento de oxigênio. A função de um processo de tratamento biológico aeróbio é portanto, remover a matéria orgânica do efluente, por meio do metabolismo de oxidação e de síntese das células (Centurión & Gunther, 1976; Culp et al. 1978; Metcalf & Eddy, 1991; Von Sperling, 1994). Quanto menor o tempo de contato (tempo de retenção ou detenção), dentro do ótimo, entre os microrganismos e o substrato, maior será a velocidade de utilização do substrato e a sensibilidade do processo às variações do pH, temperatura, carga orgânica (concentração do substrato), fluxo de materiais (Branco & Hess, 1975; Braile & Cavalcanti, 1993). Geralmente, referindo-se a um processo biológico, a equação é assim simbolizada (Braile & Cavalcanti, 1993):

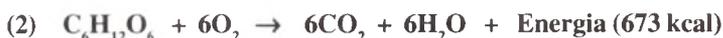


Onde:

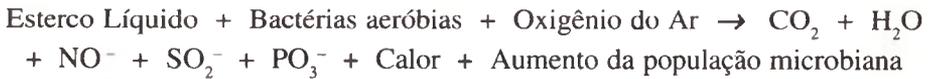
*AH<sub>2</sub> = composto redutor (o que vai ser oxidado) ou doador de hidrogênio (elétrons); B = composto oxidante (o que vai ser reduzido) ou acceptor de hidrogênio.*

Quando o composto que funciona como acceptor de hidrogênio (elétrons) é o oxigênio molecular, diz-se que a respiração é aeróbia; quando, porém, o oxigênio molecular não intervém na reação, sendo o acceptor um composto qualquer, a reação passa a ser anaeróbia.

O processo de respiração aeróbia pode ser representado, em linhas gerais, pela reação (Branco & Hess, 1975; Silva, 1977; Figueiredo, 1988; Braile & Cavalcanti, 1993):

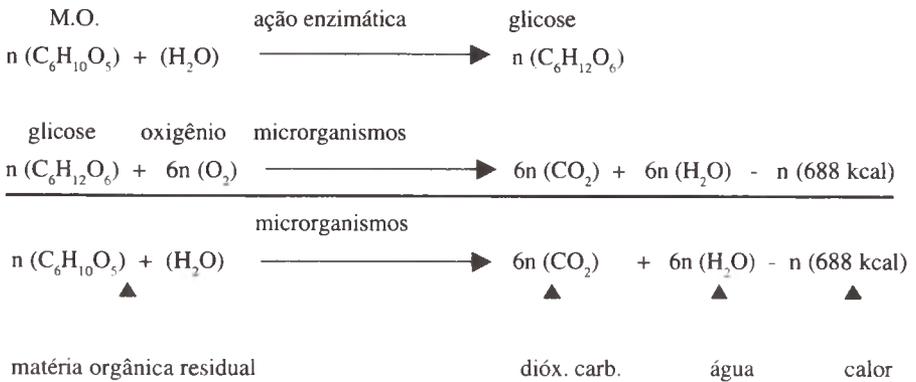


Observa-se que, em presença de oxigênio molecular, a oxidação é completa, isto é, a molécula orgânica é totalmente desmembrada, cedendo toda sua energia potencial disponível e formando, como subproduto carbonáceo, o CO<sub>2</sub>, que é desprovido de energia útil. Segundo Garcia-Vaquero (1981), o processo de desodorização de esterco líquido, visando a sua estabilização e disposição final no solo, consiste em estimular as fermentações aeróbias e impedir as anaeróbias. A reação bioquímica que ocorre é a seguinte:



Observa-se na reação aeróbia que todos os produtos da decomposição são elementos voláteis, sem mau cheiro ou sais que ficam dissolvidos na água (Metcalf & Eddy, 1991; Branco, 1983; Kiehl, 1985; Giessmann, 1981).

Segundo Lima (1985), as principais reações bioquímicas que ocorrem na digestão aeróbia de resíduos orgânicos sólidos podem ser representadas pelo diagrama:

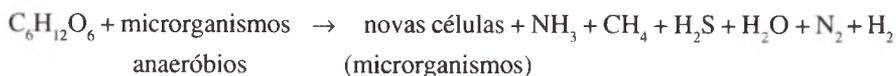


O tratamento anaeróbio é utilizado quando é possível manter-se o resíduo sob tratamento por um tempo maior, ou quando a energia gasta durante o tratamento do resíduo é uma variável cujo custo deva ser minimizado. Durante o tratamento anaeróbio, as reações bioquímicas que ocorrem são as mesmas observadas durante o processo digestivo. A oxidação é apenas parcial, levando à formação de subprodutos que ainda contêm energia potencial disponível, tais como metano, álcoois ou ácidos graxos (Branco & Hess, 1975). A diferença

fundamental é que moléculas ricas em energia são ao final reduzidas a metano, gerando um subproduto, o biogás, rico em energia combustível (em geral 60% do biogás é composto de metano) que, se devidamente canalizado ou armazenado, pode ser utilizado para a produção de calor ou trabalho. Em geral, porém, as instalações para o tratamento anaeróbio de resíduos em grande quantidade são mais caras e exigem uma relativa sofisticação técnica, quando comparadas às instalações para o tratamento aeróbio. O biogás é uma mistura de gases, contendo, além de metano e  $\text{CO}_2$  (aproximadamente 40%), uma pequena percentagem de  $\text{H}_2\text{S}$  e traços de outros gases como pode ser observado nas equações seguintes.

Esquemáticamente, a respiração anaeróbia de produtos orgânicos biodegradáveis pode ser representada pelas seguintes equações:

Matéria Orgânica		Microorganismos		Formação		Produtos
Moléculas grandes e Complexas	+	Anaeróbios e Facultativos	→	de novas células	+	não oxidados completamente



Como no tratamento aeróbio, o produto final do tratamento anaeróbio é a mineralização da matéria orgânica que, pela eliminação de grande parte do carbono, sob a forma de  $\text{CO}_2$  ou  $\text{CH}_4$ , ainda contém quantidades proporcionalmente maiores de nutrientes se comparadas às quantidades contidas no resíduo não-tratado.

Verifica-se, portanto, que nas reações bioquímicas aeróbias não há formação de metano como ocorre nas reações anaeróbias, contribuindo significativamente para a redução desse gás na atmosfera.

### Considerações Finais

Os impactos causados pela emissão de gases oriundos da atividade pecuária, notadamente o gás metano, poderiam ser eventualmente reduzidos investindo-se em pesquisa sobre tecnologia alimentar, com o objetivo de modificar a composição e os métodos de alimentação, aumentando a eficiência da utilização de energia e da fermentação no rúmen.

Os sistemas de produção de leite a pasto facilitam o processo de autodepuração do sistema solo – planta pelos microorganismos. Desde que devidamente manejados, esses sistemas promovem a fertilização do solo, melhorando suas propriedades físicas, químicas, e biológicas, e, conseqüentemente, aumentando a produtividade e longevidade das forrageiras por ele ocupadas, por sua própria característica de manejo e de melhor distribuição dos animais e de seus dejetos (fezes e urina) nas áreas de pastagens. Além disso, sistemas intensivos de produção de leite a pasto eliminam a necessidade de custosas instalações para o tratamento de grandes quantidades de resíduos. Finalmente, tais sistemas intensivos a pasto permitem o aumento da eficiência de conversão alimentar, reduzindo a quantidade de metano emitida por unidade de produto (carne, leite, etc.).

Sistemas de produção baseados no confinamento de grande número de animais causam a concentração de grandes volumes de dejetos (fezes, urina e outros resíduos), em pequenas áreas. Tal concentração exige do produtor a adoção de uma tecnologia mais sofisticada de tratamento e disposição dos resíduos, envolvendo problemas de ordem técnica, sanitária e econômica. Normalmente, esses confinamentos situam-se nas proximidades de grandes centros consumidores, locais onde geralmente são observados outros sérios problemas de poluição ambiental. Nesse caso, o tratamento biológico e a reciclagem dos resíduos para a fertilização do solo, evitando a poluição do meio ambiente (solo, lagos e rios), é o caminho mais eficiente para o desenvolvimento de uma agricultura sustentável. A escolha do tipo de tratamento biológico a ser adotado irá depender do manejo do rebanho nas instalações, da quantidade de resíduo gerado e do custo final do tratamento. De acordo com as muitas variáveis presentes, tratamentos aeróbios e/ou anaeróbios com aproveitamento total do metano como fonte alternativa de energia, podem e devem ser adotados, reduzindo significativamente o impacto da atividade pecuária sobre o ambiente. A adoção do tratamento biológico aeróbio de dejetos de bovinos nos sistemas de produção constitui uma tecnologia eficiente de saneamento do meio rural podendo contribuir significativamente para a redução da emissão de metano na atmosfera.

Os estudos de impacto ambiental de projetos agropecuários devem ser orientados no sentido de investigar a alteração de um ou mais componentes da qualidade ambiental, no interior ou no entorno dos animais em sistemas de produção em confinamento, provocados por erros de projeto estrutural e de manejos produtivos.

## Referências

- ASAE. ASAE Data: ASAE D384: manure production and characteristics. *Agricultural Engineering Yearbook Standards*, St. Joseph, p. 436, 1983.
- BARBER, E. M.; HORE, F. R.; RAAD, A.; DURANT, W. C. *Canada animal manure management guide*. Ottawa: Information Services, Agriculture Canada, 1979. 37 p. (Publication, 1534).
- BATH, D. L.; DICKINSON, F. N.; TUCKER, H. A.; APPLEMAN, R. D. *Dairy cattle: principles, practices, problems, profits*. 3. ed. Philadelphia: Lea & Febiger, 1985. 473 p.
- BRAILE, P. M.; CAVALCANTI, J. E. W. A. *Manual de tratamento de águas residuárias*. São Paulo: CETESB, 1993. 764 p.
- BRANCO, S. M. *Ecologia para o 2º grau*. São Paulo: CETESB, 1978. 180 p.
- BRANCO, S. M. *Ecossistêmica: uma abordagem integrada dos problemas do meio ambiente*. São Paulo: Edgard Blücher, 1989. 141 p.
- BRANCO, S. M. *Hidrologia aplicada à engenharia sanitária*. 3. ed. São Paulo: CETESB/ASCETESB, 1986. 640 p.
- BRANCO, S. M. *Poluição: a morte de nossos rios*. 2. ed. São Paulo: ASCETESB, 1983. 155 p.
- BRANCO, S. M.; HESS, M. L. Tratamento de resíduos. In: AQUARONE, E.; BORZANI, W.; LIMA, U. de A. (coord.), *Biotechnology: tópicos de microbiologia industrial*. São Paulo: Edgard Blücher, 1975. v. 2, cap. 3, p. 47-76.
- BRASIL. Tribunal de Contas da União. *Relatório de auditoria operacional na Embrapa*. Brasília, 1991. 210 p.
- BUCKMAN, H. O.; BRADY, N. C. *Natureza e propriedades dos solos*. 2. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1968. 594 p.
- CAMPOS, A. T. de. *Análise da viabilidade da reciclagem de dejetos de bovinos com tratamento biológico, em sistema intensivo de produção de leite*. Botucatu, 1997. 141 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista.

CENTURIÓN, R. E. B.; GUNTHER, M. A. *Tratamento de despejos de laticínios: obtenção de parâmetros de projeto, em escala de laboratório através do uso de reatores biológicos aeróbios*. São Paulo: CETESB, 1976. 35 p. (Trabalho apresentado no XV Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária, 20-25 de junho de 1976, Buenos Aires).

CULP, R. L.; WESNER, G. M.; CULP, G. L. *Handbook of advanced wastewater treatment*. 2. ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1978. 632 p.

DOUGLIS, C. O clima. In: *A aventura do conhecimento*. São Paulo: O Estado de São Paulo/National Geographic Society, 1996. 36 p.

EPA. *International anthropogenic methane emissions: estimates for 1990*, Report to Congress. Washington, DC: Atmospheric Pollution Prevention Division, Office of Radiation, U.S. Environmental Protection Agency, 1994.

FIGUEIREDO, M. da G. *Microbiologia de lodos ativados*. São Paulo: CETESB, 1988. 43 p.

FLORES, M. X.; NASCIMENTO, J. C. *Desenvolvimento sustentável e competitividade na agricultura*. Brasília: EMBRAPA-SEA, 1992. 30 p. (Embrapa-SEA. Documentos, 10)

FOLEY, R. C.; BATH, D. L.; DICKINSON, F. N. D.; TUCKER, H. A. Anatomy and physiology of digestion. In: *Dairy cattle: principles, practices, problems, profits*. Philadelphia: Lea & Febiger, 1973. p. 189-203.

GARCIA-VAQUERO, E. *Projeto e construção de alojamento para animais*. 2. ed. Lisboa: Litexa Portugal, 1981. 237 p.

GIESSMANN, E. *Biologia e técnica de manejo do esterco líquido*. Palmeira: Colônia Witmarsum/Cooperativa Mista Agropecuária Witmarsum, 1981. 12p.

HERMETO BUENO, C. F. Produção e manejo de esterco. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v. 12, n. 135/136, p. 81-85, 1986.

HUNGATE, R. E. *The rumen and its microbes*. New York: Academic Press, 1966.

IMHOFF, K.; IMHOFF, K. R. *Manual de tratamento de águas residuárias*. 26. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1986. 302 p.

KIEHL, E. J. *Fertilizantes orgânicos*. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1985. 492 p.

KIRCHGESSNER, M.; ROTH, F. X.; WINDISH, W. Minimizing of environmental nitrogen and methane emission by animal nutrition. *Ciencia e Investigación Agraria*, Santiago de Chile, v. 20, n. 2, p. 480-504, 1993.

KURIHARA, M.; MAGNER, T.; HUNTER, R. A.; McCRABB, G. J. Methane production and energy partition of cattle in the tropics. *British Journal of Nutrition*, v. 81, p. 227-234, 1999.

LANA, R. P.; RUSSEL, J.B. Effect of forage and monensin on the ruminal fermentation of fistulated cows fed continuously at a constant rate. *Journal of Animal Science*, v. 75, p. 224-229, 1997.

LIMA, L. M. Q. Compostagem. In: *Tratamento de lixo*. São Paulo: Hemus, 1985. Cap. 4, p. 71-116.

LINDLEY, J. A. Anaerobic-aerobic treatment of milking center waste. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v. 22, n. 2, p. 404-408, 1979.

MACFARLANE, G. T.; GIBSON, G. R. Carbohydrate fermentation, energy transduction and gas metabolism in the human large intestine. In: MACKIE, R. I.; WHITE, B. A. (ed.), *Gastrointestinal microbiology*. v. 1. Gastrointestinal ecosystems and fermentations. New York: International Thomson Publishing, 1997. v. 1, p. 269-318.

MENEZES, F. T. A população urbana e a problemática rural. *Balde Branco*, São Paulo, v. 22, n. 270, p. 47, 1987.

METCALF, J.; EDDY, P. *Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse*. 3.ed. New York: McGraw-Hill, 1991. 1334 p.

MIDWEST PLAN SERVICE. *Livestock waste handling facilities*. Ames, Iowa: Iowa State University, 1974. p. 1-45. (MWPS, bulletin no.18).

MORSE, D.; NORDSTEDT, R. A.; HEAD, H. H.; VAN HORN, H. H. Production and characteristics of manure from lactating dairy cows in Florida. *Transactions of The ASAE*, St. Joseph, v. 37, n. 1, p. 275-279, 1994.

NAUFEL, F. O leite, da fonte de produção ao consumidor. In: SIMPÓSIO SOBRE PECUÁRIA LEITEIRA, 3., 1983, Campinas. *Anais...Campinas*: Fundação Cargil, 1984. p. 257.

SILVA, M. O. S. A. *Análises físico-químicas para controle das estações de tratamento de esgotos*. São Paulo: CETESB, 1977. 226 p.

SILVA, P. R. *Lagoas de estabilização para tratamento de resíduos de suínos*. São Carlos, 1973. 76 p. Tese (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SOUZA, T. A revolução orgânica. *Estado de Minas*, Belo Horizonte, 1999. Agropecuário, p. 6-7.

TAIGANIDES, E. P. *Animal wastes*. London: Applied Science Publishers, 1977. 429 p.

VAN HORN, H. H. Recycling manure nutrients to avoid environmental pollution. In: VAN HORN, H.H.; WILCOX, C.J. ed. *Large dairy herd management*. Champaign: ADSA, 1992. cap. 65, p. 640-654.

VAN SOEST, P. J. *Nutritional ecology of the ruminant*. 2. ed. Ithaca: Cornell University Press, 1994. 476 p.

VILELA, D.; GOMES, S.T.; CALEGAR, G. M. Agronegócio leite e derivados: um programa nacional em C&T. In: CALDAS, R. de A. et al. (ed.), *Agronegócio brasileiro: ciência, tecnologia e competitividade*. Brasília: CNPq, 1998. p. 257-275.

VON SPERLING, M. Critérios de dados para uma seleção preliminar de tratamento de resíduos de esgotos. *Revista Bio*, São Paulo, v. 3, n. 1, p. 7-21, 1994.

## Possibilidades de Uso de Dejetos Animais no Meio Rural

JORGE DE LUCAS JÚNIOR, TÂNIA MARA BAPTISTA DOS SANTOS,

ROBERTO ALVES DE OLIVEIRA

*Departamento de Engenharia Rural - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Jaboticabal, SP, Brasil*

**Resumo.** *A produção animal moderna apresenta grande potencial poluente, incrementando a excreção de elementos impactantes (principalmente fósforo e nitrogênio), e emissão de gases nocivos, que além de maus odores trazem problemas de saúde às pessoas e animais e colaboram para o aquecimento global da Terra. Existem vários destinos para a grande quantidade de resíduos gerada no meio rural, os quais visam não apenas controlar a poluição do meio, mas também podem promover retorno econômico com a adequada disposição do resíduo, seja para o aproveitamento no próprio setor como forma de energia, fertilizante ou alimento alternativo para animais, ou ainda na comercialização. O direcionamento para cada uma dessas situações depende de uma série de fatores, sendo que o manejo adotado, quando bem conduzido, permite o aproveitamento quase que integral dos dejetos dentro das condições estabelecidas em cada propriedade, podendo se tomado dois caminhos: o da reciclagem (energética e/ou orgânica e de nutrientes), ou do tratamento. Considera-se que ao se fazer reciclagem tem-se como meta a conversão do resíduo em algo útil economicamente e, ao se adotar apenas o tratamento o que se busca é colocá-lo em condições de disposição no ambiente, com o menor impacto possível.*

### Possible Use of Animal Waste in Rural Areas

**Abstract.** *Modern animal production systems have a considerable pollution potential resulting from the excretion of chemical elements (mainly phosphorus and nitrogen) and gas emissions. In addition to bad odours, these gases can cause health problems to people and animals and add their share to global warming. There are several ways*

*of disposing of animal wastes in rural areas, when seeking both to control environment pollution and to generate an economic return through appropriate disposal of residues. Examples of waste disposal methods at the farm level include using wastes to generate energy, as fertiliser or alternative feedstuff, and for generating revenue. Several factors must be taken into account when selecting the most appropriate disposal method. For example, appropriate manure handling practices enable farmers to use almost any type of animal waste within the prevailing farm conditions. Manure can be either recycled (for energy, organic matter, or nutrients) or treated. As a rule, the purpose of recycling is to convert the waste into an economically useful product. The purpose of treatment, on the other hand, is to facilitate disposal of the waste into the environment, with the least possible impact.*

## **Introdução**

Considerando a produção animal moderna como um processo de transformação biológica que apresenta “entradas” (animais, alimento, água, ar de ventilação e, em muitas situações, energia para equipamentos e controle climático) e “saídas” (animais, ovos, leite, lã, ar de ventilação e dejetos), observa-se que especificamente o ar de ventilação e os dejetos afetam adversamente o ambiente, principalmente se for considerada a intensificação das criações em determinadas regiões e o aumento na densidade populacional dos animais.

Além das quantidades de dejetos geradas nas atividades animais, as características desses dejetos trazem importantes informações quanto ao seu potencial poluente. Ressalta-se a importância do manejo nutricional, uma vez que este fator interferirá diretamente na composição das excretas, determinando a maior ou menor quantidade de elementos impactantes depositados no ambiente.

Neste sentido, já se observa entre os pesquisadores da área de nutrição animal preocupação com a relação nutriente ingerido e excretado, buscando a diminuição de excreção de elementos impactantes através de melhora na digestibilidade, disponibilidade e absorção de nutrientes no trato digestivo dos animais. Esse manejo é conhecido como “controle biológico dos poluentes” (Headon & Walsh, 1994; Lima, 1996), e vem sendo estudado principalmente em suínos e aves.

Fischer (1997) questiona a eficiência de conversão dos nutrientes para produtos de origem animal e a importância ecológica da perda de nutrientes durante a produção de carne; segundo o autor os fatores mais importantes são os requerimentos para manutenção dos animais, a incompleta digestibilidade e o baixo valor biológico dos componentes dos alimentos. Nutrientes não utilizados para crescimento são eliminados, principalmente, em formas quimicamente diferentes, nas fezes, urina e gases de fermentação.

### **Decomposição de Dejetos Orgânicos da Produção Animal e seus Produtos Gasosos**

A composição e características dos dejetos animais são influenciadas, entre outros fatores pela espécie e idade do animal, dieta, método de manejo e coleta dos resíduos, condições climáticas, época do ano, uso de cama e outros. De maneira geral, pode-se considerar que os dejetos de animais são compostos predominantemente por matéria orgânica (70% a 85%). Os materiais remanescentes nos dejetos podem ser classificados como: polissacarídeos, proteínas, compostos nitrogenados não protéicos, lipídeos, ácidos graxos voláteis e sais. Nesses compostos os microorganismos podem desenvolver-se encontrando todas suas necessidades para crescimento. Conseqüentemente, os dejetos da produção animal apresentam-se com características favoráveis à adoção de alternativas de tratamento biológico (Oliveira, 1998).

De acordo com o tipo de manejo adotado para os dejetos na produção animal, eles poderão apresentar-se na forma sólida, semi-sólida ou líquida (água residuária) (Oliveira, 1998).

Nos sistemas de tratamento biológico, assim como quando dispostos diretamente no solo ou nos cursos da água, os dejetos serão submetidos aos processos microbiológicos e bioquímicos de decomposição, com os microorganismos heterotróficos utilizando a matéria orgânica presente como fonte de carbono e energia (quimioheterotróficos) ou somente como fonte de carbono (fotoheterotróficos) (Oliveira, 1998).

Como o objetivo principal na maior parte dos sistemas de tratamento biológico é a redução do conteúdo de matéria orgânica (fração carbonácea) dos resíduos, os microorganismos quimioheterotróficos têm importância primária

porque utilizam os compostos orgânicos como fonte de carbono e energia (Metcalf & Eddy, 1991).

Os produtos intermediários e finais da decomposição dos dejetos estarão relacionados com o tipo de matéria orgânica presente, microorganismos envolvidos na sua degradação e natureza do metabolismo microbiano, baseado na sua necessidade de oxigênio molecular. Os microorganismos quimioheterotróficos apresentam metabolismo respiratório quando geram energia através do transporte de elétrons, mediado por enzimas, a partir de um doador de elétrons para um aceptor externo de elétrons. Quando o oxigênio molecular é usado como aceptor final de elétrons tem-se a respiração aeróbia. Os microorganismos que são dependentes da respiração aeróbia para suprir suas necessidades energéticas, somente podem existir quando se tem a presença de oxigênio molecular no meio, e são denominados “aeróbios obrigatórios” (Metcalf & Eddy, 1991).

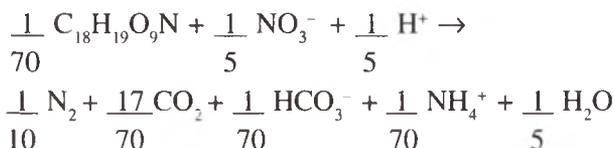
A composição química aproximada da matéria orgânica encontrada em águas residuárias tem sido:  $C_{18}H_{19}O_9N$ . Em condições aeróbias esta matéria orgânica será oxidada por microorganismos, podendo o processo ser representado pelas duas expressões seguintes, segundo Henze et al. (1997):



Dessa forma, pode-se considerar que o principal produto gasoso dos sistemas de tratamento aeróbio será o dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Para águas residuárias com altas concentrações de matéria orgânica nitrogenada e em determinadas condições físico-químicas do meio poderá ocorrer a liberação de amônia ( $NH_3$ ) (Oliveira, 1998).

Em ambientes anaeróbios (ausência de oxigênio molecular), compostos orgânicos oxidados, tais como nitrato e nitrito, poderão ser utilizados como aceptores finais de elétrons por alguns microorganismos com metabolismo respiratório (Metcalf & Eddy, 1991). Esse processo é denominado desnitrificação e a maior parte dos microorganismos envolvidos são “facultativos”, ou seja, tem a habilidade de alterar seu metabolismo com a utilização do oxigênio molecular como aceptor final de elétrons para a utilização do nitrato (Henze et al., 1997). Na engenharia ambiental, os processos que utilizam esses microorganismos são chamados de “anóxicos” (Metcalf & Eddy, 1991).

Para as bactérias desnitrificantes que utilizam a matéria orgânica das águas residuárias como fonte de energia e carbono, o processo pode ser descrito pela seguinte expressão (Henze et al., 1997):



Os principais produtos gasosos dos sistemas de tratamento anóxicos serão o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e o nitrogênio atmosférico ( $\text{N}_2$ ). Os produtos intermediários da desnitrificação são todos tóxicos ou indesejáveis, sendo eles o nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), o óxido nítrico (NO) e o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), produzidos nesta seqüência (Henze et al., 1997):



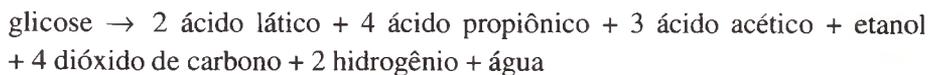
Ao contrário do metabolismo respiratório, o metabolismo fermentativo não envolve a participação de um acceptor de elétrons externo, e sim o composto orgânico é utilizado como acceptor final de elétrons. Os microorganismos que obtêm energia por meio da fermentação e que podem sobreviver somente em ambientes sem oxigênio são denominados “anaeróbios estritos”. Os “microorganismos anaeróbios facultativos” têm a capacidade de crescer em ambientes com presença ou ausência de oxigênio molecular. Os microorganismos facultativos são divididos em dois subgrupos, baseado nas suas possibilidades metabólicas. Os microorganismos anaeróbios facultativos verdadeiros podem mudar do metabolismo fermentativo para respiratório aeróbio, dependendo da presença ou ausência de oxigênio molecular. Os microorganismos anaeróbios aerotolerantes têm estritamente o metabolismo fermentativo mas são, relativamente, insensíveis a presença de oxigênio molecular (Metcalf & Eddy, 1991).

Alguns produtos finais altamente reduzidos são produzidos na fermentação e excretados para o meio externo adjacente, cada um com característica particular, dependendo do microorganismo envolvido. Muitos desses compostos têm odor objetável. Deste modo, caso um dejetos receba oxigenação inadequada, então os microrganismos facultativos presentes serão forçados a utilizarem-se do catabolismo fermentativo (Oliveira, 1998).

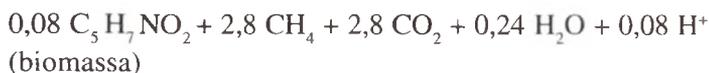
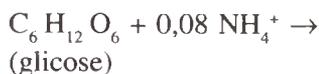
Um grupo de bactérias conhecido como “metanogênicas” são capazes de acoplar a oxidação desses compostos com a redução de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) para metano ( $\text{CH}_4$ ), em um processo conhecido como “digestão anaeróbia”. As bactérias metanogênicas são exigentes e somente proliferam-se em condições controladas. A fermentação na ausência de bactérias metanogênicas é, freqüentemente, chamada de putrefação (Oliveira, 1998).

Em virtude da fermentação “encerrar-se” com a excreção de produtos finais altamente reduzidos, a energia ainda remanescente nesses compostos é perdida pelos microorganismos. Deste modo, a fermentação é um processo muito ineficiente energeticamente para o microorganismo quando comparado com a respiração (Oliveira, 1998).

Nesse contexto, os “processos anaeróbios” são definidos como processos onde nenhum oxigênio ou nitrato está presente. Esses processos são executados por um grande e variado grupo de microorganismos, os quais, normalmente, vivem em relações sintróficas. O processo de degradação anaeróbia de compostos orgânicos pode ser dividido em quatro fases (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese). Três fases são biológicas enquanto a hidrólise é enzimática. O substrato para a produção dos ácidos acético, butírico e propiônico são os carboidratos, proteínas e lipídeos. O ácido acético proveniente da acidogênese e acetogênese é o principal substrato para a produção de metano (metanogênese). O dióxido de carbono e hidrogênio produzidos no processo também são substratos para a metanogênese. Um esquema simplificado das reações, a partir de uma molécula de glicose, pode ser observado no esquema seguinte (Henze et al., 1997; Oliveira, 1998):



Os gases produzidos no processo anaeróbio são metano, dióxido de carbono e hidrogênio. Caso, por exemplo, seja considerada a constante de rendimento total de 0,08 mol de biomassa/mol de glicose, a seguinte expressão pode ser utilizada para a degradação anaeróbia de uma molécula de glicose (Henze et al., 1997):



O gás produzido nos sistemas anaeróbicos de tratamento pode conter também nitrogênio gasoso ( $N_2$ ) e sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ) (Henze et al., 1997).

## Geração de Gases nas Instalações para Animais

Nos sistemas de confinamento total, os gases produzidos podem provocar danos à comunidade através da emissão de maus odores e problemas de saúde a pessoas e animais. Embora os maus odores por si só não possam provocar doenças, podem gerar certo desconforto e a inalação de grandes concentrações de gases nocivos, emitidos pelo esterco animal, pode causar toxidades, problemas respiratórios e até mesmo a morte de pessoas e animais; nos equipamentos podem causar corrosão.

Os principais gases nocivos existentes em torno dos sistemas de confinamento são: amônia, sulfeto de hidrogênio, dióxido de carbono e metano. Os odores são produzidos pela amônia, sulfeto de hidrogênio e por inúmeros compostos orgânicos intermediários, resultantes da decomposição biológica da matéria orgânica (Oliveira, 1993). Na Tabela 1 são mostradas algumas propriedades dos gases mais abundantes em instalações zootécnicas. Um manejo correto dos dejetos pode evitar a concentração, promovendo a dispersão desses gases tóxicos.

**Tabela 1** - Propriedades dos principais gases provenientes de esterco

Gás	Peso em relação ao ar = 1	Efeito fisiológico	Outras propriedades
Metano ( $CH_4$ )	1/2	Anestésico	Inodoro, explosivo
Amônia ( $NH_3$ )	2/3	Irritante	Forte odor, corrosivo
Sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ )	1 +	Venenoso	Corrosivo
Dióxido de carbono ( $CO_2$ )	1 1/3	Asfixiante	Inodoro, corrosivo

Fonte: Midwest Plan Service, 1968 citado por Ensminger et al. (1990)

A amônia é um gás incolor, irritante, produzido a partir de fração nitrogenada de resíduos animais pela atividade microbiana. Esse gás atua principalmente como irritante. Ela é detectável por humanos à uma concentração de 25 ppm ou mais, enquanto a concentração máxima que um humano pode suportar é 100 ppm por oito horas (Moun et al., 1969, citados por Carlile 1984).

A produção de aves e suínos é considerada a maior contribuinte na emissão de amônia para a atmosfera. A formação de amônia ocorre devido à decomposição de vários constituintes nitrogenados presentes no esterco e pela ação das bactérias. A formação e liberação da amônia está estritamente relacionada ao tipo de material e qualidade da cama, instalações e equipamentos (ventilação etc), estação do ano, entre outros. A presença de poeira é um forte fator agravante, pois a amônia é absorvida pela poeira e pode ser inalada chegando até o pulmão, interrompendo a função primária dos pulmões, isto é a absorção de oxigênio (Ammonia, 1992).

Outro importante aspecto do impacto causado pela produção animal sobre o meio ambiente relaciona-se ao potencial de emissão de metano para a atmosfera. As emissões de metano a partir de sistemas de produção animal não representam um problema de controle de odor e sim relacionam-se com a contribuição para o aquecimento global da Terra (Environmental Protection Agency, 1989; Johnson et al., 1992 e Waggoner et al. 1992, citados por Van Horn et al., 1994).

## **Estruturas Destinadas ao Armazenamento e Transformação dos Dejetos**

Existem vários destinos para a grande quantidade de resíduos gerada no meio rural, os quais visam não apenas controlar a poluição do meio ambiente mas também obtenção de retorno econômico com a disposição do resíduo, seja para o aproveitamento no próprio setor como forma de energia, fertilizante ou alimento alternativo, ou ainda na comercialização.

Os dejetos representam ao mesmo tempo um elevado potencial de poluição, bem como uma alternativa energética, fertilizante e também alimentar para outras espécies. O direcionamento para cada uma dessas situações depende de uma série de fatores, sendo que o manejo adotado, quando bem conduzido,

permite o aproveitamento quase que integral dos dejetos dentro das condições estabelecidas em cada propriedade.

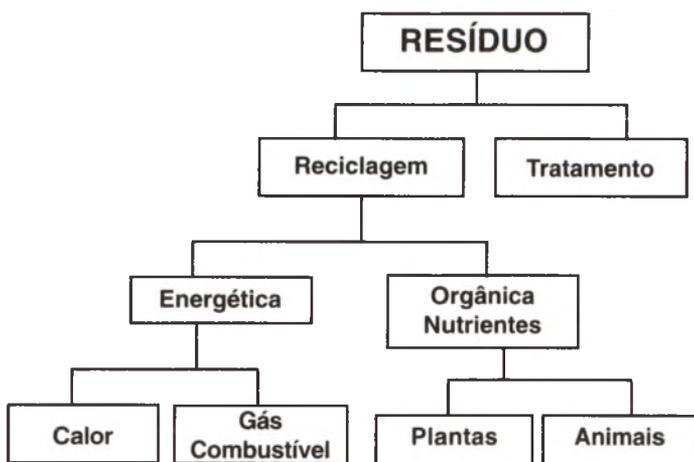
No planejamento e implantação de novas instalações no meio rural, devem ser considerados aspectos relativos ao destino dos efluentes que serão gerados no empreendimento. Não bastando apenas isto, as atividades que se encontram em funcionamento devem também ser analisadas quanto aos procedimentos adotados para o manejo das dejeções. Deve-se salientar que a geração de efluentes é bastante variável nas explorações de algumas espécies dependendo principalmente dos manejos dos animais, dos alimentos, e sanitário, adotados em cada propriedade. Em outras atividades, como avicultura de corte, a geração de resíduos acontece de forma mais homogênea, uma vez que os manejos são mais padronizados independentemente das condições da propriedade.

Em qualquer situação, deverá ser adotado como procedimento inicial uma avaliação quantitativa e, em seguida, qualitativa do resíduo gerado. A este respeito, mesmo com a literatura mostrando-se rica em informações, deve-se dar preferência à avaliações *in loco*, uma vez que o manejo, principalmente na higienização, poderá impor características quanti-qualitativas muito diferentes, mesmo se considerarmos a mesma espécie e categoria animal. Em seguida à caracterização quanti-qualitativa será planejado o sistema de manejo de resíduos.

Para Paula Jr. (1995) a natureza tem condições de promover o “tratamento” dos resíduos, desde que não ocorra sobrecarga e que haja boas condições ambientais que permitam a evolução, reprodução e crescimento de organismos que decompõem a matéria orgânica. A disposição de resíduos no solo ou em corpos receptores naturais, como lagoas, rios, oceanos etc., é uma alternativa que foi e ainda é, empregada de forma muito intensa. Dependendo da carga orgânica que se lança, os resíduos provocam total degradação do ambiente (solo, água e ar), ou o meio demonstra ter condições de receber e de decompor os poluentes até um nível que não causa problemas, ou alterações acentuadas, que prejudiquem o ecossistema local e circunvizinho. Resta a dúvida quanto ao aspecto da emissão de gases, mesmo em um sistema de manejo tecnicamente favorável às condições do solo e água.

Como as atividades agropecuárias modernas são bastante tecnificadas, mantendo os animais em alto grau de confinamento e densidade e são geralmente concentradas em certas regiões, torna-se difícil a disposição de todos os dejetos via solo sem um tratamento prévio, indicando que a melhor e mais racional

alternativa se encontra nos sistemas que permitem a transformação dos dejetos, podendo-se para isto considerar-se as possibilidades apresentadas na Figura 1, a qual indica que a partir de determinado resíduo pode-se tomar dois caminhos: o da “reciclagem” do resíduo, ou do “tratamento”. Embora estes dois procedimentos possam se confundir, considera-se que ao se fazer reciclagem tem-se como meta a conversão do resíduo em algo útil e, ao se adotar apenas o tratamento do resíduo o que se busca é colocá-lo em condições de disposição no ambiente, com o menor impacto possível.



**Figura 1** - Possibilidades de conversão de resíduos animais

De um modo geral, a reciclagem dos efluentes no meio rural, pode ser feita com o objetivo de reciclagem em energia, ou reciclagem orgânica e de nutrientes.

### *Reciclagem Energética*

A reciclagem energética de resíduos objetiva a geração de calor ou de gás combustível. Os métodos de transformação de energia, a partir da biomassa, segundo Hobson et al. (1981), classificam-se em duas categorias: aqueles que

envolvem processos físicos e químicos a altas temperaturas e/ou pressões, e aqueles que envolvem o uso de microrganismos a temperaturas e pressões mais baixas. Embora, em alguns casos, o processo químico é precedido de uma atividade microbiológica.

A conversão de matéria orgânica em energia pode ser consumada através de vários processos, dependendo do material e da forma desejada de energia. Entretanto, a digestão anaeróbia provavelmente é o processo mais viável para conversão de esterco em energia, e em alguns casos, além da digestão anaeróbia, a combustão direta é outra alternativa viável.

A geração do calor através da queima direta é uma opção, porém deve-se considerar a emissão de gases na atmosfera como um fator de impacto ao meio ambiente. Com relação à queima direta de resíduos, pode-se exemplificar com trabalho de Dagnall (1993), no qual cita-se que uma alternativa ambientalmente aceitável para a disposição da cama de frangos seria a combustão para fornecer energia para aquecimento das instalações e sistemas de grande escala envolvendo geração de potência ou combinação de aquecimento e geração de potência. Ressalta-se que, com a queima direta dos resíduos, pode-se obter a emissão de gases de forma concentrada e em curto espaço de tempo para a atmosfera.

No tocante à conversão em gás combustível, o caminho mais adotado ultimamente diz respeito ao processo de biodigestão anaeróbia. A digestão anaeróbia auxilia nas reduções de patógenos e dos componentes orgânicos e, conseqüentemente, da poluição ambiental, reduzindo os odores e presença de insetos em relação ao manejo convencional dos dejetos em outros sistemas, bem como representa uma fonte de bioenergia. Diversos modelos de biodigestores são apropriados ao meio rural, os quais variam desde muito simples, como o modelo *Batelada* que, apesar da simplicidade, pode ser útil em situações em que o resíduo é obtido periodicamente, como é o caso da cama obtida nos galpões de frangos de corte, até modelos mais complexos como os de *Fluxo Ascendente com Leito de Lodo*, aplicados em águas residuárias. Este modelo, proposto por Lettinga et al. (1980), é conhecido como UASB ou *Fluxo Ascendente com Leito de Lodo*, com aplicações em nosso país em indústrias, destilarias e estudos relacionados ao tratamento de águas residuárias de suinocultura. Quando a disponibilidade dos resíduos semi-sólidos for diária, o interesse volta-se para os biodigestores contínuos como os modelos Indiano e

Chinês. Tecnologias como sistemas de agitação, aquecimento, pré-fermentação etc., podem ser associadas a estes biodigestores, porém, deve-se analisar com rigor os custos. A utilização de biodigestores traz como vantagem o controle na emissão de gases, como o metano, pois o processo se desenvolve em um meio fechado, com recuperação dos gases, dos quais, após a queima, resultarão principalmente no dióxido de carbono e vapor d'água.

### *Reciclagem Orgânica e de Nutrientes*

A reciclagem orgânica e de nutrientes pode ser feita com objetivo de conversão do resíduo em plantas (condicionamento e fertilização do solo), ou a conversão em animais (uso de resíduos na alimentação animal).

Antes de ser reciclado em plantas ou em animais, o resíduo pode ser processado com o objetivo de separação das fases líquida e sólida, podendo-se adotar técnicas de decantação, peneiramento, centrifugação, separação química ou desidratação, além de serem feitas análises nutricionais (químico-mineral) e microbiológicas.

Para a conversão em plantas, a alternativa é a disposição no solo, sendo que o resíduo deverá sofrer previamente um processamento em sistema adequado. Para tanto, ressaltam-se técnicas como compostagem, vermicompostagem, além do uso de diversos tipos de esterqueiras, bioesterqueiras e biodigestores descritos na literatura, embora ainda, na maioria das situações a disposição final dos resíduos seja feita de forma direta no solo sem qualquer tratamento.

Deve-se considerar que a escolha da técnica a ser empregada na estabilização da matéria orgânica, visando a reciclagem, poderá ser feita com base na possibilidade de minimizar-se a emissão de alguns gases favorecendo-se outros. Como exemplo, no caso da escolha de técnicas que se valem da estabilização aeróbia (compostagem e vermicompostagem), há predominância da emissão de  $\text{CO}_2$ . Com o uso de esterqueiras e bioesterqueiras, o controle na emissão de gases será menor, pois ocorrerão simultaneamente degradações anaeróbias e aeróbias (como no caso das lagoas), com emissões predominantes de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ , além de gases nitrogenados, dependendo da composição do resíduo. Se a opção for pelo uso dos biodigestores, haverá predominância de gás metano, porém, com a queima do biogás gerado, a emissão será quase que totalmente de  $\text{CO}_2$  e vapor d'água.

**Compostagem e vermicompostagem:** O processo de compostagem consiste na oxidação biológica, exotérmica, do material orgânico, efetuada por uma sucessão rápida e dinâmica de populações de microrganismos aeróbios. A matéria orgânica heterogênea do material inicial é transformada, após um período adequado de compostagem que inclui as fases bio-oxidativas e de maturação, em um produto final estabilizado, através da mineralização parcial e humificação (Gray et al., 1971 e Viel et al., 1987, citados por Alves, 1998). A humificação é um processo bioquímico no qual substâncias de baixo peso molecular, após degradação microbiana, formam colóides amorfos de coloração marrom escura, alto peso molecular e grande estabilidade a ataques microbianos. Os produtos formados são conhecidos genericamente por húmus (Stevenson, 1982, citado por Alves, 1998). A vermicompostagem é o termo utilizado para o processo no qual minhocas são empregadas na degradação biológica e humificação da matéria orgânica. O vermicomposto é o resultado da ação combinada de minhocas e da microflora que vive em seus intestinos.

**Esterqueiras e bioesterqueiras:** A esterqueira é um depósito que tem por objetivo captar o volume de dejetos líquidos produzidos em um sistema de criação para um período de tempo definido entre 4 a 6 meses. A carga de abastecimento é diária, permanecendo o material em fermentação na esterqueira até a retirada que é executada de uma única vez. A bioesterqueira diferencia-se da esterqueira por possuir uma câmara de fermentação e um depósito de material digerido. Surgiu a partir dos biodigestores, pois a câmara de fermentação é semelhante a um biodigestor, porém, sem o gasômetro. O tempo de permanência dos dejetos na câmara de fermentação deve obedecer um período mínimo de 45 dias. Existem alguns modelos adaptados para a utilização de resíduos sólidos e semi-sólidos, promovendo processo semelhante à compostagem.

**Uso como alimento animal:** A utilização de resíduos na alimentação de animais pode reduzir o impacto ambiental e também promover redução de custos na alimentação. Pode-se considerar que alguns resíduos já são utilizados em larga escala, como exemplo o uso da cama de frangos na alimentação de bovinos, dejetos de suínos na alimentação de peixes e bovinos, além de tentativas de utilização de dejetos de bovinos na alimentação de suínos e até mesmo uso de dejetos de determinada espécie para a mesma espécie (dejetos de suínos na alimentação de suínos, poedeiras para frango de corte; frango de corte para

poedeiras etc.). Porém, cabe um alerta relativo ao uso indiscriminado de dejetos na alimentação de animais, pois via de regra não se faz um controle das quantidades oferecidas aos animais, dos riscos sanitários e da qualidade do produto obtido.

### *Tratamento de Dejetos no Meio Rural*

Em sistemas de tratamento de resíduos, o objetivo é de otimizar processos e minimizar custos, de forma a se conseguir a maior eficiência possível, respeitando-se as restrições que se impõem pela proteção do corpo receptor e pelas limitações de recursos disponíveis. Nesses sistemas procura-se, geralmente, reduzir o tempo de retenção hidráulica e aumentar a eficiência das reações bioquímicas, de maneira a se obter um determinado nível de redução de carga orgânica, em tempo e espaço muito inferiores aos que ocorreriam no ambiente natural (Paula Jr., 1995).

Como principais sistemas aplicáveis ao meio rural citam-se os filtros biológicos, os lodos ativados e as lagoas de estabilização.

**Lagoas de estabilização:** As lagoas podem ser definidas como um corpo de água lântico, construído pelo homem, e destinado a armazenar resíduos líquidos de natureza orgânica (esgoto sanitário bruto e sedimentado, despejos industriais orgânicos e oxidáveis ou águas residuárias oxidadas). Seu tratamento é feito através de processos naturais: físicos, biológicos e bioquímicos, denominados “autodepuração” ou “estabilização”. Esses processos naturais sob condições parcialmente controladas, são os responsáveis pela transformação de compostos orgânicos minerais ou orgânicos mais estáveis (Uehara, 1989).

### **Produção e Características dos Dejetos e Possibilidades de Transformação para as Principais Espécies Animais**

Serão apresentados neste item dados que refletem o potencial de produção de dejetos para as principais espécies animais de criação, bem como indicados caminhos para a reciclagem, em função das características e manejos dos dejetos e animais.

### *Bovinocultura*

Os dejetos de bovinos leiteiros podem conter material de forração do piso (cama), tais como palhas, raspas de madeiras e areia, sendo que este último dificulta qualquer que seja o manejo de dejetos adotado. A geração de dejetos por bovinos leiteiros é altamente dependente do consumo de alimentos, que por sua vez se relaciona à produção diária de leite. Van Horn et al. (1994) estima para vacas holandesas, consumindo em média 18,7 kg de matéria seca (MS)/dia e produzindo em torno de 22 kg de leite/dia, geram diariamente 62,48 kg de fezes + urina. De maneira geral, a quantidade de dejetos produzidos por bovinos de corte é inferior à quantidade produzida por bovinos de leite, principalmente quando se toma como base animais em pastejo, sistema predominante no Brasil. Segundo Ensminger et al. (1990), bovinos de corte excretam 24 kg dejetos/dia. A bovinocultura de leite, por exigir um manejo diário geralmente em instalações, acumula grandes quantidades de dejetos, sendo considerada, por unidade animal ou de área, mais impactante que a bovinocultura de corte.

Os dejetos de bovinos apresentam maior variação qualitativa do que os dejetos de aves e suínos, em função da maior variação em termos nutricionais e de manejo a que estes animais são submetidos, porém, pela quantidade de estrume e pela facilidade de coleta, principalmente na bovinocultura leiteira, tornam-se muito importantes em termos de aproveitamento energético (processo de biodigestão anaeróbia) e de reciclagem de nutrientes (aplicação direta no solo ou compostagem prévia).

O potencial de produção de biogás a partir do estrume dos bovinos deve sofrer variações em função da qualidade nutricional dos alimentos fornecidos aos animais, esperando-se diferenças entre estrumes coletados a partir de animais que são mantidos a pasto em relação ao de animais que recebem alguma suplementação alimentar, principalmente, se for de alimento concentrado. Os potenciais médios de produção de biogás para bovinos leiteiros e de corte são, respectivamente 0,049 e 0,035 m<sup>3</sup> de biogás por kg/dejeto (Lucas Jr., 1987).

### *Suinocultura*

A produção total de dejetos em granjas de suínos é muito variável, dependendo principalmente do manejo de limpeza adotado em cada granja, determinando a maior ou menor quantidade de água utilizada. De qualquer forma a água estará sempre presente, diluindo e fazendo parte na geração de resíduo final, o que dá aos dejetos de suínos a característica de efluente líquido. De acordo com Ensminger et al. (1990), quando comparado com bovinos e considerando a mesma base (450 kg de peso vivo), os suínos excretam 1,9 vezes mais dejetos que um bovino de corte e 1,3 vezes mais que um bovino leiteiro (aproximadamente 16 ton/ano).

A suinocultura no Brasil apresenta grande potencial de geração de resíduos, os quais, dependendo da forma como são coletados, podem apresentar-se com características de semi-sólidos podendo a utilização se proceder em biodigestores contínuos dos tipos indiano, chinês ou similares. Porém, com a maior utilização de água nos processos de limpeza, os dejetos tornam-se águas residuárias, aumentando a importância em se utilizar sistemas de tratamento destas águas (lagoas de estabilização, esterqueiras, bioesterqueiras, biodigestor de fluxo ascendente). O interesse no aproveitamento dos resíduos orgânicos gerados nas suinoculturas tem aumentado, não somente pelos aspectos de reciclagem de nutrientes no próprio meio e de saneamento, como também pelo aproveitamento energético do biogás. A suinocultura apresenta um potencial médio de produção de biogás de 0,1064 m<sup>3</sup> de biogás por kg de dejetos (biodigestor contínuo com tempo de retenção hidráulica de 30 dias, Lucas Jr.1994).

### *Avicultura*

Na avicultura há dois tipos de resíduos: camas e esterco. A cama é o material usado como base para frangos de corte e/ou matrizes e podem ser de casca de arroz, casca de amendoim, palhas e rapas de madeiras, além das excretas a cama final apresenta penas e ração. Levando-se em conta fatores como desperdício de ração e água, duração do ciclo, tipo e quantidade de material, queda de penas etc., a produção total de cama de frangos pode chegar a 2 kg de matéria natural/ave. O esterco é oriundo de aves de postura criadas em

gaiolas, contendo também restos de ração, ovos quebrados, penas e outros materiais que possam ali cair. Uma galinha consome cerca de 110 g de ração por dia, ou seja, 40.150 g de ração por ano. Considerando-se que a ave excreta cerca de 30% (em matéria seca) do que consome, tem-se uma produção de 12 kg de matéria seca de dejetos/poedeira.ano.

Os resíduos avícolas podem ser reciclados de diferentes formas: como fertilizante (aplicação direta no solo ou compostagem prévia), como alimento para ruminantes, e aproveitamento energético (combustão direta ou sofrendo processo de biodigestão anaeróbia). Na avicultura, os potenciais energéticos dos resíduos não podem ser desconsiderados, principalmente, por tratar de atividade com alto consumo energético (Dagnall, 1993). A conversão desses resíduos em combustível pode apresentar-se como vantajosa principalmente se forem considerados o custo da energia elétrica e a instabilidade de preços e de oferta do gás liquefeito de petróleo (GLP).

Quanto ao potencial de produção de biogás dos resíduos da avicultura, são observadas variações para o mesmo tipo de resíduo, pois o potencial está diretamente relacionado às características do estrume das aves, que dependem fundamentalmente de fatores intrínsecos ao animal como: tipo de ração, estação do ano, tipo de cama e outros. Para obtenção do potencial do resíduo, devem ser levados em conta também outros aspectos importantes como o projeto e manejo do biodigestor. Para as condições da avicultura de corte (cama de maravalha) e postura no Brasil tem-se os potenciais médios de 0,1576, 0,1200 e 0,049 m<sup>3</sup> de biogás por kg de dejetos de frangos de corte, poedeiras e codornas, respectivamente (Santos & Lucas Jr., 1997; Caetano, 1991; Lucas Jr. et al., 1997).

## **Considerações Finais**

Como inevitável consequência da forma como os animais vêm sendo produzidos e a alteração nos padrões de consumo, são observadas transformações que levam à obtenção de grandes quantidades de resíduos em áreas cada vez menores, implicando que as atividades mais intensificadas são vistas como tendo maior potencial de impacto ambiental. A extensão dos efeitos das diferentes espécies se altera e a velocidade na qual as mudanças podem

ocorrer sugerem a necessidade de se estudar a magnitude e os detalhes do impacto das várias espécies particularmente importantes em cada região.

Para que a produção animal possa expandir-se de forma a atender à demanda humana minimizando-se o impacto ambiental, novos sistemas de manejo de dejetos devem ser desenvolvidos e adotados pelos produtores e agroindústria.

A aceitação voluntária de diretivas de cunho ambiental deverá se iniciar com atitudes tomadas na indústria e pelos produtores, dos quais será exigida capacitação para a adoção de procedimentos de manejo que apresentem efeito direto na manutenção e/ou melhoria da qualidade de águas subterrâneas e de superfície, tanto quanto da saúde humana e animal. Os produtores devem planejar e suas operações e manejar os animais, alimentos e dejetos de maneira segura para o ambiente. Segundo Blake (1996) um plano de manejo de dejetos inclui a produção, coleta, armazenamento, tratamento, transferência e utilização de dejetos animais de maneira a não degradar o solo, água e ar ou adversamente afetar as plantas e animais.

A necessidade de planejamento ambiental é algo aceito hoje em dia no meio empresarial urbano e está atingindo o meio rural. Neste sentido o profissional que atua na área de produção animal deverá se capacitar para planejar o uso de recursos naturais e situar as atividades, tanto na propriedade rural como na região, em pontos que a capacidade suporte seja suficiente para a atividade. Isto exige controle dos efluentes emitidos: adequação das instalações, sistemas de reciclagem e/ou tratamento e, em muitas situações, integração de atividades. Além do planejamento, especial atenção deve ser dada à operação dos sistemas de manejo de dejetos, pois é comum encontrarmos sistemas que operam em péssimas condições ou até paralisados, não contribuindo em nada para a melhoria de qualidade ambiental.

É importante enfatizar que o manejo de dejetos se faz necessário não só nos grandes setores agropecuários, como também nas pequenas propriedades, pois em muitas delas a falta de estrutura para reter e tratar os dejetos transforma um problema de gerenciamento particular em um grande problema ambiental, afetando a todos diretamente.

## Referências

ALVES, W.L. *Compostagem e vermicompostagem no tratamento do lixo urbano*. Jaboticabal: Funep, 1998. 53 p.

AMMONIA causes more than acid rain alone! *Pigs-Misset*, p. 31, 1992.

BLAKE, J.P. Dejetos da indústria avícola: o que deve ser feito para preservar o meio ambiente? In: CONFERÊNCIA APINCO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS AVÍCOLAS, 1996, Curitiba-PR. *Anais...* Curitiba, 1996. p. 92-98.

CAETANO, L. *Metodologia para estimativa da produção contínua de biogás em biodigestores modelo indiano*. Botucatu, 1991, 112 p. Tese (Doutorado - Energia na Agricultura). FCA/UNESP.

CARLILE, F.S. Ammonia in poultry houses: a literature review. *World's Poultry Science Journal*, v. 40, n. 2, p. 99-113, 1984.

DAGNALL, S.P. Poultry litter as a fuel. *World's Poultry Science Journal*, v. 49, p. 175-177, 1993.

ENSMINGER M. E.; OLDFIELD, J.E.; W.W. HEINEMANN. *Feeds & nutrition*. 2: ed. Clovis: California, The Ensminger Publishing Company, 1990. 1544 p.

FERNANDEZ-VITORIA, V.C. *Auditorías medioambientales - guia metodológica*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1995, 520 p.

FISCHER, K. Ecological aspects of meat production. *Pig News and Information*, v. 18, n. 2, p. 124, 1997.

HEADON, D.R., WALSH, G. Biological control of pollutants. In. COLE, D.J.A. (ed.), *Principles of pig science*, London: Nottingham, 1994. p. 375-384.

HENZE, M.; HARREMOËS, P.; JANSEN, J. L.C.; ARVIN, E. *Wastewater treatment: biological and chemical process*. 2: ed. Berlin: Springer-Verlag, 1997.

HOBSON, P.N.; BOUSFIELD, S.; SUMMERS, R. *Methane production from agricultural and domestic wastes*. London: Applied Science, 1981. 25p.

LETTINGA, G. et al. Use of upflow sludge blanket (UASB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. *Biotechnology and Bioengineering*, New York, v. 22, p. 699-734, 1980.

LIMA, G.J.M.M. O papel do nutricionista no controle da poluição ambiental por dejetos suínos. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO DE NUTRIÇÃO DE SUÍNOS E AVES, 1996, Campinas. *Anais...* Campinas: CBNA, 1996. p. 118-134.

LUCAS JR., J. *Estudo comparativo de biodigestores modelo indiano e chinês*. Botucatu, 1987. 114 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura). Faculdade de Ciências Agrônômicas - Universidade Estadual Paulista.

LUCAS JR., J. *Algumas considerações sobre o uso do estrume de suínos como substrato para três sistemas de biodigestores anaeróbios*. Jaboticabal, 1994. 113 p. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. Universidade Estadual Paulista.

LUCAS JR., J.; ZORZETE, P.; SANTOS, T.M.B. Digestão anaeróbia de resíduos da criação de codornas em biodigestores contínuos. In: XXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26., 1997, *Anais...* Campina Grande: SBEA, 1997, 3 p. (CD).

METCALF, J.; EDDY, P. *Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse*. 3. ed. Singapore: McGraw-Hill, 1991.

OLIVEIRA, P.A.V. (coord). *Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos*. Concórdia: EMBRAPA-CNPSA, 1993. 188 p. (EMBRAPA-CNPSA. Documentos, 27).

OLIVEIRA, R.A. de. *Biodegradação de dejetos de origem animal: aspectos bioquímicos e biofísicos*. Jaboticabal-SP., FCAV/UNESP, 1998. (Apostila de palestra ministrada na disciplina de Manejo de Resíduos Orgânicos de Origem Animal do curso de Pós-Graduação em Zootecnia, área de concentração em Qualidade e Produtividade Animal, da FZEA/USP, Campus de Pirassununga)

PAULA JR., D.R. Impacto ambiental da Agroindústria: tecnologias para controle de resíduos. *Análise ambiental: estratégias e ações*, São Paulo: T.A. Queiroz Editor, 1995. p. 248-252.

PEIXOTO, R.T.G. *Compostagem: opção para o manejo orgânico do solo*. Londrina: IAPAR, 1988. 48 p. (Circular, 57).

SANTOS, T.M.B.; LUCAS JR., J. Produção de biogás a partir de três tipos de cama obtidos em dois ciclos de criação de frangos de corte. *Revista Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 17, n. 2, p. 9-20, 1997.

UEHARA, M.Y. *Operação e manutenção de lagoas aeróbias e facultativas*. São Paulo: CETESB, 1989. 91 p. (Série Manuais, 5).

VAN HORN, H.H.; WILKIE, A. C.; POWERS, W.J.; NORDSTEDT, R.A. Components of dairy manure management systems. *Journal of Dairy Science*, v. 77, n. 7, p. 2008-2030, 1994.



## 16 Suinocultura e Estratégias para a Redução de Gases e Poluentes

CARLOS CLÁUDIO PERDOMO, GUSTAVO J. M. M. DE LIMA  
*Embrapa Suínos e Aves, Concordia, SC, Brasil*

KATIA NONES  
*Bolsista – Embrapa Suínos e Aves, Concordia, SC, Brasil*

**Resumo.** A suinocultura é considerada uma atividade de grande potencial poluidor, em face do grande volume de efluente gerado e à elevada presença de contaminantes. As perdas de nutrientes através de fezes, urina e gases demonstram que o processo de digestão de suínos não é completa e constituem ameaças ao meio ambiente, onde a degradação biológica do material orgânico produz gases tóxicos ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e outros), que podem afetar a qualidade do ar e representar riscos a saúde de homens e animais. O nitrogênio e o fósforo são considerados como os principais nutrientes responsáveis pela poluição dos corpos hídricos, sendo que o primeiro requer maiores cuidados, pois além de limitar o desenvolvimento da maioria das culturas é o nutriente que está mais sujeito às perdas, seja na armazenagem ou no solo. Os nutricionistas formulam dietas com excesso de nutrientes buscando a maximização da performance animal, o que resulta em aumento do volume e do poder poluente dos dejetos. A sustentabilidade da suinocultura somente será alcançada por uma adequação dos padrões tecnológicos praticados, que resultem em aumento do valor fertilizante e condicionador do solo, reduzam o volume e o poder dos efluentes gerados.

### Swine Production and Strategies for Reducing Polluting Gases and Agents

**Abstract.** The pollution potential of swine production is considered quite high because of the substantial volume of slurry produced and the large amount of pollutants present. Nutrient losses through animal

*feces, urine and gases demonstrate that digestion in pigs is an incomplete process. Some of the end products of biological degradation of refusal dietary components include toxic gases such as CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, and H<sub>2</sub>S, which affect air quality and constitute a hazard to human and animal health. In addition, nitrogen and phosphorus are considered the principal nutrients causing water pollution. Nitrogen pollution requires higher attention, because it can seriously impair the growth of major crops. In addition, nitrogen losses can readily occur when stored or even from the soil. Dietary formulas for swine usually include excessive amounts of nutrients in order to maximise animal performance. This results in considerable increases in the amount and polluting potential of their excreta. The sustainability of swine production depends on the adoption of animal management technology that ensures increased soil conditioning and fertilising properties and reduced pollution potential and volume of the excreta.*

## Introdução

A suinocultura é uma atividade de grande potencial poluidor e sua contribuição para a degradação ambiental é proporcional a intensidade de exploração e nível tecnológico aplicado. A emissão de gases resultante do processo de criação dos suínos, da estocagem e da distribuição dos dejetos, aliado aos problemas das perdas em estado líquido, constitui importante fonte de conflito entre criadores e a sociedade.

A perda da qualidade do ar nos grandes centros criadores do Brasil e a significativa contribuição da atividade pecuária para o aumento das emissões gasosas (metano, especialmente) e de suas repercussões para o meio ambiente, não têm recebido a devida atenção. Os gases, vapores e poeiras gerados pela suinocultura podem causar problemas de maus odores, comprometer a saúde de homens e animais, corroer equipamentos e edificações, mas os elevados níveis de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo, sais e bactérias contidos nos dejetos suínos são os responsáveis pelo aumento da degradação dos recursos naturais nos grandes centros produtores.

A incidência de doenças relacionadas à perda da qualidade do ar nas edificações para suínos, vem apresentando um aumento considerável nos últimos anos, em função do alto nível de confinamento praticado pelos criadores. Estima-se que cerca de 50% dos suínos criados em sistema intensivos de produção

apresentam problemas de saúde e muitos criadores tornam-se incapacitados para o trabalho aos 50 anos de idade, como decorrência de danos provocados em seu sistema respiratório. Por outro lado, dejetos não tratados lançados no solo e nos mananciais de água vêm causando desequilíbrios ambientais, a exemplo dos 95% de contaminação por coliformes fecais das fontes de abastecimento de água da região Oeste de Santa Catarina e da proliferação de moscas e borrachudos, que dificultam a vida do homem do campo e da cidade e colocam em riscos a sua saúde.

A sustentabilidade da atividade suinícola resulta em grande desafio para um país que possui 34,2 milhões de cabeças (ANUALPEC, 1997), 5º maior rebanho mundial, produz cerca de 1,5 milhões de toneladas de carne suína (12º produtor mundial), fatura mais de US\$ 5,5 bilhões com o setor e que gera emprego e renda para cerca de 2 milhões de propriedades rurais (Roppa, 1996).

### Características da Produção Animal

A suinocultura é uma atividade desenvolvida preponderantemente em pequenas propriedades, constituindo-se em excelente instrumento de fixação do homem ao campo. O número de granjas consideradas tecnificadas representa 30% do total existente no país, as pouco tecnificadas 30% e não-tecnificadas 40% (Gomes et al., 1992).

Os sistemas confinados constituem a base da expansão suinícola (Tabela 1) e induzem a adoção do manejo de dejetos na forma líquida. O elevado nível de diluição é um agravante para a captação, armazenagem, tratamento, transporte e distribuição dos dejetos.

**Tabela 1** - Distribuição (em %) dos sistemas de produção de suínos no Brasil

Sistema/Ano	1990	1995	2000
Confinado	40,0	48,0	61,0
Semiconfinado	27,0	26,0	21,0
Extensivo	32,8	25,5	17,0
Ar Livre	0,2	0,5	1,0

Fonte: Gomes et al. (1992)

As perspectivas da cadeia suína no país indicam, a curto prazo, expansão do rebanho (na região Centro-Oeste, especialmente) e aumento da eficiência da produção de suínos em todas as regiões, como decorrência do emprego de novas tecnologias (genética, nutrição e manejo) e de métodos gerenciais.

### *O Manejo dos Dejetos*

O manejo de dejetos suínos no Brasil, basicamente, é praticado sob a ótica da “armazenagem e distribuição no solo”. As tecnologias disponíveis para tratamento da biomassa suína (separação de fases, reatores, lagoas em séries etc.) e a utilização agrônômica (fertilização, irrigação) são de uso incipiente.

A estratégia da armazenagem e distribuição como controle da poluição não tem sido totalmente correta, pois revela um distanciamento da realidade e interesse dos produtores. Estudo realizado pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina S.A. - Epagri, revela que apenas 15% das propriedades suinícolas de Santa Catarina possuíam alguma forma de tratamento (esterqueiras e bioesterqueiras) no início da década de 90, mas em 1997 já eram 40% (6.324) dos produtores integrados à Agroindústria e 70% (9.012) do total, segundo Tramontini (1999). A utilização de lagoas para o tratamento é incipiente e as poucas implantadas funcionam como simples tanques de decantação, onde a digestão dos sólidos ocorre apenas na parte inferior (Vitoratto, 1997).

### *Volume Produzido*

De uma forma geral, estima-se que um suíno (na faixa de 16 a 100 kg de peso vivo) produz de 8,5% a 4,9% de seu peso corporal em urina + fezes diariamente (Jelinek, 1997). O manejo, o tipo de bebedouro e o sistema de higienização adotado (frequência e volume de água utilizada), bem como o número e a categoria de animais também influenciam o volume de dejetos (Tabela 2).

**Tabela 2** - Produção média diária de esterco (kg), esterco + urina (kg) e dejetos líquidos (L), por animal e fase do ciclo produtivo

Categoria de Suínos	Esterco	Esterco + urina	Dejetos líquidos
25-100 kg	2,30	4,90	7,00
Porcas em gestação	3,60	11,00	16,00
Porcas em lactação	6,40	18,00	27,00
Machos	3,00	6,00	9,00
Leitão desmamado	0,35	0,95	1,40
Média	2,35	5,80	8,60

Fonte: Adaptado de Konzen (1983) e Oliveira et al. (1993)

A demanda de água utilizada na limpeza varia de 2 a 6 litros/cabeça.dia para animais em terminação e porcas do rebanho, segundo Sobestiansky, citado por Oliveira (1994), respectivamente. No entanto, em observações a campo temos encontrado valores de até 18 litros/porca.dia. A Tabela 3 apresenta uma estimativa de produção de dejetos nas diferentes regiões brasileiras.

**Tabela 3** - Rebanho (cabeças) e estimativa da produção de dejetos suínos (em m<sup>3</sup>) nas diferentes regiões brasileiras

Região	Rebanho <sup>1</sup>	Produção de dejetos <sup>2</sup>	
		Diária	Anual
Norte	4.569.170	24.952	9.107.480
Nordeste	8.069.180	52.046	18.996.790
Sudeste	6.095.021	47.700	17.410.500
Sul	12.005.395	103.246	37.684.935
Centro-Oeste	3.466.437	26.532	9.684.180
Total	34.205.203	294.164	92.883.885

<sup>1</sup> ANUALPEC (1997)

<sup>2</sup> Estimada com base no peso vivo médio e dados da Tabela 2

De uma forma geral, estima-se a produção de dejetos em 100 litros/matriz.dia em ciclo completo, 60 litros/matriz.dia para as unidades de produção de leitões e 7,5 litros/dia para a de terminados.

*Composição Física, Química e Biológica*

As características dos dejetos estão associadas ao sistema de manejo adotado e aos aspectos nutricionais, apresentando grandes variações na concentração dos seus elementos entre produtores e dentro da própria granja. É mais adequado expressar a composição física, química e biológica dos efluentes, em função da produção de urina + fezes em relação ao peso animal (Tabela 4), e introduzir o fator local de diluição (função do manejo, bebedouros, higiene e outros parâmetros).

**Tabela 4** - Características de dejetos suínos (fezes + urina), expresso por 1.000 kg de peso vivo

Parâmetro	Unidade	Valor
Volume - Urina	kg	39
Fezes	kg	45
Densidade	kg/m <sup>3</sup>	990
Sólidos - Totais	kg	11
Voláteis	kg	8,5
DBO5	kg	3,1
DQO	kg	8,4
pH		7,5
Nitrogênio - Total	kg	0,52
Amoniacal	kg	0,29
Fóforo Total	kg	0,18
Potássio total	kg	0,29
Minerais - Cálcio	kg	0,33
Magnésio	kg	0,070
Enxofre	kg	0,076
Sódio	kg	0,067
Cloro	kg	0,26
Ferro	mg	16
Manganês	mg	1,9
Zinco	mg	5,0
Cobre	mg	1,2
Cloriforme - Total	Colônia	45 x 10 <sup>10</sup>
Fecal	Colônia	18 x 10 <sup>10</sup>

A estimativa de produção de fezes + urina em uma granja de Ciclo Completo (todas as fases de criação) com dimensionamento de 100 matrizes é apresentada na Tabela 5.

**Tabela 5** - Características dos dejetos suínos de uma granja de 100 matrizes em ciclo completo, de acordo com a fase de produção\*

Parâmetro	M	PG	PL	LD	LC	LA
Número de Animais	6	90	20	330	250	250
Peso médio (kg)	160	125	170	16	40	75
Dejetos (kg/dia)	5,23	4,1	102	11	2,6	4,9
Sólidos (kg/dia)						
Totais	0,47	0,37	0,93	0,18	0,44	0,83
Voláteis	0,38	0,30	0,75	0,14	0,34	0,64
DBO5 (kg/dia)	0,15	0,12	0,31	0,05	0,18	0,23
N total (kg/dia)	0,0041	0,032	0,045	0,008	0,021	0,39
NH <sub>4</sub> - N (kg/dia)	0,023	0,018	0,025	0,004	0,012	0,22
P total (kg/dia)	0,013	0,010	0,011	0,03	0,007	0,012
K total (kg/dia)	0,024	0,019	0,021	0,005	0,012	0,022

\* Estimativa realizada com base nos dados constante (fezes+urina) na Tabela 4, onde: M = machos, PG = porcas gestantes, PL = em lactação, LD = leitões desmamados, LC = em crescimento e LA = acabamento.

### *Impactos Ambientais*

A capacidade poluidora dos dejetos de suínos, em termos comparativos, é muito superior ao de outras espécies, a exemplo da humana, pois enquanto a DBO<sup>1</sup> per capita de um suíno com 85 kg de peso vivo varia de 189 a 208 g/animal/dia, a doméstica é de apenas 45 a 75 g/habitante/dia (ASAE, 1993). A quantidade de matéria orgânica degradável presente nos dejetos de animais em confinamento é cerca de 20 a 50 vezes mais elevados do que os animais em estado selvagem (Krueger et al., 1995).

<sup>1</sup> DBO = Demanda Bioquímica de Oxigênio.

### Qualidade do Ar

A degradação biológica do material orgânico (fezes, urina, ração e outros) produz gases tóxicos que podem afetar a saúde e o desempenho dos suínos. O metano ( $\text{CH}_4$ ), o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), a amônia ( $\text{NH}_3$ ) e o hidrogênio sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) são os gases de maior interesse para a suinocultura.

A degradação de fibras vegetais e de proteínas provoca a formação de compostos voláteis. De acordo com Montiauch (1979) citado por Belli (1995), os ácidos aminados submetidos aos processos de desaminação, transaminação, descarboxilação oxidativa dão origem ao  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  e ácidos graxos voláteis (AGV). Segundo Pain & Bonazzi (1991) citado por Belli (1995), a concentração de AGV varia de 4 a 27 g/L de dejetos.

**Metano:** É um gás inodoro, mais leve que o ar, asfixiante, inflamável e explosivo, requerendo extremo cuidado no seu manejo. Concentrações acima de 500.000 ppm provocam dores de cabeça em humanos (USDA 1994). A Tabela 6 apresenta uma estimativa da produção de  $\text{CH}_4$  em função da produção de sólidos voláteis de dejetos suínos no Brasil.

**Tabela 6** - Estimativa da produção de sólidos voláteis (kg) e de metano ( $\text{m}^3/\text{kg SV}$ ), de acordo com a região<sup>1</sup>

Região	Sólidos Voláteis		Metano	
	Diária <sup>2</sup>	Anual	Diária <sup>2</sup>	Anual
Norte	0,34	1.553.518	0,29	1.325.059
Nordeste	0,38	3.066.288	0,32	2.582.138
Sudeste	0,42	2.559.90	0,37	2.255.158
Sul	0,45	5.402.428	0,41	4.922.212
Centro-Oeste	0,48	1.663.889	0,38	1.317.246
Total		14.246.032		12.401.813

<sup>1</sup> Estimados com base no rebanho, massa corporal média dos suínos (Tabela 3) e na emissão descrita por Krueguer et al. (1995)

<sup>2</sup> Produção por animal/dia.

Sob condições aeróbias, o  $\text{CO}_2$  é o principal gás produzido, mas em anaerobiose predomina o  $\text{CH}_4$  (60% a 70%) e o  $\text{CO}_2$  (30%). Dentre os mais de 40 compostos gasosos identificados na degradação de dejetos animais, cabe destaque à família dos mercaptanos, sulfetos, ésteres, carbonilas e aminas. A produção de  $\text{CH}_4$  é pequena na produção de suínos, representando menos de 1% da energia consumida, e comparada à produção de ruminantes é insignificante, sendo levemente superior a 1 kg de  $\text{CH}_4$  /cabeça/ano (Tamminga & Verstegen, 1992).

**Dióxido de carbono:** O  $\text{CO}_2$  é mais pesado do que o ar, inodoro e asfíxiante. A concentração máxima admissível na edificação é de 3.500 ppm (Benedi, 1986), sendo que valores superiores a 20.000 ppm provocam aumento dos batimentos cardíacos, sonolência e dor de cabeça (USDA, 1994). Permanece nas camadas mais baixas das edificações e das estruturas de armazenagem, deslocando gradualmente os gases mais leves. Perdomo (1995a) encontrou concentrações de 0,030% em edifícios climatizados naturalmente e de 0,038% naqueles climatizados artificialmente, muito abaixo daqueles referidos como tóxicos. Um suíno de 50 kg pode produzir cerca de 450 kg/ano de  $\text{CO}_2$ , o qual contribui para o efeito estufa (Tamminga & Verstegen, 1992).

**Amônia:** A  $\text{NH}_3$  é um gás mais leve que o ar, hidrossolúvel e de odor penetrante, irritante. Sua presença é detectada em concentrações de 5ppm, mas a partir de 25 ppm é irritante aos olhos e ao trato respiratório e está associada aos processos de acidificação do solo. A quantidade de amônia volatilizada depende do teor de nitrogênio mineral presente nos dejetos.

Para o maior conforto e segurança dos criadores e animais, recomenda-se que os níveis de  $\text{NH}_3$  não ultrapassem 10 ppm (Benedi, 1986). Perdomo (1995a) encontrou valores inferiores a 2 ppm no verão e 4,1 ppm no inverno para edificações com condicionamento natural, mas valores de 10,46 ppm no inverno para aquelas climatizadas artificialmente, todas elas abaixo dos limites com efeitos deletéreos.

**Hidrogênio Sulfídrico:** O  $\text{H}_2\text{S}$  é mais pesado que o ar, tem cheiro de ovo podre e é extremamente tóxico. Exposições durante 1 hora a valores de 200 ppm podem provocar náuseas e excitação nas pessoas, dores de cabeça à 500 ppm e morte acima de 1.000 ppm. A concentração máxima admissível na edificação é de 20 ppm (Benedi, 1986).

Embora sua produção em esterqueiras seja bem menor que a de outros gases, o fato de ser mais pesado que o ar, faz com que sua concentração aumente com o passar do tempo, requerendo cuidados especiais na retirada dos dejetos. É detectado na concentração de 0,01 ppm ou mais, e na concentração

entre 50-200 ppm pode acarretar sintoma nos leitões tais como: perda de apetite, fotofobia, vômitos e diarreias (Le Dividich, 1982).

**Óxido nítrico:** O  $N_2O$  é um gás emitido durante o tratamento dos dejetos suínos líquidos, com grande influência nas alterações climáticas, especialmente na destruição da camada de ozônio. A emissão de  $N_2O$  referente à produção de suínos representa uma parcela significativa da emissão total atribuída à agricultura nos grandes centros produtores, a exemplo dos países baixos, sendo estimada em 10 a 15 milhões de kg/ano (Goossensen & Meeuvissen, 1990, citados por Tamminga & Verstegen, 1992).

### *Qualidade do Solo*

**Nutrientes:** dietas ricas em proteína, e conseqüentemente nitrogênio, exigem maior consumo de água, uma vez que o metabolismo das proteínas gera menor produção de água metabólica, quando comparada ao de carboidratos e lipídeos. A excreta na urina é tanto maior quanto mais elevado for o nível de N da dieta. A importância deste detalhe pode ser facilmente percebida, pois ao se aumentar a digestibilidade da matéria seca de 85% para 90% pode-se causar uma redução de 30% da matéria seca nas fezes (Tabela 7). Este mesmo raciocínio pode ser aplicado aos outros componentes da ração.

**Tabela 7** - Redução da matéria seca (MS, em kg) nas fezes, de acordo com a digestibilidade

Parâmetro	Peso Vivo ( kg)	
	10 a 30	25 a 105
Ingerida	30	200
Excretada nas fezes		
85% digestibilidade	4,5	30
90% digestibilidade	3,0	20
Diferença		
Em kg	- 1,5	-10
Em %	33	- 33

Fonte: Inborg (1992)

O N é o nutriente que exige maiores cuidados, pois além de limitar o desenvolvimento da maioria das culturas, é o que está mais sujeito a transformações biológicas e perdas. A Tabela 8 apresenta as perdas de N em função do sistema de estocagem e utilização.

**Tabela 8** - Perdas de nitrogênio (em %) em função do manejo de dejetos

Sistema	Perda de N
Lagoa anaeróbica	70 a 85
Esterqueira	20 a 40
Aspersão	15 a 40
Distribuição	
Líquida	10 a 25
Sólida	15 a 30
Injeção ou incorporação imediata	1 a 5

Fonte: USDA (1994)

Seganfredo (1998a), ao estudar o efeito cumulativo da aplicação de dejetos suínos no solo durante três anos, concluiu que a concentração de N-NO<sub>3</sub> na profundidade de 40 cm a 60 cm foi 172% superior à testemunha (adubação mineral), e que os teores de NO<sub>3</sub> excederam de 50% a 121% o limite estabelecido pela legislação ambiental (10 mg/L). Outro estudo do autor (1998b), com dosagens de 100 a 150 kg/ha de N, revelou que a aplicação de dejetos diminuiu a microporosidade e a densidade do solo, mas aumentou a macroporosidade e a porosidade total do solo.

## Estratégias para o Controle das Emissões

Qualquer medida que leve à melhoria da eficiência dos processos produtivos, manejo e da alimentação, ou seja, maior conversão de alimento em ganho de peso, acarretará uma menor produção de dejetos e, conseqüentemente, menor risco ambiental. Ou seja, todo o processo que melhore o condicionamento ambiental e a saúde dos animais, reduza as condições de anaerobiose e aumente o nível de aproveitamento dos nutrientes presentes nas dietas dos animais, geram um volume menor de poluentes na forma gasosa e no efluente líquido.

### *Redução dos Desperdícios de Água*

Os desperdícios de água podem ter várias implicações, a exemplo do estímulo ao comportamento excretório dos animais em áreas impróprias da baía, diluição e aumento do volume (maior exigência de água para a higienização), contribuindo para a elevação dos custos de coleta, armazenagem, tratamento, transporte e distribuição. O problema da diluição excessiva dos dejetos está muito mais relacionado as perdas de poluentes no estado líquido do que na emissão gasosa .

Uma pequena goteira em um bebedouro (com pressão de 2,8 kg/cm<sup>2</sup>), pode significar uma perda de 26,5 L/hora (0,636 m<sup>3</sup>/dia) e 150 L/hora (3,6 m<sup>3</sup>/dia) em um vazamento maior (Bodman, 1994), além de um aumento adicional de 79% nos custos de armazenamento de dejetos (esterqueira, com 45 dias de retenção) em uma granja com 24 matrizes em ciclo completo, se apenas 5% dos bebedouros (tipo *nipple*) apresentarem pequeno vazamento (Perdomo, 1995b).

### *Formulação da Dieta*

Segundo Clanton (1993), citado por Stilborn (1998), a chave para o sucesso no manejo de dejetos é um bom planejamento nutricional, considerando-se os ingredientes da dieta dos animais, a excreção e a perda de nutrientes nos dejetos, sua armazenagem, transporte e aplicação no solo, e ainda o uso desses nutrientes pela planta. A média de eficiência de utilização do N da dieta de suínos é de 29%, do P é de 28% e do K é de 6%. Nesse mesmo contexto, é sugerido pelo NRC (1998) que 45% a 60% do N, 50% a 80% do Ca e P e 70% a 95% do K, Na, Mg, Cu, Zn, Mn e Fe consumidos são excretados pelos animais.

**Redução de nitrogênio (N):** Um excesso de proteína dietética ou deficiência de energia poderá causar uma maior utilização da proteína como fonte de energia. Dessa forma, o excesso de proteína será desanimado e a cadeias carbônicas resultantes dos aminoácidos serão utilizadas como fonte de energia e o nitrogênio será excretado na forma de uréia nos mamíferos e ácido úrico nas aves (Stilborn, 1998).

Dietas com alta digestibilidade de aminoácidos podem reduzir a quantidade de nitrogênio excretado nas fezes (Stilborn, 1998). Segundo Henry & Dourmad (1992) com a utilização de valores de aminoácidos digestíveis na

formulação de dietas para suínos, pode-se esperar uma redução de 3% a 5% na excreção de nitrogênio. Em um estudo realizado pela EUROLYSINE (s/d) a proteína da dieta foi reduzida em 6% no crescimento e 3% na terminação utilizando aminoácidos sintéticos, e a excreção de nitrogênio foi reduzida em mais de 1/3.

Na Tabela 9 podemos observar que uma redução de 26,33% da proteína da dieta resultou em uma redução de 35,26% e 58,57% no volume e excreção de N na urina, respectivamente. O maior consumo de água pelos animais alimentados com dietas de altos níveis de proteína pode ser justificado de três maneiras: 1- para o metabolismo do nitrogênio – uréia, e aumento da temperatura corporal em função do metabolismo; 2- excreção da uréia via rins, e 3- propriedade osmótica dos aminoácidos no intestino delgado requerendo mais água.

**Tabela 9** - Balanço de água e N em suínos de 20 kg a 30 kg

Variáveis	Baixa Proteína (12,54%)	Alta Proteína (23,79%)
Consumo proteína bruta (g/dia)	319	433 **
N consumido (g/dia)	49,7	76,7 ***
Consumo de água (g/dia)	4.318	5.427 *
Excreção de água		
Urina (g/dia)	1.873	2.893 *
Fezes (g/dia)	1.186	1.189 NS
Excreção de N		
Urina (g/dia)	13,3	32,1 ***
Fezes (g/dia)	12,9	16 NS

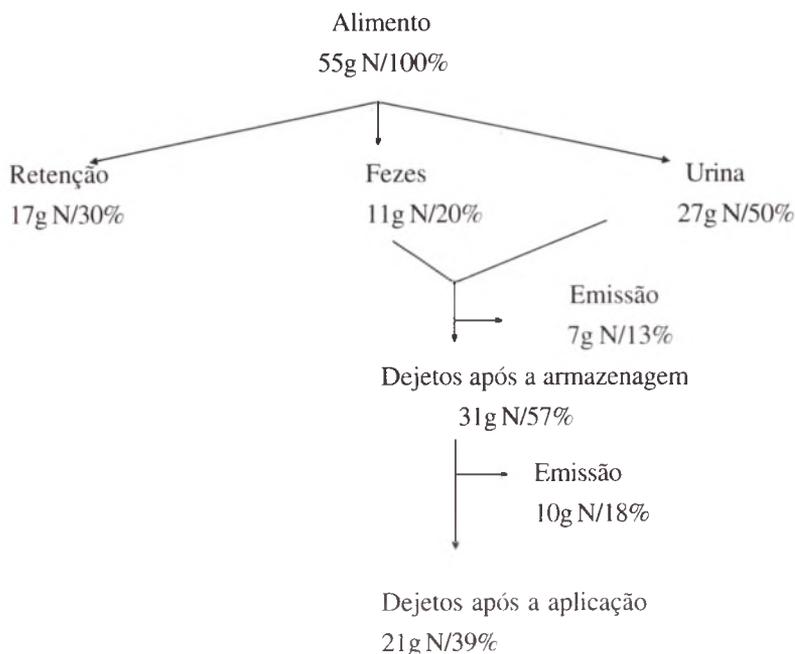
\* (P<0,5), \*\* (P<0,01), \*\*\* (P<0,001), NS (P>0,1)

Fonte: Pfeiffer & Henkel (1991)

Há duas maneiras de reduzir a excreção de nitrogênio. A primeira, através de uma redução do nitrogênio urinário, obtida por uma melhora na qualidade da proteína fornecida através da dieta. A segunda, através de um aumento na digestibilidade ideal, reduzindo a excreção de N através das fezes. Um balanceamento dos aminoácidos levará a uma substancial redução do nitrogênio urinário, o qual contribui com 2/3 do nitrogênio excretado (Gatel, 1994).

Segundo Sutton et al. (1998), citado por Lenis & Jongbloed (1998), encontraram uma redução de N de 28% nos dejetos suínos, quando a proteína bruta em dietas de milho e farelo de soja no crescimento e terminação foi reduzida em 3% (de 13% a 10%) e suplementados com aminoácidos sintéticos. Uma redução da proteína bruta de 18% a 10%, com suplementação de aminoácidos, promoveu uma redução na excreção de N (na forma de amônia) e N (total) nos dejetos em 40% e 42%, respectivamente.

Em estudo realizado por Yano et al. (1998), suínos de 18-30 kg, recebendo 24,8 g de N/dia, excretaram 4 g N/dia (16%) nas fezes e 5,1 g de N/dia (20,2%) pela urina. Quando os animais foram alimentados com 32,2 g de N/dia, foram excretados 4,1 g de N/dia (13%) nas fezes e 9 g de N/dia (28%) na urina. Isto sugere que 20% a 28% da proteína (ou aminoácidos) absorvida não pode ser convertida em proteína corporal, pois há desbalanceamento entre os aminoácidos. Na Figura 1 são apresentados resultados de um estudo semelhante realizado por Van Der Peet-Schwering et al. (1997) com animais em terminação.



**Figura 1** - Ciclo do nitrogênio para suínos em terminação

**Fonte:** Van Der Peet-Schwering et al. (1997)

Diminuindo-se o fornecimento de proteína nas dietas de suínos em crescimento e terminação, mediante um melhor balanceamento de aminoácidos através da suplementação de aminoácidos sintéticos, pode-se reduzir em 23% a excreção de N nos dejetos e 25% da emissão de N na forma gasosa (Latimier et al., 1993).

O nitrogênio das fezes está principalmente na forma de proteína, enquanto o nitrogênio na urina está principalmente na forma de uréia. A uréia é facilmente hidrolizável e catabolizada pela enzima urease à dióxido de carbono e amônia. A urease é produzida por uma ampla variedade de microorganismos, que estão presentes nas fezes, mas não na urina (Van Der Peet-Schwering et al. 1997).

Na Tabela 10 são apresentados os dados de um experimento realizado por Dourmad et al. (1993), onde a composição corporal dos suínos não foi afetada pela redução da proteína das dietas quando suplementadas com aminoácidos sintéticos, concluindo que a melhoria do perfil de aminoácidos trouxe redução de 35% na excreção de N.

**Tabela 10** - Efeito da redução de proteína da dieta no desempenho e excreção de nitrogênio de suínos (10 kg - 102 kg)

Parâmetros	Proteína Bruta (%)		
	17,8	15,5	13,6
Ganho médio diário (g)	846	867	852
Conversão alimentar			
MJ NE/kg	27,5	27,4	27,6
MJ ME/kg	38,2a	37,4b	37,2b*
Porcentagem de carne	51,3	52,3	51,6
Excreção de N kg/suíno)*	3,90 a	3,10 b	2,50 c*

\* Valores médios.

Fonte: Dourmad et al. (1993)

### *Sistemas de Tratamentos*

Os problemas de emissão de gases, vapores, aerossóis e poeiras gerados da suinocultura podem ser reduzidos através de ações específicas sobre o manejo e coleta dos dejetos na própria edificação, no sistema de armazenamento, tratamento, transporte e utilização.

A emissão de  $\text{NH}_3$  em edificações com estocagem de dejetos líquidos sobre o piso (fossa ou calha) com retirada de 2 a 3 vezes por ano, semanal ou diária, apresentam o mesmo nível de grandeza. No entanto, a forma de escoamento contínuo convencional (drenagem por gravidade) gera maior perda de  $\text{NH}_3$ .

Existem diversos sistemas e formas de tratamento, porém os principais utilizados no Brasil são as esterqueiras, lagoas e a compostagem. A combinação de sistemas de separação de fases com processos biológicos de tratamento, pode valorizar o uso dos dejetos, facilitar o manejo e reduzir os custos de armazenagem, tratamento e transporte.

A anaerobiose conduz à formação de maus odores e o tempo de retenção hidráulico pode modificar o potencial odorífero dos dejetos suínos. Um trabalho realizado por Belli (1995) comparando dejetos brutos com estocados por 120 dias, mostrou que a emissão de  $\text{H}_2\text{S}$  diminui com o tempo (89 para  $27,4 \text{ g/m}^3$ ), aumento de  $\text{N-NH}_4^+$  (4,90 para  $5,30 \text{ g/kg}^{-1}$ ) e perda de N-NTK ( $7,92$  para  $7,70 \text{ g/kg}^{-1}$ ), indicando uma liquefação e uma amonificação dos dejetos, respectivamente.

De uma forma geral, as lagoas anaeróbias são dimensionadas para receber cargas orgânicas superiores aos valores utilizados em outros tipos de lagoas. Consequentemente, isso aumenta a possibilidade de emissão de gases indesejáveis, especialmente o  $\text{H}_2\text{S}$ . Uma das alternativas para o seu controle é empregar lagoas de grande profundidade. Demuyne et al. (1984), citado por Belli (1995), mostrou que dejetos tratados pelos processos anaeróbios emitem menor intensidade de maus odores que os não tratados.

*Sistemas em série:* A combinação de diferentes processos ligados em série, a exemplo do desenvolvido pela Embrapa/Universidade Federal de Santa Catarina, apresenta excelente eficiência de remoção de poluentes, além de valorizar o uso agrônômico dos mesmos a custos razoáveis (Tabela 11).

**Tabela 11** - Eficiência (%) de remoção de poluentes de um sistema de tratamento composto por decantador de palhetas (DCAPAL), lagoa anaeróbia (LANA-1 e LANA-2), facultativa (LFACUL) e de aguapé (LAGUAP)

Unidade	pH	ST	SF	SV	DBO5	NT	PT	CF
Afluente	7	16 668	6 489	10 179	10 417	2 164	610	5,7 x 10 <sup>9</sup>
DCAPAL		40	38	41	25	16	38	33
LANA-1		52	36	62	79	23	67	99
LANA-2		23	12	35	57	21	40	99
LFACUL		41	39	43	47	59	35	93
LAGUAP		41	45	33	51	50	46	79
Efluente	7,8	1 332	734	598	209	180	26	2,7 x 10 <sup>3</sup>
Final (%)		92	87	94	98	92	96	99,9

ST = sólidos totais, SF = fixos e SV = voláteis; DBO - demanda bioquímica de oxigênio, NT = nitrogênio e PT = fósforo total, todos expressos em mg/L. CF = taxa de coliformes fecais, em NMP/100 mL.

Fonte: Costa et al., 1997

*Compostagem:* A decomposição pode ocorrer por processos aeróbios e anaeróbios. Da fermentação aeróbia (com desprendimento de calor) resultam como produtos finais a água e o CO<sub>2</sub>, e da anaeróbia resultam CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e outros produtos. Da putrefação anaeróbia pelo gênero *Clostridium*, resulta a não liberação completa de nitrogênio aminado como NH<sub>3</sub>, e a formação de aminas incompletas malcheirosas. O produto resultante possui cerca de 1% a 2% de N, 0,5% a 1% de P e de K. Marriel et al. (1987) sugerem que a relação carbono/nitrogênio (C/N) dos resíduos a serem compostados deve ser igual a 30. Valores abaixo de 20 ou 25 provocam uma amonificação com perdas de N, mas acima de 50 provocam retardamento do processo de compostagem, que resultam em um produto final menos estável e de qualidade inferior.

### *Uso como Fertilizante*

Os dejetos suínos são uma ótima fonte de nitrogênio, já que apresentam mais de 50% do N na forma amoniacal, ou seja, prontamente disponível para as plantas (Scherer et al., 1995 ).

Aplicações de 40 m<sup>3</sup>/ha de dejetos líquidos é a dose mais recomendada para a cultura do milho em solos com teores médios de matéria orgânica (Scherer et al., 1995) e 45 m<sup>3</sup>/ha para solos de cerrado.

Durante a aplicação dos dejetos, grandes quantidades de gases são emitidos, especialmente, NH<sub>3</sub> e H<sub>2</sub>S.

## Considerações Finais

As análises prospectivas da cadeia suína indicam, a curto prazo, um aumento da eficiência produtiva mediante o aumento da escala de produção e emprego de novas tecnologias (genética, ambiente, nutrição e manejo) e de técnicas gerenciais, capazes de reduzir a idade de abate (160 para 145 dias) e elevar a capacidade reprodutiva do rebanho (14 para 20 suínos/porca.ano). Este aspecto preocupa na medida em que eleva o volume de dejetos e o potencial de poluição da atividade.

Dentre as alternativas existentes para a redução da emissão de gases e dos problemas ligados a saúde e conforto de homens e animais (H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, etc.) e das repercussões sobre a camada de ozônio (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, etc.), é fundamental melhorar não só os processos de estocagem, tratamento e distribuição de dejetos, mas também a qualidade nutricional das dietas (digestibilidade de ingredientes e níveis de formulação), visando a redução do volume de fezes + urina e de elementos poluentes e, especialmente, da emissão de nitrogênio e fósforo.

## Referências

ANUALPEC 97: *Anuário Estatístico da Pecuária de Corte*. São Paulo: FNP Consultoria & Comércio Ltda, 1997.

ASAE. *Manure production and characteristics*. St. Joseph: Agricultural Sanitation and Waste Management Committee, 1993.

BELLI FILHO, P. *Stockage et odeurs des dejections animales cas du lisier de porc*. Rennes: L'Université de Rennes, École Nationale Supérieure de Chimie, 1995. 181 p. Thèse.

BENEDI, J.M.H. *El ambiente de los alojamientos ganaderos*. Madrid: Ministério da Agricultura, Pesca y Alimentación, Servicio de Extensión Agrária, 1986. 28 p. (Hojas Divulgadoras, n. 6).

BODMAN, G.R. *Evaluation of housing and environmental adequacy: principles and concepts*. Lincoln: Cooperative Extension at the University of Nebraska, 1994. 28 p.

COSTA, R.H.R. da; MEDRI, W.; PERDOMO, C.C. Otimização do sistema de tratamento: decantador de palhetas e lagoas anaeróbias, facultativa e de aguapé de dejetos suínos. In: SIMPOSIO INTERNAZIONALE DI INGEGNERIA SANITARIA AMBIENTALE, 1997, Revello, Villa Rufolo. *Anais...* Revello, 1997. p. 1018-1025.

DOURMAD, J.Y.; HENRY, Y.; BOURDON, D.; QUINIOU, N.; GUILLOU, D. Effect of growth potential and dietary protein input on growth performance, carcass characteristics and nitrogen output in growing-finishing pigs. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF NITROGEN FLOW IN PIG PRODUCTION AND ENVIRONMENTAL CONSEQUENCES, 1., 1993, Wageningen. *Proceedings...* Wageningen: PUDOC, 1993. p. 206-211.

EUROLYSINE. *Substituting protein feedstuffs by cereals and cristalline amino acids results in higher performance and lower nitrogen excretion*. Paris, s.d. (Trial Report, 21).

GATEL, F. Low protein, amino acid supplemented diets for pigs. *Feed Mix*, v. 2, n. 4, p. 32-34, 1994.

GOMES, M. F. M.; GIROTTO, A. F.; TALAMINI, D. J. D.; LIMA, G. J. M. M. de; MORES, N.; TRAMONTINI, P. *Análise prospectiva do complexo agro-industrial de suínos no Brasil*. Concórdia: EMBRAPA-CNPSA, 1992. 108 p. (EMBRAPA-CNPSA. Documentos, 26)

HENRY, Y.; DOURMAD, J. Y. Protein nutrition and nitrogen pollution. *Feed Mix*, v. 1, n. 1. p. 25-28, 1992.

INBORG, J. How feed enzymes can reduces manure problems. *Pig International*, v. 22, n. 1. p. 21, 1992.

JELINEK, T. Collection storage and transport swine wastes. In: TAIGANIDES, E.P. *Animal wastes*. Essex: Elsevier Applied Sciences, 1977. p. 165-174.

KONZEN, E.A. *Manejo e utilização dos dejetos de suínos*. Concórdia: EMBRAPA-CNPSA, 1983. (EMBRAPA-CNPSA. Circular Técnica, 6)

KRUEGER, T.; TAYLOR, G.; FERRIER, M. *Efluent at work*. Calala Lane, 1995. p. 211. (Australian Pig Housing Series).

LATIMIER, P.; DOURMAD, J.Y.; CORLOUER, A. Effect of three protein feeding strategies, for growing-finishing pigs, on growth performance and nitrogen output in the slurry. *Journal de Recherche Porcine en France*, v. 25, p. 295, 1993.

LE DIVIDICH, J. Performance du porc en croissance-finition en relation avec le millien climatique. *Journé Nationale Du Porc*, Toulouse, p. XIII-XIX. 1982.

LENIS, N.P.; JONGBLOED, A.W. New technologies in low pollution swine diets: Deit manipulation and use of synthetic amino acids, phytase and phase feeding for reduction of nitrogen and phosphorus excretion and ammonia emission. Pre-Conference Symposia. In: WORLD CONFERENCE ON ANIMAL PRODUCTION, 8., 1998, Seoul. *Proceedings...* Seoul, 1998. p. 218-244.

MARRIEL, I.E.; KONZEN, E.A.; ALVARENGA, R.C.; SANTOS, H.L. dos. Tratamento e utilização de resíduos orgânicos. *Informe Agropecuário*, n. 147, p.24-36, 1987.

OLIVEIRA, P.A.V.; MARTINS, R.R.; PEDROSO, D.; LIMA, G. J. M. M.; LINDNER, E. A.; BELLIFILHO, P.; CASTILHO Jr., A. B.; SILVEIRA, V. R.; BALDISERA, I.; MATTOS, A. C.; GOSSMANN, H.; CRISTMANN, A.; BONETT, E.; HESS, A. *Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos*. Concórdia: EMBRAPA-CNPSA, 1993. 188 p. (EMBRAPA-CNPSA. Documentos, 27)

OLIVEIRA, P.A.V. de. *Dia de campo sobre manejo e utilização de dejetos suínos*. Concórdia: EMBRAPA-CNPSA, 1994. 47 p.

PERDOMO, C.C. *Avaliação de sistemas de ventilação sobre o condicionamento ambiental e desempenho de suínos, na fase de maternidade*. Porto Alegre: UFRGS, 1995a. 239 p. Tese.

PERDOMO, C.C. Uso racional da água no manejo de dejetos suínos. In: SEMINÁRIO MINEIRO SOBRE MANEJO E UTILIZAÇÃO DE DEJETOS SUÍNOS, 1., 1995, Ponto Nova, MG. *Anais...* Ponte Nova: EPAMIG, 1995b.

PFEIFFER, A.; HENKEL, H. The effect of different dietary protein levels on water intake and water excretion of growing pigs. In: EAAP – CONGRESS ON DIGESTIVE PHYSIOLOGY IN THE PIGS, 5., 1991. *Proceedings...* Wageningen, Netherlands, 1991. p. 126-131.

ROPPA, L. Suinocultura brasileira em números. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE SUINOCULTURA, 1., 1996, São Paulo, SP. *Anais...* São Paulo: Gessuli Eventos, 1996. 16 p.

SCHERER, E.E.; BALDISSERA, I.T.; ROSSO, A. de. *Dia de campo sobre manejo e utilização de dejetos suínos*. Concórdia: EMBRAPA-CNPSA, 1995. 47 p.

SEGANFREDO, M. Efeito de dejetos líquidos de suínos sobre algumas características físicas do solo. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2., 1998, Santa Maria, RS. *Anais...* Santa Maria, 1998a. p. 167-169.

SEGANFREDO, M. Estudo de dejetos de suínos sobre o nitrogênio total, amônio e nitratos na superfície e subsuperfície do solo. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2., 1998, Santa Maria, RS. *Anais...* Santa Maria, 1998b. p. 167-169.

STILBORN, H. Nutrition influences animal waste output. *Feedstuffs*, v. 4, p. 20-47, 1998.

TAMMINGA, S.; VERSTEGEN, N.W.A. Implication of nutrition of animals on environmental pollution: In: GARNSWORTH, P.C.; HARGSIGN, W.; COLE, D.I.A. (ed.), *Recent advances in nutrition*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1992. p. 113-130.

TRAMONTINI, P. Relatório do programa de expansão da suinocultura e controle da poluição. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE DEJETOS DE SUÍNOS, 1999, Concórdia, SC. *Anais...* Concórdia: EMBRAPA/Secretaria da Agricultura e Abastecimento de Santa Catarina, 1999. Comunicação oral.

USDA. *National engineering handbook*. Washington, DC: United States Department of Agriculture, 1994. (Agricultural Waste Management Field Handbook).

VAN DER PEET-SCHWERING, C.M.C.; JONGBLOED, A.W.; AAMINK A.J.A. Nitrogen and phosphorus consumption, utilisation and losses in pig production. The situation in the Netherlands. In: ANNUAL MEETING OF THE EUROPEAN ASSOCIATION FOR ANIMAL PRODUCTION, 48., 1997, Viena. *Proceedings...* Viena: Commission on Pig Production, 1997. Session II, p. 1-18.

VITORATTO, E. *Projeto e operação de um sistema de tratamento de dejetos suínos utilizando lagoa anaeróbia de alta taxa*. São Paulo, 1997. 183 p. Tese.

YANO, F.; NAKAJIMA, T.; MATSUDA, M. Reduction of nitrogen and phosphorus from livestock waste: a major priority for intensive animal production. Pré Conference Symposia. In: WORLD CONFERENCE ON ANIMAL PRODUCTION, 8., 1998, Seoul. *Proceedings...* Seoul, 1998. p. 469-477.



## 17 Melhorando a Eficiência da Produção Pecuária para a Proteção Ambiental e o Desenvolvimento Econômico

BERNARD DU CHARME

*The Global Livestock Group, Inc., Fairfax, VA, U.S.A.*

MARK ORLIC

*U.S. Peace Corps, Washington, DC, U.S.A.*

**Resumo.** *A pecuária ruminante contribui com grandes quantidades de gases de efeito estufa em âmbito global, mas também apresenta oportunidades para a redução de emissões pela melhoria da produtividade e da eficiência. Projetos planejados para aumentar a eficiência de produção da pecuária são economicamente e tecnicamente exequíveis na maioria dos países, mas não têm sido amplamente implementados em países em desenvolvimento. Pela melhoria na eficiência de produção, a pecuária pode tornar-se mais produtiva, resultando em um aumento no fornecimento de carne e de leite sem aumento nos números de efetivos animais. Este capítulo descreve vários estudos de caso de projetos desenhados para melhorar a produtividade e a eficiência da pecuária ruminante em países em desenvolvimento. Também são discutidas técnicas utilizadas no monitoramento e verificação das emissões de gases de efeito estufa e na modelagem de impactos resultantes do melhoramento da pecuária. Com o auxílio de projetos de melhoramento da pecuária, os objetivos de desenvolvimento econômico sustentável e de proteção ambiental, incluindo a mitigação da mudança climática, podem ser alcançados, e podem servir aos propósitos de atingir o “desenvolvimento limpo” e de promover, com meios economicamente efetivos, a redução das emissões.*

### **Improving the Efficiency of Cattle Production Aiming at Environmental Protection and Economic Development**

**Abstract.** *Throughout the world, ruminant livestock contribute large quantities of greenhouse gases to the atmosphere, albeit offering also opportunities for emission reduction through improvement in*

*productivity and efficiency. Projects designed to increase livestock production efficiency are economically and technically feasible in most countries, but they have seldom been implemented in developing countries. The implementation of efficiency enhancement measures in developing countries would result in more productive livestock and, thus, larger meat and milk supplies without having to increase the number of livestock. Several case studies of projects designed to improve productivity and efficiency of ruminant livestock management in developing countries are described, together with techniques for monitoring and verifying the amount of the emissions and modelling the greenhouse gas impact of improvements. Livestock management projects can help achieve the goals of sustainable economic development and environmental improvement, including climate change mitigation. Livestock management improvement would enable developing countries to attain “clean development”, while reducing emissions in a cost effective manner.*

## **Introdução**

A pecuária ruminante contribui com grandes quantidades de gases de efeito estufa em âmbito global, mas também apresenta oportunidades para a redução das emissões por meio do melhoramento da produtividade e da eficiência animal. Projetos concebidos para aumentar a eficiência da produção animal são econômica e tecnicamente viáveis na maioria dos países. Além de proporcionarem benefícios sociais e econômicos, projetos bem desenhados podem reduzir a emissão de metano por unidade de produto (leite, carne etc.) na medida que a energia do alimento é utilizada pela pecuária de forma mais eficiente à sua produção. A possibilidade de reduzir as emissões de metano tem sido demonstrada nos países desenvolvidos por meio do uso de insumos nutricionais de alta qualidade, de reprodução seletiva e de técnicas de manejo melhoradas. Semelhantes melhoramentos não têm sido alcançados em larga escala na maioria dos países em desenvolvimento. Em contraste, a demanda crescente de produtos animais nos países em desenvolvimento tem sido atendida principalmente pelo aumento dos rebanhos, ao invés do crescimento da produtividade. Se não forem feitos esforços para melhorar a produtividade e a eficiência animal nos países em desenvolvimento, a crescente demanda por alimentos pode levar a processos de degradação ambiental, gerada pela

expansão populacional de rebanhos, como erosão, má qualidade da água e emissão de gases de efeito estufa. Com a implementação de técnicas melhoradas de produção animal nos países em desenvolvimento, podem ser atingidos em paralelo os objetivos de desenvolvimento econômico sustentável e o melhoramento ambiental, como por exemplo a mitigação da alteração climática.

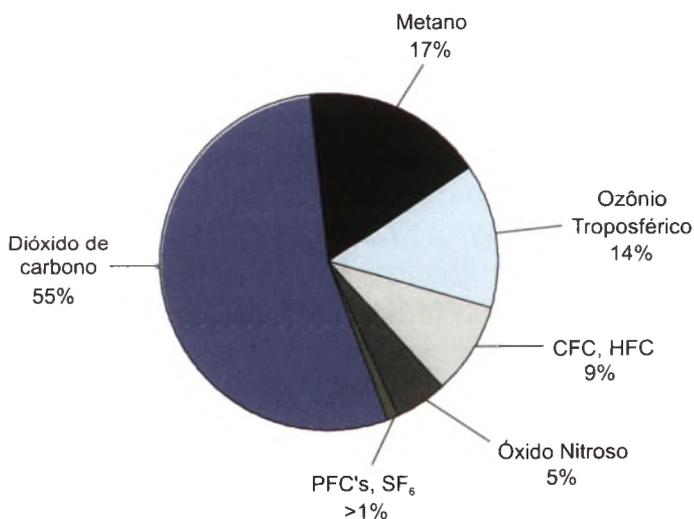
A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima está estabelecendo mecanismos para a obtenção da redução das emissões de gases de efeito estufa, por meio de colaboração internacional em projetos. Dois programas importantes são o *JI-Joint Implementation* (Implementação Conjunta) e o *Clean Development Mechanism* – CDM (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL). Ambos incentivam projetos conjuntos de redução de emissões entre países desenvolvidos e países em desenvolvimento, mas o CDM, em particular, tem a função de promover o desenvolvimento econômico. Este trabalho descreve como os projetos concebidos para aumentar a produtividade e a eficiência da pecuária ruminante podem servir ao duplo propósito de atingir o “desenvolvimento limpo” e as reduções de emissões de forma econômica em países em desenvolvimento.

## **Impacto Ambiental de Sistemas de Produção Animal**

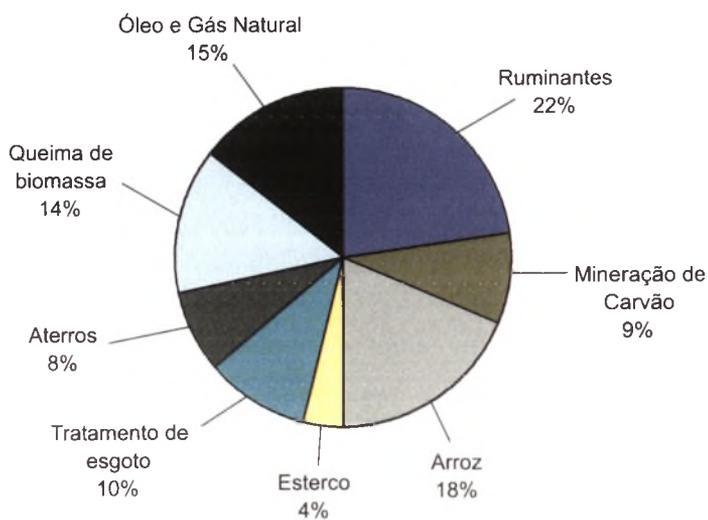
### *A emissão de gases de efeito estufa e a produção animal*

A produção pecuária apresenta tanto efeitos positivos como negativos sobre o ambiente. Um impacto que não foi largamente reconhecido até recentemente é a produção dos gases de efeito estufa: metano, óxido nitroso e dióxido de carbono. O metano e o óxido nitroso são, respectivamente, o segundo e o terceiro dos gases de efeito estufa mais predominantes, e são, respectivamente, 21 e 310 vezes mais eficazes na captura de calor da terra que quantidades equivalentes de massa de dióxido de carbono (IPCC, 1996) (ver Figura 1). Embora o aquecimento global seja principalmente causado por emissões de CO<sub>2</sub> geradas por combustível fóssil, a fermentação entérica no sistema digestivo da pecuária ruminante é uma das maiores fontes de emissões antrópicas globais de metano, estimada em 65-100 Tg (milhões de toneladas métricas) ao ano (ver Figura 2). Sistemas de manejo de esterco que armazenam grandes quantidades de material na forma úmida ou de lodo também podem representar

uma fonte significativa de emissões de metano, especialmente onde se pratica a alimentação da pecuária em escala industrial, em instalações internas.



**Figura 1** - Contribuição de gases de origem antrópica para o aumento do efeito estufa  
**Fonte:** IPCC, 1996



**Figura 2** - Emissões globais de metano, de origem antrópica por fonte  
**Fonte:** EPA, 1994

Os fertilizantes comerciais, os sistemas de manejo de esterco, o cultivo de forrageiras leguminosas tais como alfafa e trevos, e os dejetos que a pecuária deposita nos solos de pastagem são fontes importantes de emissões de óxido nítrico a partir dos sistemas de produção animal. Além disso, a derrubada de áreas de floresta para agricultura, a degradação de solos em decorrência de práticas de cultivo, a superpastoreio de pastagens e a queima de resíduos agrícolas e de savanas liberam dióxido de carbono para a atmosfera.

### *Sistemas de Produção dos Países em Desenvolvimento*

A produção animal em países em desenvolvimento satisfaz uma grande variedade de necessidades humanas. Apesar da importância do múltiplo uso de animais nesses países – por exemplo como força de tração na aragem dos campos e no transporte de produtos; como produtores de esterco usado como combustível ou fertilizante, e outros propósitos, tais como a poupança da família ou o pagamento de dotes – a eficiência em termos de produção de carne e de leite é geralmente muito baixa (Preston & Leng, 1987). Consequentemente, os países em desenvolvimento contribuem com mais de metade das emissões globais de metano geradas pela criação de animais, ao passo que são responsáveis por uma parcela muito pequena da produção mundial de carne e de leite (EPA, 1993).

Os baixos níveis de produção por animal nos países em desenvolvimento são o resultado de uma combinação de fatores, tais como a baixa qualidade dos animais – no sentido de baixo potencial genético, variações extremas na qualidade e na disponibilidade de alimentos, práticas ineficazes de produção animal, suplementação limitada de alimentos e minerais, e uma carência de infraestrutura (insumos, mercados etc.) para dar suporte à produção pecuária. Como animais adequadamente nutridos e de boa criação produzem menos metano por unidade de produto do que animais mal nutridos e mal manejados, melhoramentos feitos na nutrição animal e nas características genéticas podem ter um efeito importante sobre as emissões de metano, ao mesmo tempo que aumentam a oferta de produtos animais nesses países.

A produção de metano é uma função da quantidade e qualidade do alimento ingerido, e pode ser calculada como sendo uma porcentagem da energia bruta (*GE- gross energy*) no alimento consumido pelo animal. Com alimentos

de alta digestibilidade, como grãos, pode-se prever que 3% a 5% da GE serão convertidos em metano. Por outro lado, dietas de menor digestibilidade, como forragens de má qualidade, geralmente resultam em índices de conversão de metano na faixa de 7% a 8% da GE, em climas temperados. Estudos recentes feitos na Austrália indicam, entretanto, que forragens tropicais podem resultar em índices de conversão de metano da ordem de 10% a 11% da GE (Kurihara et al., 1999). Essa grande variação nos índices de emissão de metano indica que o manejo nutricional pode desempenhar um papel importante no aumento da eficiência da utilização da GE e na redução das emissões de metano. Não é de se surpreender que a maior parte das oportunidades para reduzir a emissão de metano por ruminantes sejam encontradas nos países em desenvolvimento (Leng, 1991; ATI, 1992; Sollod & Walters, 1992).

Quando o nível de manejo é melhorado e os animais se tornam mais produtivos, são necessários menos animais para produzir quantidades equivalentes de carne e leite, os recursos alimentares são utilizados de forma mais eficiente, e as emissões de metano podem ser reduzidas. De uma perspectiva de desenvolvimento econômico, a melhora da eficiência da produção animal pode ajudar muito as economias agrárias a atenderem ao aumento da demanda de produtos animais e a diminuir deficiências nutricionais, ao mesmo tempo que pode proporcionar renda adicional a propriedades rurais.

### *Emissões Futuras da Produção Animal Global*

As populações humanas em crescimento e os padrões de vida em elevação estão aumentando rapidamente a demanda global por produtos animais. A continuar o ritmo atual de crescimento, a população global no ano 2020 irá consumir 110 milhões de toneladas de carne e 275 milhões de toneladas de leite por ano acima dos níveis atuais (Delgado et al., 1999). A maior parte do aumento do consumo, assim como da produção animal, deve ocorrer nos países em desenvolvimento. Essa demanda irá pressionar as bases tradicionais de recursos que não forem capazes de se expandir na mesma velocidade.

Nos últimos cinquenta anos, a estratégia para atender à demanda de produtos animais em países em desenvolvimento tem sido a de aumentar o número de cabeças de animais. Nas áreas mais pobres do mundo, as terras de pastagem de melhor qualidade estão sendo convertidas em áreas de cultivo para atender à demanda de cereais, legumes e culturas comerciais. Como

algumas áreas de cultivo degradadas são convertidas de volta em pastagens de má qualidade, a área total de pastagem pode permanecer estável, mas pode haver uma redução líquida na produtividade da pecuária de pasto. A menos que se tomem medidas para aumentar a eficiência de produção, as populações de animais aumentadas imporão algumas sobrecargas sobre o ambiente, inclusive maiores emissões de gases de efeito estufa.

Sem medidas de mitigação, pode-se esperar um grande aumento nas emissões globais de metano provenientes da pecuária. Assumindo-se que animais ruminantes produzam as 275 milhões de toneladas adicionais de leite, e cerca de 30 milhões de toneladas adicionais de carne, aos níveis de produção e emissão dos Estados Unidos, as emissões globais de gás de efeito estufa proveniente da pecuária ruminante aumentariam de pelo menos 138 milhões de toneladas métricas de equivalente de carbono<sup>1</sup> (MMTCE) anualmente. Esse aumento seria comparável a adicionar as emissões totais de um país como o Canadá ou a Austrália ao inventário global de gases de efeito estufa.

Essa estimativa pode ser conservadora, porque só contabiliza as fontes principais de metano e de óxido nitroso, mas não inclui emissões associadas a mudanças de uso da terra, produção de grãos para ração ou uso de combustível fóssil. Ela também supõe que a eficiência e a produção por animal estariam ao nível dos EUA, o que geralmente resulta em baixas emissões de metano por unidade de produto. Com a previsão de que a maior parte do aumento em demanda e em produção ocorra em países em desenvolvimento, a menos que a eficiência de produção melhore rapidamente, seriam necessários mais que o dobro dos animais previstos nesse cenário. É possível, então, que as emissões provenientes da pecuária possam exceder os níveis de hoje em 200 a 250 milhões de toneladas métricas de equivalente de carbono (MMTCE), na medida em que as populações animais sejam expandidas (Tabela 1).

---

<sup>1</sup> Equivalência de Carbono é o termo usado para comparar a força relativa de diferentes gases de efeito estufa usando o dióxido de carbono como gás de referência. A fórmula usa a razão entre o peso molecular do carbono pelo peso molecular do dióxido de carbono multiplicado pelo potencial de aquecimento global (GWP) do gás de efeito estufa. Exemplos: uma tonelada de metano =  $(12/44) \times 21 = 5,7$  toneladas de equivalente de carbono. Uma tonelada de óxido nitroso =  $(12/44) \times 310 = 84,5$  toneladas de equivalente de carbono.

**Tabela 1** - Emissões globais adicionais usando dados de produção e de emissão norte-americanas, referentes a 1997

---

Emissões nos E.U.A. referentes ao ano de 1997, provenientes da produção de 71 milhões de toneladas de leite e de 12 milhões de toneladas de carne:

8,6 MMTCE de metano entérico proveniente de gado leiteiro  
 24,0 MMTCE de metano entérico proveniente de gado de corte  
 4,6 MMTCE de metano de esterco proveniente de gado leiteiro  
 9,8 MMTCE de metano de esterco proveniente de gado de corte (solo de pastagem)

As seguintes emissões globais adicionais são baseadas na produção de 275 milhões de toneladas de leite e 30 milhões de toneladas de carne nos níveis de produção e de emissão dos E.U.A., em 1997:

33 MMTCE de metano entérico para o leite adicional  
 18 MMTCE de metano de esterco para o leite adicional  
 60 MMTCE de metano entérico para a carne adicional  
 27 MMTCE de óxido nitroso para a carne adicional

---

Total = 138 MMTCE /ano

---

**MMTCE:** milhões de toneladas métricas de equivalente de carbono.

## Melhorando o Rendimento da Pecuária

### *Tecnologias para Reduzir as Emissões de Metano Provenientes de Fermentação Entérica*

Existem algumas tecnologias de suplementação alimentar e de manejo reprodutivo bem estabelecidas, que podem reduzir as emissões de metano provenientes de ruminantes, por unidade de produto, tais como: defaunação ruminal, ionóforos, esteróides e outros promotores de crescimento, inseminação artificial, sincronização de cios e transferência de embriões. Entretanto, quase todas as tecnologias e práticas que apareceram no última metade de século seguiram concepções de processamento de alimento e reprodução animal muito

onerosas para os padrões dos países em desenvolvimento. A inviabilidade econômica e técnica dessas medidas, além da incompatibilidade cultural, tem impedido sua implementação em sistemas de produção animal tradicionais de países em desenvolvimento.

Cientistas estão tentando desenvolver tecnologias avançadas, incluindo microorganismos geneticamente modificados do rúmen e vacinas anti-metanogênese, que poderiam inibir a produção de metano por cabeça. Muitas das tecnologias mais promissoras orientadas a suprimir a metanogênese ainda estão nos primeiros estágios de desenvolvimento. Mesmo que essas tecnologias sejam comprovadas do ponto de vista técnico, os custos associados podem ser tão altos que as tornem acessíveis apenas às grandes fazendas, o que pode limitar seu uso em países em desenvolvimento. Finalmente, biotecnologias, medicamentos e outros produtos químicos que já são usados na produção animal causam preocupação entre alguns consumidores. A administração de outros produtos ao gado para suprimir a emissão de metano poderá ser percebida como ameaça à segurança do alimento ou ao bem estar dos animais.

### *Oportunidades e Desafios nos Países em Desenvolvimento*

Foram documentadas algumas práticas econômicas para melhorar a eficiência da pecuária ruminante e para reduzir as emissões de metano por unidade de produto nos países em desenvolvimento. Elas compreendem principalmente práticas de melhoramento da dieta, como picagem da palha, tratamento da palha com uréia ou amônia, e outras formas de suplementação alimentar estratégica. O melhoramento genético também ajuda a melhorar o rendimento produtivo, e pode ser obtido através de cruzamentos entre raças. Entretanto, dada a fragilidade dos sistemas de produção animal tradicionais, deve-se tomar cuidado para garantir que os requisitos nutricionais e de manejo sejam adequadamente combinados na criação do gado. A introdução de programas sofisticados de alimentação e reprodução nos países em desenvolvimento pode ser problemática se a nutrição, a reprodução e outras operações de manejo não funcionarem no mesmo nível.

A introdução de tecnologias de produção de alto custo nos sistemas de produção animal de países em desenvolvimento apresenta riscos econômicos e sociais reais aos pequenos produtores. Incapazes de competir no mercado, esses produtores podem se ver sem seu sistema de suporte à pecuária e, dadas

às condições locais, sem um meio de vida alternativo economicamente viável. É importante reconhecer, entretanto, que a utilização ineficiente de recursos, como, por exemplo, práticas ineficazes de reprodução ou alimentação, podem ser custosas a qualquer sistema agro-econômico.

A superação das barreiras econômicas que inibem o fluxo de tecnologias de melhoramento do gado para os países em desenvolvimento requer que essas tecnologias sejam projetadas apropriadamente, escalonadas adequadamente e gradualmente infundidas nos sistemas locais, ao invés de serem impostas de forma dramática. A introdução de uma tecnologia apropriada, ou ligeiramente acima do nível de sofisticação da produção animal local permite que o setor se modifique de acordo com o seu próprio ritmo. Este tipo de abordagem leva em conta a iniciativa e a competência de todos os atores do quadro econômico local, compreendendo pecuaristas, fornecedores, comerciantes, processadores, distribuidores e outros. O resultante crescimento na eficiência produtiva da economia rural aumenta a riqueza da população rural porque aumenta o valor de sua atividade econômica. Isso aumenta a demanda do consumidor rural e cria oportunidades de integração da economia e das sociedades rurais com as urbanas. De uma maneira bem tangível, portanto, a adaptação de tecnologias apropriadas para o melhoramento gradual da produtividade do setor pecuário local pode ultrapassar obstáculos importantes ao desenvolvimento sustentado, ao evitar as repercussões sociais, políticas e ambientais negativas de uma expansão econômica súbita.

## **Medindo os Benefícios**

### *Verificação de Benefícios Ambientais de Projetos Pecuários*

A capacidade de verificar as reduções de emissão resultantes do melhoramento de eficiência é crítica para a avaliação ambiental de projetos pecuários, e começa com o desenvolvimento de fatores de emissão precisos e específicos do país, para cada tipo de animal e sistema de produção. Uma técnica desenvolvida na Washington State University (Johnson et al., 1994), usa o SF<sub>6</sub> como gás traçador para fornecer uma medição precisa do metano emitido pelo gado em condições naturais (Figura 3).



**Figura 3** - Vacas equipadas com recipientes e cabrestos para a medição de metano

Com o uso de um dispositivo de coleta de amostra feito com um tubo de cloreto de polivinila (PVC) modelado em um recipiente em forma de U, de extremidades vedadas, sem ar e com uma válvula para controle de gases, coletam-se do gado amostras de ar contendo  $\text{CH}_4$  e  $\text{SF}_6$  a intervalos regulares (p.ex. 6, 12 ou 24 horas). O método de traçador assume que o  $\text{SF}_6$  simula exatamente o  $\text{CH}_4$  produzido no rúmen, e considera a diluição dos gases emitidos pelo animal ao se misturar com o ar ambiente.<sup>1</sup> A taxa de emissão de metano pode ser facilmente calculada, aplicando-se a taxa conhecida de liberação de  $\text{SF}_6$ , de um tubo de permeação colocado no rúmen, às quantidades medidas de  $\text{SF}_6$  e  $\text{CH}_4$ . Os tubos de permeação de  $\text{SF}_6$  são fabricados em laboratório e projetados para terem uma taxa de liberação de 500-1.000 ng/min. O recipiente pode ser facilmente desacoplado de um tubo capilar apoiado sobre um cabresto, que se estende até logo acima da boca e das narinas do animal, permitindo que as amostras sejam facilmente medidas em um cromatógrafo de gás. A exatidão, a durabilidade e a economia da técnica do  $\text{SF}_6$  a torna atraente para o uso em países em desenvolvimento.

<sup>1</sup> Veja a página da web da U.S. EPA: [www.epa.gov/rlep/interactive/methane/index.htm](http://www.epa.gov/rlep/interactive/methane/index.htm).

Os desenvolvedores dessa técnica têm dado assistência a cientistas de diversos países por meio de sessões de treinamento, na Washington State University bem como no campo, em países que os convidaram. A implementação dessa técnica em projetos de melhoramento pecuário ajuda a melhorar a precisão da estimativa de emissões das populações animais, e a avaliar a eficácia dos esforços de redução de emissão.

A técnica de baixo custo do traçador  $SF_6$  para medir emissões de metano por ruminantes em condições de pastagem e campo aberto nos EUA foi uma importante descoberta pioneira para a medição de emissões provenientes da pecuária sob condições difíceis nos países em desenvolvimento. Ela tem possibilitado a coleta de dados de rebanhos onde pouca ou nenhuma informação existia.

### *Modelagem de Populações e de Emissões*

Dados de emissão obtidos localmente a partir de estudos de medição direta e dados de atividade (p.ex. números de população animal, níveis de produção e características alimentares) podem ser utilizados para avaliar os impactos ambientais de um projeto. O uso desses dados em modelos de planilhas bem projetados é um grande melhoramento em relação aos métodos anteriormente usados, que confiavam em dados obtidos em regiões temperadas e sua extrapolação.

O “Modelo de Análise da Pecuária” (*LAM- Livestock Analysis Model*) é uma ferramenta implementada em planilha eletrônica, recuperável por um navegador de internet, que pode ser usada para avaliar a eficácia dos projetos pecuários em quatro etapas, como segue:

1. **Calibrar o modelo:** Usando dados sobre níveis de produção e características animais de um ano recente (por exemplo, 1998), simular a população e a produtividade da pecuária em questão. Os *inputs* devem ser verificados e confirmados para assegurar que o modelo produza uma simulação da população animal que seja consistente com os dados disponíveis para aquele ano.
2. **Desenvolver uma linha de base:** Utilizando níveis de produção e características animais projetadas para um ano futuro (p.ex., 2010), simular uma linha de base da população animal e das emissões de metano esperadas.

3. **Simular a intervenção:** Primeiro, definir como a intervenção afetaria os alvos de produção, as características da produção ou as características do metano. Por exemplo, o fornecimento de nutrientes melhorados para vacas leiteiras aumentaria a produção de leite por lactação, reduziria o intervalo entre lactações sucessivas, e aumentaria a digestibilidade do alimento. Essas novas características são informadas no LAM, que simula então a população e as emissões de metano que resultariam da implementação dessa intervenção.
4. **Avaliar impactos:** O impacto da intervenção é estimado como sendo a diferença entre a simulação da linha de base e a simulação da intervenção.

Os cálculos de emissão de metano nesse modelo são muito semelhantes aos métodos do IPCC que são baseados do sistema de energia líquida. Os valores medidos podem substituir os valores *default* para melhorar a precisão das estimativas.

## Estudos de Caso

O melhoramento da eficiência da produção pecuária nos países em desenvolvimento por meio da introdução de tecnologia requer consideração das condições econômicas e culturais exclusivas de cada país, dando-se atenção especial aos recursos técnicos, financeiros, humanos e naturais disponíveis. Foram conduzidos estudos em países em desenvolvimento para identificar oportunidades para a redução de emissões e melhoramento da eficiência da produção pecuária. Além da estimativa de reduções potenciais de emissão, foram estudadas as cadeias produtivas do setor, ao mesmo tempo que os processos empresariais de produção, marketing, distribuição, vendas e consumo de produtos finais foram mapeados e analisados para determinar a viabilidade do projeto. Os estudos levaram ao desenvolvimento de projetos completos e bem sucedidos de mitigação de emissões provenientes da pecuária.

### *Brasil*

O Brasil tem grande potencial para melhorar a produtividade pecuária e obter reduções da emissão de metano por ruminantes. Um estudo de 1994 da indústria leiteira nas regiões Nordeste e Sul do país identificou os atores principais

ligados ao setor e descreveu a extensão à qual eles evitariam ou acelerariam a adoção de intervenções para aperfeiçoamento da produtividade. O estudo analisou sistemas de produção pecuária para determinar níveis de base de eficiência e produtividade, e até onde as melhoras nutricionais poderiam melhorar a produção e reduzir as emissões.

O estudo descobriu que os fazendeiros com maior potencial para melhorar a eficiência e a produtividade são produtores de pequena escala com um rebanho médio de 10 vacas, que representam cerca de 70% da base produtora do Brasil (ATI, 1994). Um projeto que vise pequenos produtores, com tecnologias de baixo custo de suplementação alimentar, poderia ajudar essa parcela de produtores a começar a entender esse potencial.

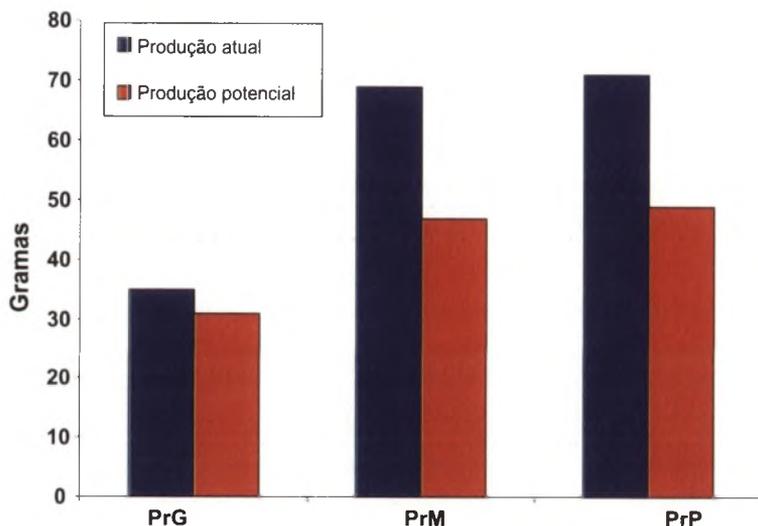
A análise concluiu que poderiam ser implementados projetos visando o fornecimento aos pecuaristas de suplementos alimentares de alta qualidade, formulados a partir de ingredientes disponíveis na região, para complementar forrageiras de pastagem como o capim Caatinga, a *Leucaena*, a ervilha Butterfly, o capim Buffel e o capim Mandioca. Tais projetos poderiam resultar, para o Nordeste do Brasil, nos seguintes impactos nas fazendas:

- Os grandes produtores elevariam a produção de leite<sup>1</sup> em um litro por dia por vaca, e reduziriam as emissões de metano em 4 g por litro de leite (13%).
- Os produtores de média escala elevariam a produção de leite em até 1,5 litros (30%) e reduziriam as emissões de metano em 22 g por litro (32%).
- Os pequenos produtores de leite seriam capazes de aumentar a produção diária em 3 a 4 litros (40% a 100%) de leite e de diminuir as emissões de metano em 22g a 30g por litro (32% a 42%).

A produção diária de leite por vaca nos sistemas de pequena escala do Sul do Brasil poderia aumentar em 2 litros (50%), ao passo que as emissões de metano por litro poderiam cair em 35 g a 40 g por litro (55% a 58%). (Figuras 4 e 5).

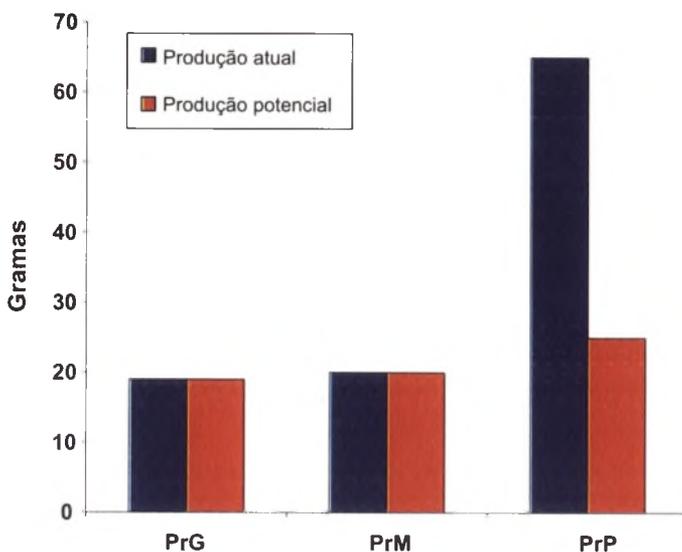
---

<sup>1</sup> Leite com 4% de gordura.



**Figura 4** - Metano produzido por litro de leite no Nordeste do Brasil (PrG= produtores de grande escala; PrM = Produtores de Média Escala; PrP = Produtores de Pequena Escala)

Fonte: ATI, 1994



**Figura 5** - Metano produzido por litro de leite no Sul do Brasil (PrG = produtores de grande escala; PrM = Produtores de Média Escala; PrP = Produtores de Pequena Escala)

Fonte: ATI, 1994

Supondo que os pequenos produtores manejem rebanhos com uma média de dez vacas produtoras durante o ano todo, esses números indicam que se um programa extenso de melhoramento das práticas de produção atingir apenas 1.200 fazendeiros no Nordeste, níveis de produção de leite de 125.000 litros por dia poderiam ser sustentados com uma redução anual de metano da ordem de 1.000 toneladas métricas. Um programa semelhante que atinja 1.300 fazendeiros no Sul poderia sustentar uma produção de 80.000 litros por dia com uma redução anual de metano de 1.000 toneladas métricas.

Além dos benefícios diretos do projeto para a comunidade de pequenos produtores, os melhoramentos na eficiência do mercado beneficiariam também os produtores de média e grande escala, e reduziram ainda mais as emissões de metano provenientes da pecuária no Brasil.

### *Índia*

Aproximadamente 85% das 200 milhões de cabeças de gado e 80 milhões de búfalos da Índia são mantidos por pequenos fazendeiros e por mulheres, para o fornecimento de força de tração, leite e esterco usado como combustível e fertilizante (FAO, 1989; Reuss et al., 1990; ATI, 1992). Esses ruminantes consomem uma dieta principalmente baseada em palha, que canaliza até 15% da energia digerível (DE) contida no alimento para a formação de metano, comparado a cerca de 7% quando o rúmen é eficiente (Leng, 1991).

Pesquisas feitas na Índia mostram que o fornecimento de suplementos alimentares bem formulados provenientes de produtos disponíveis localmente, como melaço, farelo, torta de sementes oleaginosas e uréia podem reduzir as emissões de metano em 25% a 75% por unidade de produto (Leng, 1991). Esse aumento na eficiência pode traduzir-se em grandes reduções nas emissões, quando ocorrem também reduções no número de animais. Essa relação foi demonstrada na Índia durante a década de 1980 e início de 1990, quando os fazendeiros indianos começaram a criar menos animais mas de melhor qualidade, em áreas onde estavam sendo introduzidas tecnologias de suplementação alimentar (Mitra, 1991). Olhando para o futuro, o potencial total das reduções de metano tecnicamente viáveis na Índia pode chegar a até 25%, com possível redução das emissões de metano do país em até 1,2 milhões de toneladas métricas por ano (ATI, 1992).

Um projeto de melhoramento da pecuária, custeado por duas empresas americanas de serviço público, foi implementado em 1994 por especialistas do *Global Livestock Group*<sup>1</sup> (GLG) com os objetivos de melhorar a produtividade da pecuária e reduzir as emissões de metano. Aplicando as experiências de décadas de pesquisa, desenvolvimento e marketing em países em desenvolvimento, foi estabelecida uma operação de fabricação de suplementos alimentares a preços razoáveis para pequenos produtores de leite no Estado de Gujarat. Os suplementos são distribuídos aos fazendeiros locais através dos canais tradicionais de marketing das cooperativas agrícolas locais. O projeto excedeu as expectativas em seus primeiros anos, reduzindo as emissões de metano em até 70% por unidade de produto e ao mesmo tempo aumentando a produtividade dos agricultores em mais de 600 povoados. Além das reduções de metano, o projeto está registrando a maior ingestão alimentar por animal, redução do desperdício de forragem, maior produção de leite e manteiga, maior renda para os produtores, melhor saúde dos animais e melhoramento da eficiência reprodutiva do gado.

### *Zimbabwe*

No Zimbabwe, o GLG colaborou com a U.S.EPA, a Universidade Estadual de Washington em Pullman, Washington, a Estação Henderson de Pesquisa no Zimbabwe, em um projeto zimbabuense de prensagem de sementes oleaginosas, para testar alimentos melhorados à base de torta de sementes de girassol. Esse esforço pioneiro demonstrou com sucesso a adaptação da avançada tecnologia de monitoramento de metano com SF<sub>6</sub> às condições desafiadoras de um país em desenvolvimento.

O primeiro grande estudo na Estação Henderson de Pesquisa visou o potencial de uso de torta de sementes de girassol nos sistemas locais de alimentação. Embora a torta de girassol seja um alimento de grande valor para ruminantes em um sistema de alimentação comercial balanceado, a torta de sementes que é produzida em prensas operadas manualmente pode ter resíduos

---

<sup>1</sup> O Grupo de Pecuária Global (*Global Livestock Group, Inc.*) foi incorporado em abril de 1999. Em 1994, quando o Projeto Leiteiro da Índia foi implementado, o Grupo estava operando como Programa de Produtores de Pecuária Global (*Global Livestock Producers Program*) dentro do *Appropriate Technology International, Inc.*, uma organização de desenvolvimento sem fins lucrativos.

de óleo de até 20%. Ainda que considerado uma valiosa fonte de energia para o gado, o elevado conteúdo de óleo pode interferir com a função do rúmen, se ingerido em grandes quantidades. Quando fornecidas em níveis adequados, entretanto, as gorduras insaturadas existentes na torta podem atuar como um sumidouro de hidrogênio que reduz as emissões de metano, enquanto fornecem energia para impulsionar a produção. O estudo descobriu que uma dieta diária de 3 kg de torta de sementes de girassol prensadas administrada às vacas leiteiras em produção é excelente quanto à utilização do alimento e ao estímulo à produção diária de leite. A produção de leite cresceu em cerca de 30% (4,1 *versus* 3,4 kg leite /dia), ao passo que as emissões de metano foram reduzidas em quase 50% por unidade de produto (37 g *versus* 69 g de CH<sub>4</sub>/kg leite) (Mupeta, 1999, dados não publicados).

Esse projeto estabeleceu o primeiro laboratório de monitoramento de metano e produziu os primeiros dados de metano medidos diretamente, na África, com o uso da tecnologia de SF<sub>6</sub>. As descobertas do projeto demonstram que há bom potencial para a redução das emissões de metano proveniente do gado no Zimbábue. Cientistas do país e o GLG estão desenvolvendo mais esforços, transformando-os em um projeto completo de melhoramento da pecuária e de mitigação de metano.

## Conclusão

As descobertas e as experiências promissoras ressaltadas neste trabalho indicam que se pode obter desenvolvimento econômico e benefícios ambientais simultaneamente, combinando intervenções tecnológicas apropriadas com sistemas de produção de ruminantes em países em desenvolvimento. Os projetos de melhoramento da pecuária ruminante, que agora podem ser iniciados com o apoio de capital dedicado aos gases de efeito estufa, podem ser economicamente auto-sustentados. Os resultados de numerosos estudos e projetos indicam que produtos econômicos para alimentação animal e melhoramentos da qualidade animal marcam um ganho para o ambiente porque reduzem as emissões de gás metano; um segundo ganho para produtores locais devido à maior produção de leite e de carne; e um terceiro ganho para as economias nacionais, pelo aumento no fornecimento de produtos animais de produção local e pela redução das importações de alto custo de alimento.

## Referências

ATI. *Assessment of the pre-feasibility of strategic supplementation as an opportunity for reducing methane emissions in gujarat state*, Washington, DC: Appropriate Technology International, 1992.

ATI. *Reducing Methane Emissions from Ruminant Livestock: Brazil Pre-feasibility Study*. Washington, DC: Appropriate Technology International, 1994.

DELGADO, C.; ROSEGRANT, M.; STEINFELD, H.; EHUI, S.; COURBOIS, C. *Livestock to 2020: the next food revolution*. Washington, DC: International Food Policy Research Institute, 1999.

EPA. *Options for reducing methane emissions internationally, Volume I, Technological options for reducing methane emissions, report to congress*. Washington, DC: Atmospheric Pollution Prevention Division, Office of Radiation, U.S. Environmental Protection Agency, 1993.

EPA. *International anthropogenic methane emissions: estimates for 1990, Report to Congress*. Washington, DC: Atmospheric Pollution Prevention Division, Office of Radiation, U.S. Environmental Protection Agency, 1994.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). *FAO Yearbook*, Rome: Food and Agriculture Organization, 1989.

IPCC. *Climate change 1995, the science of climate change*, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge: University Press, 1996.

JOHNSON, K.; HUYLEYER, M.; WESTBERG, H.; LAMB, ZIMMERMAN P. Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a SF<sub>6</sub> tracer technique, *Environmental Science & Technology*, v. 28, 1994.

KURIHARA, M.; MAGNER, T.; HUNTER, R.A.; MCCRABB, G.J. Methane production and energy partition of cattle in the tropics, *British Journal of Nutrition*; v. 81, p. 227-234. 1999.

LENG, R.A. *Improving ruminant production and reducing methane emissions by strategic supplementation*. Washington, DC: US EPA, 1991.

MITRA, A.P. *Global change: greenhouse gas emissions in India*, New Delhi: Council of Scientific and Industrial Research, 1991.

PRESTON, J.R.; LENG, R.A. *Matching ruminant production systems with available resources in the tropics and sub-tropics*, Australia: Penambul Books, 1987.

REUSS, SHARREN; ELLIS, JAMES; WARD, GERALD; SWIFT, DAVID. *Global ruminant livestock production systems: estimated 1988 methane emissions*. Prepared by the Natural Resource Ecology Laboratory, Colorado State University, for the U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC: US EPA, 1990.

SOLLOD, A.E.; WALTERS, M.J. *Reducing ruminant methane emissions in China*. Prepared for the US Environmental Protection Agency, Washington, DC: Global Change Division, 1992.

## Cultivo de Arroz Irrigado por Inundação como Fonte de Metano

MARIA LAURA TURINO MATTOS, JOSÉ FRANCISCO DA SILVA MARTINS  
*Embrapa Clima Temperado – Pelotas, RS, Brasil*

**Resumo.** O arroz irrigado por inundação ocupa cerca de 1 milhão de hectares, nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, área que fornece aproximadamente 50% da produção nacional. No estabelecimento de estratégias para aumentar a produção de arroz irrigado por inundação, seja através do aumento de produtividade da área atualmente cultivada ou da expansão desta, deve ser assegurada a preservação dos agrossistemas para as gerações futuras. A mineralização biogênica de materiais orgânicos em ecossistemas anóxicos, incluindo as áreas de cultivo de arroz irrigado por inundação, é a fonte mais importante de  $\text{CH}_4$  atmosférico. Neste capítulo serão apresentados os sistemas de cultivo de arroz irrigado por inundação praticados nos estados do Sul do Brasil. Serão abordados os processos que levam à emissão de metano em áreas de cultivo de arroz irrigado e discutidas as possíveis estratégias de redução dessa emissão em tais agrossistemas.

### Flooded Rice Cropping as a Source of Methane

**Abstract.** Flooded rice cropping occupies nearly one million hectares in the states of Rio Grande do Sul and Santa Catarina, which account for roughly 50% of the domestic rice production. In developing strategies to increase rice production through productivity increases or farmed area expansion, an essential consideration should be the conservation of agrosystems for future generations. The biogenic mineralisation of organic compounds in anoxic ecosystems, including flooded rice areas, is main source of atmospheric methane. The main flooded rice cropping systems practised in the southern states of Brazil are presented in this chapter. Processes related to methane emissions and possible emission reduction strategies are also discussed.

## Introdução

O arroz, um dos mais versáteis alimentos, é a base de muitos pratos da culinária mundial. Mais de 50% da população humana utiliza o arroz como alimento básico. Em 2000, haviam 148 milhões de hectares ocupados com o cultivo do cereal, atingindo uma produção global de 597 milhões de toneladas (FAO, 2001). Segundo a FAO, com base na tendência de um rápido crescimento da população, nos próximos vinte anos, haverá necessidade de aumentar substancialmente a produção mundial de arroz, o que pode corresponder a um acréscimo de demanda da ordem de 300 milhões de toneladas do cereal. Porém, a perspectiva é de que o aumento da produção mundial de arroz venha a ocorrer sem muita expansão da atual área cultivada (International Rice Research Institute, 1989), principalmente do sistema de cultivo de arroz irrigado por inundação.

O arroz irrigado por inundação é uma cultura de destaque no sul do Brasil, onde ocupa cerca de 1 milhão de hectares, nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, área que fornece aproximadamente 50% da produção nacional do cereal. Neste contexto, o Rio Grande do Sul, maior produtor nacional de arroz, com uma área de 934.466 ha (IRGA, 2000), assume papel decisivo para o abastecimento do mercado interno, podendo vir a pleitear mercados emergentes na Europa Oriental e na Ásia (Azambuja et al., 1996). Porém, no estabelecimento de estratégias para aumentar a produção de arroz irrigado por inundação, seja através do aumento de produtividade da área atualmente cultivada ou da expansão desta, deve ser vislumbrada a necessidade de preservação dos agrossistemas para as gerações futuras. Portanto, além da melhoria econômica, baseada no aumento da quantidade e qualidade do arroz produzido, deve ser visado também o equilíbrio ambiental, visto que a interação destes dois componentes é que, de fato, poderá fundamentar o estabelecimento da sustentabilidade no contexto da exploração orizícola, atendendo, de forma mais ampla, a demanda de desenvolvimento social. Dentro desse enfoque, este capítulo objetiva apresentar os principais sistemas de cultivo de arroz irrigado por inundação praticados no Brasil, sobretudo nos estados da região Sul do Brasil, e discutir sobre os processos de formação do metano em áreas de cultivo de arroz irrigado e possíveis estratégias de redução da emissão.

## Sistemas de Manejo de Solos de Arroz Irrigado

Nas áreas de cultivo de arroz irrigado por inundação no Rio Grande do Sul e Santa Catarina, predominam solos das classes Planossolos e Gleissolos (Embrapa, 1999), sendo conhecidos como solos de várzea. Constituem-se em solos mal drenados, formados em áreas de topografia plana e suave ondulada. São locais favoráveis ao acúmulo e à permanência da água durante certos períodos do ano, como por exemplo no inverno. As restrições mais severas são devidas às propriedades físicas. O horizonte Bt ou Btg, quando pouco profundo, devido a ser extremamente duro, muito firme e, conforme o caso, muito plástico e muito pegajoso, dificulta o preparo do terreno e requer máquinas com boa capacidade de tração. O adensamento desses horizontes pode ser tão intenso que limita a drenagem interna da água, determinando a vigência de condições redutoras durante significativo período do ano. Esse adensamento pode também ser limitante ao aprofundamento do sistema radicular das plantas, o qual, a partir de uma determinada densidade aparente, encontra grande dificuldade de penetração. Ademais, o estado de adensamento do Bt ou Btg simultâneo com a textura muito mais leve no horizonte sobrejacente e a particularidade do súbito contraste de propriedades entre eles, cria uma descontinuidade. Às limitações já apontadas, pode ser acrescido o agravamento da erodibilidade, mesmo quando modestas as declividades das áreas desses solos. Apesar das restrições decorrentes de propriedades físicas, estes solos são muito utilizados no Rio Grande do Sul, para cultivo de pastagens e de arroz (Oliveira, 1992).

Nesse Estado, os solos de várzeas abrangem extensas áreas, principalmente nas regiões fisiográficas da Planície Costeira, Depressão Central e Campanha, atingindo cerca de 6 milhões de hectares, aproximadamente 21% da área total do Estado (Gomes et al., 1996), onde predominam quatro sistemas de cultivo de arroz irrigado. Do total de 963 mil hectares cultivados com arroz irrigado na safra de 1998/99, cerca de 6,6%, 9,0%, 35% e 49% foram ocupados com o sistema de plantio direto (Figura 1), pré-germinado (Figura 2), cultivo mínimo e cultivo convencional (Figura 3), respectivamente (IRGA, 1999). Estes sistemas de cultivo diferenciam-se, principalmente, quanto ao preparo do solo, método de semeadura e manejo inicial da água de irrigação (Gomes et al., 1996).



**Figura 1** - Lavoura de arroz irrigado por inundação sob o sistema de cultivo plantio direto. Pelotas-RS

Fonte: Fotografia de José Francisco da Silva Martins



**Figura 2** - Lavoura de arroz irrigado por inundação sob o sistema pré-germinado. Pelotas-RS

Fonte: Fotografia de Maria Laura Turino Mattos



**Figura 3** - Lavoura de arroz irrigado por inundação cultivada no sistema convencional. Pelotas-RS

Fonte: Fotografia de José Francisco da Silva Martins

Enquanto no sistema convencional há o revolvimento do solo visando a melhoria das condições físicas (aumento de porosidade e retenção de água) e a eliminação da vegetação nativa, o sistema de plantio direto preconiza o mínimo de mobilização do solo e a manutenção, na maior parte do tempo, de resíduos vegetais na superfície do solo e rotação de culturas. O plantio direto, que também é considerado uma alternativa capaz de viabilizar a exploração racional e econômica de culturas de sequeiro em várzeas (Gomes et al., 1996), através do acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo, favorece o aumento da atividade microbiana, acelera os processos de mineralização dos compostos orgânicos, alterando a dinâmica da matéria orgânica e a liberação de nutrientes do solo, conseqüentemente, constituindo um sistema conservacionista do solo.

O cultivo mínimo, envolvendo apenas o revolvimento de estreita camada superficial do solo, visa a corrigir o micro-relevo, estimular a germinação das sementes e a emergência de plantas daninhas, sobre as quais, após dessecadas com herbicidas, é realizada a semeadura direta de arroz. O cultivo de arroz pré-germinado, que necessita da formação de lama e, posteriormente, do nivelamento e alisamento da superfície do solo, para o recebimento das sementes, constitui o sistema de cultivo predominante em Santa Catarina, sendo bastante utilizado em pequenas propriedades, ocupando 95% da área de arroz irrigado por inundação daquele Estado (Gomes & Petrini, 1996). Devido à limitada extensão das áreas apropriadas ao cultivo de arroz pré-germinado, as áreas disponíveis são intensamente utilizadas, tanto ao longo dos anos, como para obtenção de duas safras anuais. O cultivo contínuo de áreas com arroz pré-germinado tem demandado a utilização de muitos insumos, especialmente fertilizantes nitrogenados, herbicidas e inseticidas.

Nos diferentes sistemas de cultivo de arroz irrigado, a manutenção de uma lâmina de água sobre a superfície do solo exerce uma série de influências relacionadas aos aspectos físicos e fisiológicos das plantas, às condições físicas, químicas e biológicas do solo, bem como ao controle de plantas daninhas e de algumas pragas e doenças (Gomes & Petrini, 1996).

## Emissão de Metano em Áreas de Cultivo de Arroz Irrigado por Inundação

Estima-se que as áreas de cultivo de arroz irrigado por inundação cubram mundialmente uma superfície de  $1.55 \times 10^6 \text{ km}^2$  (FAO, 2000). As estimativas de contribuição dessas áreas para o  $\text{CH}_4$  global emitido ainda são imprecisas, mas numerosos estudos apontam para uma média aproximada de 60 Tg de emissão de metano  $\text{ano}^{-1}$ , variando em uma faixa de 20-100 Tg  $\text{ano}^{-1}$  (IPCC, 1995).

Em campos de arroz inundados, a matéria orgânica é degradada a produtos finais gasosos como  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ . A quantidade de metano de  $\text{CH}_4$  emitido de arrozais inundados para a atmosfera resulta do balanço de dois processos opostos: (1) produção de metano por bactérias metanogênicas, que são estritamente anaeróbias, e (2) oxidação de metano no solo, conduzida pelas bactérias metanotróficas, nas zonas oxigenadas do ecossistema (interface água-solo e rizosfera do arroz) (Aulakh et al., 2001). As bactérias metanotróficas utilizam o metano como substrato, sendo ativas em interfaces óxido-anóxicas, onde os gradientes de concentração de metano e oxigênio se sobrepõe (Aulakh et al., 2001).

A presença de bactérias metanogênicas e metanotróficas em solos de arroz foi indiretamente demonstrada pela avaliação da produção de  $\text{CH}_4$  e sua oxidação (Schutz et al., 1989). Porém, a microflora envolvida é pouco conhecida, sendo que três gêneros de bactérias metanogênicas (*Methanobacterium*, *Methanospirillum*, *Methanobrevibacter*) e dois gêneros de metanotróficas (*Methanospirillum*, *Methanocorpusculum*) foram isolados de solos com cultivo de arroz (Joulian et al., 1996).

As principais vias de produção de metano em solos inundados são: (1) a redução de  $\text{CO}_2$  com  $\text{H}_2$  (derivado de compostos orgânicos), ácidos graxos, ou álcool, como doadores de hidrogênio, ( $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$ ), e (2) a descarboxilação (transmetilação) de ácido acético ou álcool metílico pela bactéria produtora de metano ( $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$ ) (Aulakh et al., 2001, Conrad, 1989). Experimentos radiomarcados confirmaram que o  $\text{CH}_4$  foi essencialmente produzido a partir de acetato, originado de resíduos de arroz, algas e plantas aquáticas incorporadas ao solo, húmus do solo e produtos de autólise ou exsudatos de raízes de arroz (Neue & Roger, 1994).

A produção de  $\text{CH}_4$  ocorre somente em condições altamente reduzidas (potencial redox de -200 mV). Alagamentos intermitentes ou drenagens diminuem as emissões de  $\text{CH}_4$  (Sass et al., 1992), que também são altamente dependentes da quantidade de carbono orgânico disponível, proveniente da palha de arroz adicionada ao solo (Schutz et al., 1989; Yagi & Minami, 1990; Sass et al., 1991; Neue et al., 1994) ou adubos verdes (Lauren et al., 1994). Adicionalmente, as plantas de arroz influenciam a emissão de  $\text{CH}_4$  por fornecerem substrato pela exsudação de raízes e decomposição (Sass et al., 1991).

Uma parte significativa do metano produzido no solo, sob cultivo de arroz inundado, é oxidada no solo e na água antes que escape para a atmosfera. A oxidação do metano no solo é influenciada pelas plantas de arroz devido ao transporte de oxigênio da atmosfera ao solo através do aerênquima das plantas (Aulakh et al., 2001).

Existem três processos de escape de  $\text{CH}_4$  para a atmosfera: (a) a perda em forma de bolhas de ar, que é um mecanismo que ocorre durante o estágio inicial de crescimento da planta e durante operações de eliminação de invasoras; (b) a perda por difusão, através da superfície do solo e da água, cujo processo ocorre lentamente; (c) o transporte através do aerênquima (tecido vascular) da planta de arroz e a liberação para a atmosfera através dos brotos, os quais não estão sujeitos ao controle estomacal, sendo este o mecanismo mais importante de emissão (Cicerone et al., 1983).

A função primária da formação do aerênquima em plantas hidrofílicas, incluindo arroz, é o transporte de  $\text{O}_2$  para as raízes, enquanto vários gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$ ) são transferidos na direção inversa. No caso do transporte de  $\text{CH}_4$ , primeiramente, o  $\text{CH}_4$  dissolvido na solução do solo ao redor das raízes difunde-se das raízes em direção à superfície da água, e do córtex da raiz em direção à parede celular da planta. Esta transferência é governada pelo gradiente de concentração entre a solução do solo, ao redor das raízes, e os espaços intercelulares nas raízes (Wassmann & Aulakh, 2000). Butterbach-Bahl, citado por Wassmann & Aulakh, 2000, identificaram as fendas no ponto de junção das raízes principais com as raízes aéreas como as portas de entrada do  $\text{CH}_4$  vindo da solução do solo para o aerênquima. O  $\text{CH}_4$  é então absorvido pelo córtex das raízes e transportado para as folhas via os espaços intercelulares e o aerênquima.

O fluxo de  $\text{CH}_4$  através da planta de arroz depende de vários fatores, como: (1) a concentração de  $\text{CH}_4$  na solução do solo; (2) o estágio de crescimento da planta; (3) a altura e arquitetura da planta, e (4) a cultivar (Wassmann & Aulakh, 2000). Um estudo realizado com cinco cultivares de arroz irrigado, em Beijing, na China, indicou que a emissão de metano durante o estágio de florescimento variou em duas cultivares (Lin, 1993). Estudo similar conduzido em lavouras de arroz irrigado, na Itália, com as cultivares Italian e Roma, mostrou que a emissão de metano foi 24-31% maior em lavouras com a cultivar Roma (Butterbach-Bahl et al., 1997).

Na Itália, Schutz et al. (1989) avaliaram a emissão de  $\text{CH}_4$  em lavouras de arroz irrigado por inundação, onde as taxas de emissão apresentaram grande variação diurna e sazonal, com as mudanças diurnas sendo correlacionadas às mudanças na temperatura do solo.

Em trabalho realizado por Zongliang et al. (1993), em parcelas experimentais de arroz irrigado na China, foi constatado que as emissões de  $\text{CH}_4$  foram afetadas pela irrigação e modo de fertilização. Quantidades elevadas de  $\text{CH}_4$  foram emitidas de parcelas que receberam fertilizantes orgânicos, os quais favoreceram condições ambientais adequadas ao crescimento de bactérias anaeróbias. Os autores concluíram também que os métodos de irrigação (ou práticas de manejo) são decisivos para o controle de emissão de  $\text{CH}_4$ , sendo que a irrigação intermitente poderia manter a superfície do solo exposta ao ar por um período mais longo e, desta forma, aumentar o potencial redox do solo. Nessas condições, não haveria fermentação anaeróbia e a emissão de  $\text{CH}_4$  seria suprimida.

## **Perspectiva de Mitigação da Emissão de Metano em Áreas de Cultivo de Arroz Irrigado por Inundação**

O metano é um gás que contribui para o efeito estufa, tendo um potencial de aquecimento global 20 vezes maior do que o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (Missick, 2000). Allen & Baker, citados por Missick (2000), descobriram que a drenagem periódica do solo, para a aeração das raízes, reduz drasticamente a emissão de metano. Esta prática agrícola é de fácil aplicação e poderia ajudar o controle das emissões de metano.

Aspectos dos sistemas de cultivo de arroz irrigado, como tipo de preparo do solo, efeito de espécies vegetais utilizadas para cobertura morta em plantio

direto, manejo da água de irrigação, adubação nitrogenada (doses e fracionamento) e dessecação de plantas daninhas e outras espécies vegetais nativas, precisam ser investigados para uma melhor compreensão do processo de emissão de metano. Além desses, outros aspectos a serem estudados incluem o efeito da permanência da palha de arroz na lavoura exposta à inundações durante o inverno e a retirada desta palha para fenação ou sua utilização como cobertura morta para plantio direto de espécies de inverno (trigo, aveia) em várzeas.

Uma vez obtidos resultados de pesquisa aplicada e técnico-científica sobre os fatores de emissão de metano, o sucesso da implementação das opções mitigadoras dependerá do estímulo à sua adoção pelos produtores de arroz. Para que isso ocorra, os resultados de pesquisa devem ser capazes de demonstrar que: (1) a produtividade do grão não seria diminuída e poderia aumentar por uma prática de mitigação em particular; (2) que a adoção das práticas recomendadas de mitigação pelos produtores viriam em benefício de uma melhor utilização da água, redução de trabalho, ou uma diminuição nos custos de produção; e (3) que as cultivares de arroz utilizadas para uma redução na emissão de metano seriam aquelas desejadas pelos consumidores locais. A identificação de cultivares que combinem baixa emissão com alta produtividade é o grande desafio, mas também a estratégia mais promissora para sustentar a redução de emissão de  $\text{CH}_4$  em lavouras de arroz irrigado (Wassmann & Aulakh, 2000).

Outras estratégias de redução de metano em campos de arroz inundados incluem: a) a adoção de irrigação intermitente, b) a compostagem de materiais orgânicos antes de sua incorporação ao solo, c) a suplementação de nutriente N, P e K através de fertilizantes a base de sulfato e correção com gesso natural, devido ao efeito inibidor do sulfato (Aulakh et al., 2001). Entretanto, estudos devem ser estimulados no sentido de avaliar a aplicação dessas estratégias sob condições específicas de sistemas de produção de arroz irrigado, como praticados nas diferentes regiões agro-ecológicas do país.

## **Considerações Finais**

A cultura de arroz inundado é uma das mais importantes fontes de emissão de metano de origem antrópica, valendo-se da seguinte comparação: áreas úmidas naturais que ocupam aproximadamente cerca de 550 milhões de

hectares, liberam cerca de 100 Tg de CH<sub>4</sub> anualmente (Matthews et al., 1993), enquanto que a cultura de arroz inundado, ocupando área menor, de apenas aproximadamente 148 milhões de hectares, emite anualmente cerca de 60 Tg de CH<sub>4</sub> (IPCC, 1995). A relação volume de Metano Emitido/Área de Ecossistema é maior em arroz irrigado (60 Tg de CH<sub>4</sub> / 148 milhões de hectares = 0,405) do que em áreas úmidas naturais (100 Tg de CH<sub>4</sub> / 550 milhões de hectares = 0,182).

Estimativas preliminares realizadas pela Embrapa (1998) indicam uma emissão média anual de  $0,27 \pm 0,017$  Tg de metano proveniente de áreas de arroz inundado no Brasil, no período de 1986 a 1996. Surgem, deste modo, algumas questões quanto à orizicultura brasileira: qual seria o impacto (grau de emissão de metano) de áreas de igual dimensão ocupadas com um mesmo sistema de cultivo de arroz irrigado (plantio direto, por exemplo) instaladas em regiões ecologicamente diferentes (solo, clima, fauna, flora etc.)? Haveria regiões ecológicas onde a cultura do arroz irrigado emitiria menor volume de metano? Neste contexto, quais seriam os sistemas de cultivo de arroz irrigado mais adaptados às diferentes regiões ecológicas orizícolas do Brasil?

Para responder a essas indagações, pesquisas de caráter interdisciplinar devem ser priorizadas, enfocando a quantificação da emissão de metano em diferentes sistemas de produção de arroz irrigado e o conhecimento dos aspectos microbiológicos, climáticos, do solo e da planta, de forma integrada e em condições realísticas, visando a formular opções viáveis de mitigação e futuros programas de melhoramento genético do arroz.

## Referências

AULAKH, M.S.; WASSMANN, R.; RENNENBERG, H. Methane emissions from rice fields – quantification, mechanisms, role of management, and mitigation options. *Advances in Agronomy*, v. 70, p. 193-260, 2001.

AZAMBUJA, I.H.V.; FAGUNDES, P.R.R.; MAGALHÃES Jr., A.M. de. Importância sócio-econômica da lavoura de arroz irrigado. In: MAGALHÃES Jr., A. M.; FAGUNDES, P. R. R. (ed.), *Agricultura real: arroz irrigado*. Pelotas: EMBRAPA-CPACT, 1996. 75 p. (EMBRAPA-CPACT. Documentos, 20).

BUTTERBACH-BAHL, K.; PAPEN H.; RENNENBERG, H. Impact of gas transport through rice cultivars on methane emission from rice paddy fields. *Plant Cell & Environment*, v. 20, p. 1175-1183, 1997.

CICERONE R.J.; SHETTER, J.D.; DELWICHE, C.C. Seasonal variations of methane flux from a California rice paddy. *Journal of Geophysical Research*, v. 88, p. 7203-7209, 1983.

CONRAD, R. Control of methane production in terrestrial ecosystems. In: ANDREAE, M. O.; SCHIMMEL, D. S. (ed.), *Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere*. New York: Wiley, 1989. p. 39-58.

EMBRAPA. *Inventário de emissões de gases de efeito estufa provenientes de atividades agrícolas no Brasil: emissões de metano provenientes de arroz irrigado por inundação (relatório revisado)*. Jaguariúna. 1998.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

FAO. *Dados agrícolas de FAOSTAT – agricultural production*. Disponível <http://www.fao.org>. Consultado em 3 de março 2001.

GOMES, A. da S.; PETRINI, J.A. Manejo da água em arroz irrigado. In: MAGALHÃES Jr., A. M.; FAGUNDES, P. R. R. (ed.), *Agricultura real: arroz irrigado*. Pelotas: EMBRAPA-CPACT, 1996. 75 p. (EMBRAPA-CPACT. Documentos, 20).

GOMES, A. da S.; PETRINI, J.A.; PARFITT, J.M.B.; VERNETTI Jr., F. de J. Manejo de solos de arroz irrigado. In: MAGALHÃES Jr., A. M.; FAGUNDES, P. R. R. (ed.), *Agricultura real: arroz irrigado*. Pelotas: EMBRAPA-CPACT, 1996. 75 p. (EMBRAPA-CPACT. Documentos, 20).

INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. *World rice facts*. Manila, 1989.

IPCC. *Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 339 p.

IRGA. *Informativo*. Porto Alegre: Instituto Rio Grandense do Arroz, v. 7, n. 2, p. 1-4, 1999.

IRGA. *Informativo*. Porto Alegre: Instituto Rio Grandense do Arroz, v. 8, n. 6, p. 1-4, 2000.

JOULIAN, C.; OLLIVIER, B.; NEUE, H.-U.; ROGER, P.A. Microbiological aspects of methane emission by a ricefield soil from the Camargue (France): 1. Methanogenesis and related microflora. *European Journal of Soil Biology*, v. 32, n. 2, p. 61-70, 1996.

LAUREN, J.G.; PETTYGROVE, G. S.; DUXBURY, J.M. Methane emissions associated with a green manure amendment to flooded rice in California. *Biogeochemistry*, v. 24, p. 53-65, 1994.

LIN, E. Agricultural techniques: factors controlling methane emission. In: GAO, L.; ZHENG, D.; HAN, X. (ed.), *Proceedings of International Symposium on Climate Change, Natural Disasters and Agricultural Strategies*. Beijing: China Meteorological Press, 1993. p. 120-126.

MATTHEWS, E.; FANG, I.; LERNER, I. Methane emission from rice cultivation: Geographic seasonal distribution of cultivation areas and emission. *Global Biogeochemical Cycles*, n. 5, p. 3-24, 1993.

MISSICK, T.W. Reducing methane emissions from rice. *Agricultural Research*, p. 22, 2000.

NEUE, H.U.; ROGER, P.A. Potential of methane emission in major rice ecologies. In: ZEPP, R. G. (ed.), *Climate biosphere interaction: biogenic emission and environmental effects of climate change*. New York: John Wiley & Sons, 1994. p. 65-93.

OLIVEIRA, J.B.; JACOMINE, P.K.T.; CAMARGO, M.N. *Classes gerais de solos do Brasil: guia auxiliar para seu reconhecimento*. Jaboticabal: FUNEP, 1992. 201 p.

SASS, R.L.; FISHER, F.M.; HARCOTBE, P.A.; TURNER, F.T. Mitigation of methane emissions from rice fields: possible adverse effects of incorporated rice straw. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 5, n. 3, p. 275-287, 1991.

SASS, R.L.; FISHER, F.M.; WANG, Y.B.; TURNER, F.T.; JUND, M.F. Methane emission from rice fields: the effect of floodwater management. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 6, n. 3, p. 249-262, 1992.

SCHUTZ, H.; HOLZAPFEL-PSCHORN, R.; CONRAD, R.; RENNENBERG, H.; SEILER, W. A 3-year continuous record on the influence of daytime, season, and fertilizer treatment on methane emission rates from an Italian rice paddy. *Journal of Geophysical Research*, v. 94, n. 13, p. 16405-16416, 1989.

WASSMANN, R.; AULAKH, M.S. The role of rice plants in regulating mechanisms of methane emissions. *Biology and Fertility of Soils*, v. 31, p. 20-29, 2000.

YAGI, K.; MINAMI, K. Effects of inorganic matter applications on methane emission from Japanese paddy fields. *Soil Science and Plant Nutrition*, v. 36, p. 599-610, 1990.

ZONGLIANG, C.; DEBO, L.; KESHENG, S.; BUJUN, W. Features of CH<sub>4</sub> emission from rice paddy fields in Beijing and Nanjing. *Chemosphere*, v. 26, p. 239-245, 1993.



## **Seção III**

---

# **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL**



## Incentivos Econômicos para a Cooperação no Combate ao Aquecimento Global<sup>1</sup>

RONALDO SEROA DA MOTTA, CLÁUDIO FERRAZ  
*Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA,  
Rio de Janeiro, RJ, Brasil*

CARLOS E. F. YOUNG  
*Instituto de Economia da Universidade Federal  
do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*

**Resumo.** O Protocolo firmado na Conferência das Partes de 1997 da Convenção de Mudanças Climáticas, em Quioto, finalmente fixou um teto de emissões de gases de efeito estufa (GEE) para vários países desenvolvidos e introduziu a possibilidade de mecanismos de criação de mercado baseados no comércio das emissões. Esse comércio entre países com e sem teto seria, então, realizado através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL (Clean Development Mechanism – CDM). Com o MDL, qualquer país sem teto de emissões pode desenvolver projetos de redução de sua emissão de GEE e receber créditos por isto, podendo vender estes créditos no mercado. Este texto dedica-se à análise do papel do mercado neste novo mecanismo. Nosso objetivo é ajudar a entender qual as vantagens e desvantagens do mercado de MDL para os países envolvidos.

### Economic Incentives Cooperation in the Combat Against Global Warming

**Abstract.** The 1997 Kyoto Protocol of the Climate Change Convention has finally established emission caps for developed countries. It has also introduced a flexible mechanism to allow for investments in developing countries in exchange for credit in carbon reduction arising from these investments. This mechanism, denominated Clean

---

<sup>1</sup> Este trabalho é parte de Seroa da Motta, Young e Ferraz (1998).

*Development Mechanism (CDM), could create a market for carbon, whereby each country would try to make the most of its carbon-saving options. This study is an attempt to analyse the promising MDL market and its advantages and disadvantages for developing countries such as Brazil.*

## Introdução

Se os países percebessem sua parcela nos custos do aquecimento global como suficientemente alta para compensar os investimentos em opções de combate, então estariam mais dispostos a implementá-las. Os custos do aquecimento global são difíceis de calcular não apenas por causa da incerteza de seus resultados e de seu escopo, mas também por dependerem de ações multilaterais. País algum pode, sozinho, reverter o aquecimento global através de uma ação unilateral. Além disto, é difícil aplicar princípios do “poluidor-paga” quando se consideram as emissões cumulativas dos gases causadores do efeito estufa (GEE).

Por esta razão, a ação multilateral torna-se um jogo no qual os países atuam através de comportamentos estratégicos, esperando os movimentos dos outros países para reagir. Como a incerteza e as diferentes taxas de desconto reduzem dramaticamente os benefícios que se espera advirem da cooperação, atinge-se o equilíbrio não-cooperativo, que consiste em muito pouca ação<sup>1</sup>.

Há, portanto, uma necessidade urgente de introduzirem-se incentivos para a cooperação. Existe um amplo espaço disponível para tal, já que os países em desenvolvimento têm condições de fazer reduções na emissão de GEE a custos mais baixos do que as economias desenvolvidas<sup>2</sup>.

Foram então projetados financiamentos generosos de modo a facilitar a cooperação dos países, pagando-lhes por investirem em opções de combate ao aquecimento global. Esses mecanismos tinham um critério de pagamento baseado nos custos incrementais. Estes foram definidos como os custos indesejáveis, incorridos pelos países que investem em ações de redução, por terem se desviado do caminho de investimento que eles teriam percorrido na ausência dessas ações.

<sup>1</sup> Este é um tipo de problema de financiamento de um bem público. Ver, por exemplo, Manne & Richels (1996) para uma análise do custo da incerteza na divisão de custos e estratégias pelos países no debate sobre o efeito estufa e Barret (1998) para uma abordagem teórica do jogo.

<sup>2</sup> Ver, por exemplo, Repetto & Austin (1997) e Jepma & Munasinghe (1998).

É fato que se criaram fundos, como o “Global Environment Facility” (GEF), como forma de subsidiar os agentes econômicos nos países em desenvolvimento para evitar que estes incorressem nos altos custos de controle da emissão de gases do efeito-estufa (GEE), através de compensações a esses agentes que o fizessem com custos mais eficazes. Trata-se de um subsídio, já que o GEF, por exemplo, é constituído por recursos dos contribuintes dos países desenvolvidos que são transferidos para seus poluidores emissores de GEE.

Se a compensação deste subsídio for suficientemente alta para motivar investimentos em opções de redução nos países em desenvolvimento, sendo ainda mais baixa do que os custos do controle nos países em desenvolvimento, alcança-se uma situação em que todos ganham, aumentando o bem-estar geral com a redução da emissão de GEE, ao custo mínimo global.

Foram também promovidos mecanismos de implementação conjunta para favorecer os países dispostos a ações isoladas no processo de controle da emissão de GEE, permitindo-lhes, portanto, implementar, em conjunto, investimentos de custo-eficiente em outros lugares, pagando os custos incrementais e recebendo o crédito da redução da emissão de GEE.

No entanto, essas iniciativas não tiveram sucesso. A falta de vontade política criou barreiras diplomáticas, tanto nos países desenvolvidos quanto naqueles em desenvolvimento, adiando a solução do principal parâmetro para o sucesso desses incentivos, como por exemplo, através de compromissos reais com o controle da emissão de GEE, ou seja, quanto cada país se compromete a reduzir emissões de GEE conforme a Convenção de Mudanças Climáticas.

O Protocolo firmado na Conferência das Partes de 1997, em Quioto, finalmente fixou um teto de emissões para vários países desenvolvidos (conforme Anexo B do Protocolo), e introduziu a possibilidade de mecanismos de criação de mercado baseados no comércio das emissões. Estabeleceu uma obrigação, com bases legais, para os países do Anexo B (ABCs) de reduzirem as emissões totais de seis GEEs, em cerca de 5% abaixo dos níveis de 1990, até o período entre os anos 2008-12. Não constam neste Protocolo reduções similares de emissões para os países em desenvolvimento (países que não estão no Anexo B, NABCs). Os ABCs concordaram com reduções diferenciadas: 8% para a União Européia, 7% para os Estados Unidos, 6% para o Canadá, Japão, Hungria e Polônia e 5% para a Croácia. A Rússia e a Ucrânia prometeram estabilizar-se aos níveis de 1990, enquanto que se permitiram à Noruega, Austrália e Islândia aumentos de 1,8% e 10%, respectivamente.

Enquanto o comércio das emissões só foi oficialmente rotulado como tal para as transações entre os países com um teto, outro instrumento semelhante, chamado “Mecanismo de Desenvolvimento Limpo” (MDL), foi criado para o comércio de emissões entre países com um teto e países que não o tivessem.

Muitos dos procedimentos necessários ao prosseguimento do comércio de emissões conforme a Convenção, como linha de referência, adicionalidade, certificados etc., devem ainda ser definidos. Ainda assim, o MDL é com certeza a grande estrela nascida do Protocolo de Quioto, pois abrange todos os incentivos necessários a acelerar a cooperação e aumentar a eficiência dos custos do controle global da emissão de GEE.

Embora o MDL possa ser visto tanto como um tipo de implementação conjunta multilateral quanto como um comércio de emissões com semântica diplomática, representa uma abordagem da cooperação para o controle do aquecimento global fortemente baseada nas forças do mercado. Longe dos fundos subsidiados e do imposto sobre o carbono, o MDL é um instrumento típico de criação de mercado. Espera-se agora que as forças do mercado assumam seu lugar e criem os incentivos necessários para fazer com que a cooperação seja proveitosa para todas as nações no combate ao aquecimento global. Os investidores privados, mais do que os governos, poderão tomar a dianteira e tornar possível a cooperação, usando o mercado como a arena em que se criarão os incentivos econômicos.

Este texto dedica-se à análise do papel do mercado neste novo mecanismo. Nosso objetivo é ajudar a entender se será criado um “bom” mercado com o MDL.

## **O MDL como Mecanismo de Comércio de Emissões**

Como exposto acima, o MDL é, na verdade, uma implementação conjunta multilateral e um re-rotulamento do comércio de emissões. A diferença que veio à cena após a reunião de Kioto é que agora existem tetos realistas para os países do Anexo B (ABCs), que tornarão o comércio de emissões certificado e controlado pelas partes convencionadas. Apesar das transformações políticas ocorridas, o MDL é uma oportunidade em aberto para o avanço do controle da emissão de GEE, com ganhos em eficiência e equitativos, com a cooperação de países que não constam do Anexo B (NABCs).

O controle da emissão de GEE tem uma característica importante, também condição necessária, para a aplicação de instrumentos econômicos: os custos marginais do controle variam grandemente entre os poluidores. Além disso, como as emissões de GEE são misturadas uniformemente (isto é, espacialmente independentes) na atmosfera, o comércio de emissões parece ser um bom candidato para maximizar os ganhos em eficiência. Isto significa que as emissões de um lugar podem ser comercializadas ao par com as emissões de outros lugares, sem deterioração da qualidade ambiental desses últimos<sup>1</sup>. Neste caso os custos de transação são grandemente reduzidos.

O MDL é um tipo de dispositivo comercial de crédito de emissões que difere do comércio de licenças de emissão por não exigir qualquer distribuição inicial de licenças. Por isto a eficiência do sistema de comércio não dependerá da distribuição inicial de autorizações, o que aconteceria sob o sistema de licenças<sup>2</sup>. Com o MDL qualquer país do grupo fora do Anexo B pode desenvolver projetos de redução da emissão de GEE e receber créditos por isto, podendo vender este crédito no mercado. Assim, as transações MDL ocorrerão enquanto os tetos dos ABCs não forem atingidos e os custos marginais da redução da emissão de GEE por parte dos NABCs forem mais baixos do que os dos ABCs.

No entanto, as características anteriores não são condições suficientes para fazer funcionar o mercado de MDL, em bases de custos eficientes, para criar esforços de redução da emissão de GEE. Os mecanismos de criação de mercado exigem condições competitivas de mercado para satisfazer aos objetivos de eficiência. Considerando-se a diversidade das fontes de emissão de GEE e das opções de controle, um mercado de MDL em bases puramente privadas iria confrontar muitos vendedores e compradores, dando margem a um mercado altamente competitivo.

A questão é se uma feição tão competitiva pode emergir em um mercado de MDL. A resposta dependerá do poder discricionário que os governos irão exercer sobre as transações em MDL. A principal fonte de cortes na emissão de GEE virá de poucos NABCs e, além disto, os compradores estarão concentrados nos poucos ABCs. Se os governos atuarem no sentido de exercer seu poder discricionário no mercado de MDL, controlando as decisões do

---

<sup>1</sup> Embora as emissões que não se misturem uniformemente também possam contar com dispositivos comerciáveis, os custos de transação (inclusive custos administrativos) seriam altos.

<sup>2</sup> Ver Chichilnisky et al. (1993).

mercado conforme a estratégia de cada país, veremos um mercado com poucos compradores e vendedores atuando estrategicamente para maximizar os benefícios individuais de um país. Estas imperfeições irão com certeza reduzir os ganhos em eficiência do resultado do MDL.

Por outro lado, considerando uma economia individualmente, um mercado competitivo poderá, por si só, levar à outras imperfeições, já que os benefícios do controle da emissão de GEE são globais mas os custos são incorridos localmente. Por isto, um mercado com muitas empresas individuais buscando maximização de lucros aumentará a competição, mas não irá captar os benefícios secundários do controle da emissão de GEE.

## **Mecanismos de Mercado**

Até o momento, o financiamento das opções de combate ao aquecimento global, como o GEF, tem exercido discriminação contra os benefícios secundários em suas análises de projeto. Os projetos, desta forma, foram classificados levando-se em conta seus benefícios secundários. A discussão tem sido, em grande parte, sobre quantos destes benefícios deveriam ser deduzidos dos fundos dos esforços para o controle do aquecimento global, já que os países que os recebem ganhariam outros benefícios ao mesmo tempo reduzindo os custos incrementais<sup>1</sup>. Em outras palavras, a questão tornou-se como aplicar uma análise de custo-benefício para classificar e selecionar os projetos para financiamento.

Por outro lado, esses benefícios consideráveis não levaram os países em desenvolvimento a um programa ativo de investimento. Eles não se mostraram dispostos a assumir estas opções de redução do aquecimento global, mesmo em presença de tão elevados benefícios secundários. Em suma, os projetos de opções de combate ficaram em grande desvantagem com relação às oportunidades de investimentos em que todos ganham, amplamente indicadas na literatura sobre implementação conjunta.

Além da falta de compromissos realistas e equitativos para a redução das emissões de GEE até a reunião de Quioto, as explicações costumeiras para esta contradição eram restrições de capital, efeito escala e custos de aprendizagem.

---

<sup>1</sup> Ver, por exemplo, Heintz & Toll (1996).

Além do mais, ainda que um país perceba um elevado retorno social com os projetos de combate ao aquecimento global, não pode alavancar o capital necessário a estes investimentos adicionais. Além do mais, as barreiras tecnológicas e a falta de experiência fazem com que esses países não consigam identificar com precisão os custos e benefícios associados à escala e ao aprendizado.

Irá o MDL reverter esta situação, tornando estas oportunidades de investimento financeiramente viáveis?

A faceta mais importante do MDL é o fato de apoiar-se nas forças do mercado. Ao permitir o comércio de emissões, o MDL pode trazer os investidores privados para o negócio do controle da emissão de GEE. Um investidor pode agora gerar receita vendendo reduções de GEE e, com isto, melhorar os retornos de um projeto. Este mercado irá superar as restrições de capital, pois as oportunidades desta abordagem de orientação de mercado irá atrair negócios internacionais. Em outras palavras, o MDL contará com fundos dos investidores privados, que buscarão lucros e arcarão com os custos. Os governos irão intervir para reduzir os custos de transação através do monitoramento.

As reduções de GEE serão, então, consideradas como uma típica *commodity*, transacionada em um mercado, de modo a maximizar os lucros privados. Assim, os efeitos escala serão reconhecidos e os custos de aprendizagem reduzidos, já que a tecnologia será necessária e promovida para garantir os retornos privados.

As economias em que o MDL é aplicado para criar reduções transacionáveis na emissão de GEE receberão grandes investimentos com benefícios que vão desde oportunidades de emprego até melhorias na balança comercial, criando ganhos razoáveis em equitativos para os países em desenvolvimento. Em suma, é a solução de globalização para um problema global! Devem os economistas apoiar incondicionalmente esta iniciativa do mercado sem restrições?

## Intervenção do Governo

Esta resposta necessita de um exame. Embora esta abordagem de orientação puramente de mercado otimize, sob certas condições específicas<sup>1</sup>, os ganhos em eficiência e equitativos sobre o controle das emissões de GEE em todo o globo, não garantirá que um país esteja maximizando seus recursos. Ainda que os investidores estejam totalmente satisfeitos com os resultados comerciais do mercado de MDL, os governos não deveriam estar dispostos a ir longe demais.

Mesmo que a influência dominante do governo possa, como foi dito anteriormente, conduzir a um mercado bastante imperfeito, um mercado de MDL puramente privado faz surgir questões de bem-estar social relacionadas com as externalidades locais associadas à redução das emissões de GEE. Em outros termos, uma abordagem do MDL puramente baseada no mercado afastará qualquer oportunidade de integrar à seleção de projetos quaisquer benefícios secundários associados aos projetos de redução de GEE. Observe-se que os benefícios secundários caberão aos países que efetuarem reduções na emissão de GEE mas, teoricamente, só se pode garantir que os investimentos de seleção do mercado minimizem os custos desta redução. A maximização de outros possíveis benefícios externos não é assegurada.

As disputas sobre a contribuição de cada país para o aquecimento global e, conseqüentemente, as divergências sobre a contribuição de cada país para a solução do problema parecem estar amarradas na questão dos tetos de Quioto para os ABCs, e a conseqüente abertura do caminho para a cooperação e os negócios. No entanto, existe uma outra razão para a pouca ação governamental no controle do aquecimento global, e ela está relacionada às divergências quanto ao custo e benefício social esperado a partir da redução do GEE por parte de cada país.

A enorme diferença em renda *per capita* entre os países desenvolvidos e aqueles em desenvolvimento também contribui para os antagonismos nos resultados de um possível mercado de MDL. A renda *per capita* mais baixa

---

<sup>1</sup> A simetria de informação entre os países e a competição perfeita no mercado comerciável são duas condições necessárias.

nos países em desenvolvimento leva à uma mais alta utilidade marginal da renda, o que torna os possíveis aumentos de consumo relativamente mais valiosos do que nos países desenvolvidos. Além disto, a taxa de preferência temporal nesses países é também mais alta, o que torna as necessidades de hoje mais importantes do que as do futuro. Tudo isto resulta em uma diferente avaliação social, entre os países do Norte e do Sul, para os mesmos custos em dólar associados ao controle do aquecimento global.

Em outras palavras, o controle do aquecimento global, ainda que totalmente reconhecido pelos países em desenvolvimento, pode conduzir a retornos sociais mais baixos do que outros investimentos necessários para prosseguir em um caminho de desenvolvimento.

Não há um modo direto para ajudar um país a identificar todos os custos e benefícios sociais de todas as suas opções de investimentos, e tentar classificar, entre eles, os investimentos de combate ao aquecimento global para motivar esse país a selecionar racionalmente as suas melhores oportunidades. Os economistas não podem produzir tais resultados com facilidade dentro desta dimensão geral e, de qualquer forma, governos não se comportam com tanta racionalidade!

Resumindo, o mercado de MDL não considera qualquer outro benefício que não possa ser captado pelo mercado. E, como já foi observado, estes benefícios parecem ser muito impressionantes.

A literatura a este respeito difere no cálculo dos valores, mas concorda com a sua importância<sup>1</sup>. Projetos na área energética, por exemplo, que reduzem a dependência dos combustíveis fósseis, também reduzem outros poluentes do ar associados à saúde. Além disto, eles podem ser mais intensivos em termos de mão-de-obra, sendo também projetos regionalizados. Os projetos de manejo florestal podem, acima de tudo, restringir o desflorestamento, protegendo desta forma a biodiversidade. Além do mais, é necessário reconhecer que estes benefícios secundários podem ser gerados, a níveis diferentes, para o mesmo resultado em redução de GEE. Assim, os benefícios secundários podem não apenas ser de grande importância, como também podem diferir em cada projeto.

Como já mencionamos, o MDL de orientação de mercado irá basear-se apenas nos custos e benefícios financeiros. Assim sendo, o mercado será melhor do que os fundos do aquecimento global no sentido de aumentar os

---

<sup>1</sup> Ver, por exemplo, Ekins (1996) para uma visão geral.

investimentos no controle do GEE da forma mais eficiente. Por outro lado, isto não levará necessariamente à maximização do bem-estar no país específico que assuma o investimento, especialmente em presença de externalidades ambientais significativas associadas aos investimentos preventivos do aquecimento global. Internalizando estas externalidades, o uso da abordagem do custo-benefício social pode mudar a ordem das opções de investimento, comparando-se com o que o mercado, por si só, indicaria.

## Conclusões

Uma simples formalização pode apresentar as falhas de mercado do MDL anteriormente discutidas.

Para o país com o mais baixo custo de controle do GEE, representemos por  $i$  uma típica empresa interessada em maximizar seus lucros com a venda de créditos para a redução de GEE no mercado internacional. Para maior simplicidade, suponhamos que o projeto associado com o controle do GEE seja um projeto de manejo florestal que seqüestre o carbono, e que o único produto associado ao projeto seja o seqüestro de carbono<sup>1</sup>. Isto posto, cada tonelada de C seqüestrado é vendida no mercado internacional. Seja  $p$  a representação do preço de 1 ton de C vendida no mercado internacional. Definindo-se o lucro como  $\pi(q) = p \cdot q - C(q)$ , onde  $q$  é a quantidade de C que a empresa venderá no mercado internacional, a condição de primeira ordem para a empresa será dada por:

$$C'(q) = p \quad (1)$$

onde:

$C'(q)$  é o custo marginal privado do seqüestro de uma tonelada de C e  $p$  é a renda marginal do preço pelo qual o carbono é vendido no mercado internacional. Podemos, então, obter uma curva de oferta para a empresa típica  $i$ .

<sup>1</sup> Isto irá apenas simplificar a análise. De modo mais realista, poderíamos supor que o produto é um vetor, onde o seqüestro de carbono é apenas um dos possíveis produtos, juntamente com os produtos madeireiros e não-madeireiros. O resultado não irá alterar-se, e nós só estaríamos adicionando mais equações à análise.

A quantidade vendida  $q$  será uma função do preço  $p$ , de forma que podemos exprimir a oferta individual como:

$$q_i^s(p)$$

Para os países do anexo B, suponhamos, em nome da simplicidade, que existe uma empresa típica  $j$  que usa apenas um insumo para produzir um bem final. Este insumo é chamado crédito de carbono e é vendido no mercado internacional por uma típica empresa  $i$ . Esta empresa  $j$  usa este crédito de C para obter um produto final chamado  $y$ .

O problema para a empresa  $j$  é maximizar os lucros  $\pi_j$ , onde:  $\pi_j(q) = p_j(q) - p \cdot q$ . A condição de primeira ordem para a típica empresa  $j$  em um mercado competitivo é dada por:

$$p \cdot f'(q) = p \tag{2}$$

Podemos, então, obter uma curva de demanda para o insumo  $q$  para a típica empresa  $j$  que compra créditos de carbono no mercado internacional. Este fator demanda será dado por uma função do preço  $p$ , de modo que podemos exprimir a demanda individual do insumo por  $q_j^D(p)$ .

A condição de equilíbrio do mercado será dada pela soma de toda a oferta de créditos de carbono sendo igual à soma da demanda total de créditos de carbono. Assim, o mercado de MDL estará equilibrado quando:

$$Q^S(p^*) = \sum_{i=1}^n q_i^S(p^*) = \sum_{j=1}^m q_j^D(p^*) = Q^D(p^*) \tag{3}$$

onde:

$p^*$  é o preço de equilíbrio de uma unidade de redução na emissão de GEE transacionada através de MDL no mercado mundial.

Pelo menos, três fontes de falha do mercado podem afetar  $p^*$ :

- (a)  $p^*$  pode não emergir de um mercado competitivo perfeito.
- (b)  $p^*$  não revela o custo marginal social de  $Q$  no país comprador.
- (c)  $p^*$  não revela o custo marginal social de  $Q$  no país vendedor.

No caso (a),  $p^*$  não representa um preço eficiente e, conseqüentemente, não é alcançada a eficiência de preço global do controle do GEE. Esta falha de mercado pode ser associada a qualquer tipo de poder de mercado, conforme

observado em outros mercados de commodities. No entanto, como já foi apontado, o poder discricionário do governo pode levar a isto, se países como a China, a Índia e mesmo o Brasil decidirem arbitrar a oferta de MDL. Observe-se que neste caso, os países fornecedores estarão atuando uns contra os outros, na tentativa de dump o mercado de MDL para satisfazer aos países que demandam MDL, buscando poder oligopolístico. O mesmo pode acontecer com o lado demanda se um país, ou mercado regional, consegue impor um comportamento oligopsônico<sup>1</sup>.

No caso (b), o custo marginal social do país comprador é, certamente, mais alto do que o privado, caso se levem em conta os custos de equilíbrio geral. As economias movidas a combustíveis fósseis podem estar dispostas a subsidiar compras de MDL para evitar perdas de crescimento a curto prazo e pesados ajustes estruturais. Os países que gozam de saúde fiscal podem estar em uma posição bastante boa para fazê-lo. Se este país está ditando padrões tecnológicos, os padrões tecnológicos energéticos podem não mudar e os fornecedores de MDL não irão beneficiar-se completamente de seus ajustes energéticos para atender à oferta de MDL, pelo menos em termos de competitividade, já que a produtividade não será tão afetada por este novo padrão energético. Isto pode sugerir que o custo marginal social dos países fornecedores é mais alto do que o privado caso se levem em conta estes efeitos dinâmicos.

Note-se que um projeto de manejo florestal tem, neste caso, uma vantagem, já que não desempenha o mesmo papel em competitividade. Na verdade, ao evitarem a conversão de uma área de floresta, o que significa aumentar a escassez de terras agrícolas, os países estarão estimulando práticas agrícolas mais intensas, o que pode ocasionar níveis mais altos de produtividade, especialmente nos casos em que a área de floresta apresenta baixa qualidade para agricultura e pecuária<sup>2</sup>.

No caso (c), o valor social do custo marginal da redução do GEE pode ser mais baixo que o privado nos países fornecedores, devido aos benefícios secundários. Como o mercado, por si só, não pode reconhecer isto, a oferta de

---

<sup>1</sup> Ver Westkog (1996) para uma análise formal de um mercado oligopsônico de quotas comerciáveis de CO<sub>2</sub>.

<sup>2</sup> Ver, por exemplo, Seroa da Motta (1997) para uma análise detalhada de políticas de manejo florestal no Brasil.

MDL pode ser programada para seguir os custos privados e, por conseguinte, perder oportunidades de maximizar os ganhos em bem-estar do comércio de MDL.

Ao mesmo tempo, os descontos do mercado podem ser distintos em termos sociais e também afetarem a programação da oferta de carbono. Os investidores privados farão suposições sobre as trajetórias de preço do MDL, identificando preços futuros. A decisão de fornecer hoje ou adiar os investimentos para auferir os benefícios de preços futuros mais elevados deve levar em conta, entre outras questões, uma internalização de uma taxa de desconto que, para o investidor privado, seguirá uma taxa de juros internacional.

Para os países em desenvolvimento, devido à existência de restrições de renda e uma alta preferência pelo consumo presente, a taxa de desconto social será provavelmente mais alta do que a taxa de juros do mercado internacional. Assim, o valor presente dos projetos calculados do ponto de vista privado seria mais alto do que aquilo que seria socialmente ótimo, causando um sobreinvestimento em projetos de controle do GEE. Além do mais, com uma oferta mais elevada de controle do GEE, o preço do crédito comerciável teria um preço de equilíbrio mais baixo do que aquele que seria socialmente ótimo para o mundo.

Como já foi mencionado, os países fornecedores de MDL irão ter um dia custos dinâmicos devido à falta de melhorias tecnológicas quando os países compradores evitarem reduzir a intensidade dos combustíveis fósseis através do comércio de MDL. Como os atuais países fornecedores de MDL estarão um dia submetidos aos tetos de emissão de GEE, estas tendências significarão que, para eles, quando este controle obrigatório vier a vigorar no futuro, os custos sociais do controle do GEE irão diferir dos custos privados, se eles previrem altos custos de ajuste estrutural como aqueles percebidos hoje pelos países desenvolvidos. Com isto, esses países fornecedores de MDL de hoje podem estar dispostos a oferecer menos MDL do que o mercado está pedindo em um sentido estático presente.

Os investidores do mercado também não internalizarão este outro fator dinâmico, já que a maximização de seu lucro não está relacionada com a maximização do bem-estar de um país. Se os países atualmente fornecedores de MDL necessitarem de créditos de emissão de GEE no futuro, eles lá estarão aproveitando ao máximo as oportunidades de investimento em outras partes para fornecer-lhes a opção mais barata. Esta é a razão pela qual o mercado

pode ser tão importante para a minimização do controle da emissão de GEE.

Como pode ser observado, embora estes dois tipos de efeitos dinâmicos sejam opostos, qualquer tentativa de envolvê-los em um caminho de maximização do bem-estar social não será viável através das forças do mercado por si só.

## Referências

AUSTIN, D. *Climate protection policies: can we afford to delay*, Washington, DC: World Resources Institute, 1997.

BARRET, S. Towards a theory of international cooperation. In: CARRARO, C.; SINISCALCO, D. (ed.), *New directions in the economic theory of the environment*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

CHICHILNISKY, G.; HEAL, G.M.; STARRET, D. *Equity and efficiency in international permit markets: working paper*. Stanford: Stanford Institute for Theoretical Economics, 1993.

EKINS, P. The secondary benefits of CO<sub>2</sub> abatement: how much emission reduction do they justify? *Ecological Economics*, v. 16, n. 1, 1996.

JEPMA, C.J.; MUNASINGHE, M. *Climate change policy: facts, issues and analysis*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

MANNE, A.; RICHEL, R. The greenhouse debate: economic efficiency, burden sharing and hedging strategies. *The Energy Journal*, v. 7, n. 3, p. 1-38, 1996.

SEROA DA MOTTA, R. The economics of biodiversity: the case of forest conversion. In: *Investing in biological diversity: the Cairns Conference*. Paris: OECD, 1997.

SEROA DA MOTTA, R. *Manual para valoração econômica de recursos ambientais*. Brasília: MMA, 1998.

SEROA DA MOTTA, R.; YOUNG, C.; FERRAZ, C.A. *Clean development mechanism and climate change: cost-effectiveness and welfare maximization in Brazil*. Rio de Janeiro: IPEA/DIPES, 1998. mimeo.

WESTKOG, H. Market power in a system of tradeable CO<sub>2</sub> quotas. *The Energy Journal*, v. 7, n. 3, p. 85-103, 1996.

**UNIDADES DE MEDIDAS**

t = tonelada (1.000 kg)  
tms = toneladas métricas  
cm<sup>2</sup> = centímetro quadrado  
m<sup>2</sup> = metro quadrado  
m<sup>3</sup> = metro cúbico  
dm<sup>3</sup> = decímetro cúbico  
L = litro  
mL = mililitro  
mm = milímetro  
kg = kilograma  
kgf = kilogramaforça  
ppb = parte por bilhão  
ppm = parte por milhão  
Pg = pentagrama (10<sup>15</sup>g)  
Tg = teragrama (10<sup>12</sup> g)  
Gg = gigagrama (10<sup>9</sup> g)  
Ng = nanograma (10<sup>-9</sup> g)  
cmolc = centimol de carga  
TEP = tonelada equivalente em petróleo  
Kcal = kilocaloria  
ha = hectare  
W = Watt  
MWatt = megawatt  
kWh = Kilowatthora  
MWh = megawatthora  
Mcal = megacaloria  
GJ = gigajoule  
MJ = megajoule  
hPa = pressão atmosférica (hecto Pascal)

# Embrapa

## Meio Ambiente

Estudos vêm mostrando a ocorrência do aumento na concentração de gases de efeito estufa na atmosfera terrestre, provenientes das atividades humanas. Acredita-se que esse acréscimo de gases esteja promovendo o aquecimento global, e que, portanto, esforços no sentido de reduzir as emissões desses gases a partir das fontes causadoras e de buscar formas de adaptação às novas condições climáticas deveriam ser estimulados em âmbito global.

O tema Mudanças Climáticas Globais e a Agropecuária Brasileira trata de um duplo contexto, ou seja, de que as atividades agrícolas podem ser ao mesmo tempo vulneráveis à mudança do clima, quanto promovedoras de gases de efeito estufa. A presente publicação está centrada nesses dois enfoques, trazendo em seu escopo o atual cenário de estudos conduzidos sobre o tema no Brasil. A partir dessas experiências apresentam-se novas questões desafiantes e a necessidade de aprofundamento de pesquisas em diversos segmentos do setor agropecuário, nas diversas ecorregiões brasileiras.

Esta publicação é dirigida a pesquisadores do setor agropecuário, professores, economistas, estudantes e interessados no desenvolvimento agrícola e nas questões ligadas ao efeito estufa.



PROUD



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA E TECNOLOGIA

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA,  
PECUÁRIA E ABASTECIMENTO

GOVERNO  
FEDERAL  
Trabalhando em todo o Brasil