

Artigo

Dinâmica do Nitrogênio em Sistemas Agrícolas e Florestais Tropicais e seu Impacto na Mudança do Clima

Rodrigues, R. A. R.;* de Mello, W. Z.; da Conceição, M. C. G.; de Souza, P. A.; Silva, J. J. N.

Rev. Virtual Quim., 2017, 9 (5), 1868-1886. Data de publicação na Web: 28 de agosto de 2017

<http://rvq.sbq.org.br>

Nitrogen Dynamics in Tropical Agricultural and Forest Systems and their Impact on Climate Change

Abstract: Nitrogen is the most abundant element of the atmosphere, being present in the constitution of several atmospheric gases, among them nitrous oxide (N_2O). The N_2O is one of the most powerful greenhouse gases, due to its high potential for global warming. In Brazil, the sector that emits more N_2O to the atmosphere is Agriculture, due to the high amounts of nitrogen fertilizers applied in the field. However, the country has an advanced public policy of adopting agricultural technologies that contribute to the reduction of this problem. The present review aims to show the dynamics of Nitrogen in agricultural and forest systems, the role of Nitrogen in the economy and present the main mitigation strategies in greenhouse gas emissions in agriculture.

Keywords: Biogeochemical nitrogen cycle; greenhouse gas mitigation; nitrous oxide; nitrogen emissions from agriculture.

Resumo

O nitrogênio é o elemento mais abundante da atmosfera, estando presente na constituição de vários gases atmosféricos, entre eles o óxido nítrico (N_2O). O mesmo está entre os principais gases de efeito estufa, em função do seu alto potencial de aquecimento global. No Brasil, o setor que mais emite N_2O para atmosfera é o agropecuário, em função das altas quantidades de fertilizantes nitrogenados aplicados no campo. No entanto, o país possui uma avançada política pública de adoção de tecnologias agrícolas que contribuem para a redução desse problema. A presente revisão pretende mostrar a dinâmica do Nitrogênio em sistemas agrícolas e florestais, o papel do Nitrogênio na economia e apresentar as principais estratégias de mitigação nas emissões de gases de efeito estufa na agricultura.

Palavras-chave: Ciclo biogeoquímico do nitrogênio; mitigação de gases de efeito estufa; óxido nítrico; emissões de nitrogênio pela agricultura.

* Embrapa Solos, Rua Jardim Botânico, 1024. 22460-000. Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

✉ renato.rodrigues@embrapa.br

DOI: [10.21577/1984-6835.20170110](https://doi.org/10.21577/1984-6835.20170110)

Dinâmica do Nitrogênio em Sistemas Agrícolas e Florestais Tropicais e seu Impacto na Mudança do Clima

Renato de Aragão R. Rodrigues,^{a,b,*} William Z. de Mello,^c Marcela C. G. da Conceição,^c Patrícia A. de Souza,^c Jacqueline Jesus N. da Silva^c

^a Embrapa Solos, Rua Jardim Botânico 1024, Jardim Botânico, 22460-000, Rio de Janeiro-RJ, Brasil. renatorodrigues.clima@gmail.com

^b Universidade Federal Fluminense, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biosistemas, 24210-240, Niterói, RJ, Brasil.

^c Universidade Federal Fluminense, Instituto de Química, Departamento de Geoquímica, 24020-141, Niterói, RJ, Brasil.

* renato.rodrigues@embrapa.br

Recebido em 19 de agosto de 2017. Aceito para publicação em 19 de agosto de 2017

1. Introdução
2. Histórico da negociação internacional sobre mudança do clima
3. Ciclo do Nitrogênio
4. Uso do Nitrogênio nos diferentes setores da economia
5. Deposição atmosférica de Nitrogênio
6. Emissão de N₂O dos solos agrícolas e florestais
7. Medidas de mitigação das emissões de N₂O na agricultura
 - 7.1. Integração Lavoura Pecuária Floresta (ILPF)
 - 7.2. Sistema Plantio Direto – SPD
 - 7.3. Recuperação de Pastagens Degradadas
 - 7.4. Fixação Biológica de Nitrogênio – FBN
 - 7.5. Florestas Plantadas
 - 7.6. Tratamento de Dejetos Animais
8. Conclusões

1. Introdução

O nitrogênio (N) é o elemento químico mais abundante da atmosfera, onde se

encontra predominantemente como nitrogênio molecular (N₂), uma forma gasosa e quimicamente muito estável. Sua razão de mistura no ar seco é 78,08 % e sua massa na atmosfera é 3,98 x 10²¹ g de N₂. Dos gases constituídos pelo nitrogênio, o óxido nitroso

(N₂O) é o segundo mais abundante na atmosfera¹.

É um gás muito estável na troposfera (camada que se estende da superfície até em média 15 km de altitude) da Terra. Sua decomposição se dá na estratosfera (camada da atmosfera de 15 a 50 km de altitude) predominantemente por fotólise, ao absorver radiação solar de comprimento de onda inferior a 300 nm (10⁻⁹ m), e, em menor parcela, por reação com o átomo de oxigênio eletronicamente excitado, representado por O(¹D).¹

Sua estabilidade química na troposfera lhe confere uma razão de mistura atual de 330 ppb (partes por bilhão; 10⁻⁹ mol de N₂O por mol de ar) e um tempo de vida na atmosfera de aproximadamente 120 anos. Os demais compostos gasosos de nitrogênio são mais reativos e menos abundantes, com razões de mistura na escala de ppt (partes por trilhão; 10⁻¹² mol por mol de ar), podendo, entretanto, atingir de dezenas a poucas centenas de ppb no ar de grandes áreas urbanas e industrializadas, e seus arredores.¹

Ainda menos abundantes e termicamente instáveis, há uma série de compostos orgânicos, como os nitratos de alquila de baixa massa molecular, peroxialquila e peroxiacila, dos quais o nitrato de peroxiacetila (PAN), CH₃C(O)O₂NO₂, é o mais conhecido. A amônia (NH₃) é a forma gasosa de nitrogênio reduzida (nox = -3) mais abundante na atmosfera, com razões de mistura na escala de ppt nos ambientes não poluídos até algumas dezenas de ppb nos ambientes poluídos. Sob a forma de partículas (solúveis em água) em suspensão no ar, os compostos de nitrogênio mais abundantes são os sais inorgânicos de amônio e nitrato. Na água da chuva predominam os íons nitrato (NO₃⁻) e amônio (NH₄⁺) e em menor abundância o nitrito (NO₂⁻). Além destes, tanto no material particulado atmosférico quanto na água da chuva, uma série de compostos nitrogenados orgânicos estão presentes, como ureia, aminas, aminoácidos, nitrofenóis, alquilamidas, alcaloides N-heterocíclicos e nitratos orgânicos.²

Globalmente, em média um terço (1/3) do nitrogênio total dissolvido na água da chuva são formas de nitrogênio orgânico.³ Há evidências recentes de que fração de nitrogênio orgânico solúvel na atmosfera é constituída principalmente de nitrogênio reduzido.² Em estudo realizado no sudeste do Brasil, foi verificado que a ureia, (NH₂)₂CO, representa de 40 a 100% do nitrogênio orgânico dissolvido, em amostras de água de chuva coletadas com coletores de deposição total (*bulk deposition samplers*).⁴

Os compostos de nitrogênio presentes na natureza subdividem-se em não-reativos e reativos.⁵ O primeiro é representado exclusivamente pelo N₂, face à sua elevada estabilidade química. Os reativos (Nr) são aqueles considerados biologicamente, fotoquimicamente e radiativamente ativos na atmosfera e biosfera de nosso planeta. Estes compostos e grupos de compostos de nitrogênio são todos aqueles supracitados.^{1,2}

O presente artigo tem como objetivo fazer uma revisão geral, a partir de documentos científicos e políticos, do papel do Nitrogênio em sistemas agrícolas e florestais, bem como na economia, no contexto da mudança do clima e nas políticas públicas brasileiras de mitigação de emissões de gases de efeito estufa.

2. Histórico da negociação internacional sobre mudança do clima

Os gases de efeito estufa existem naturalmente na atmosfera e são responsáveis por manterem a Terra mais quente do que ela seria sem a existência desses gases. Os principais gases de efeito estufa naturais são o vapor d'água, o dióxido de carbono (CO₂), o ozônio (O₃), o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O). Esse efeito estufa natural tem mantido a atmosfera da Terra por volta de 30°C mais quente do que ela seria na ausência dele, possibilitando a existência da vida como é conhecida no

planeta.

No entanto, as ações provenientes das atividades humanas – como geração de energia, produção agrícola e urbanização – têm acentuado a concentração desses gases na atmosfera, gerando um aumento na absorção do calor e consequente aumento da temperatura.

Por isso, em 1988, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e a Organização Mundial de Meteorologia (OMM) estabeleceram o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC), com o objetivo de avaliar cientificamente o conhecimento em mudança do clima e os possíveis impactos socioeconômicos e ambientais, e formular estratégias realistas para lidar com o problema. Esse foi um dos passos mais importantes no reconhecimento do efeito dos gases de efeito estufa (GEE) no sistema climático.

A partir do conhecimento científico produzido pelo IPCC, houve um movimento político internacional para criação de mecanismos eficientes de combate à mudança do clima. Esse processo culminou na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (também conhecida como Rio92 ou Eco92).

Dessa Conferência nasceu, dentre outras medidas, a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC ou em inglês, *United Nations Framework Convention on Climate Change* – UNFCCC). A UNFCCC é atualmente, a maior Convenção da Organização das Nações Unidas, com 195 países e constitui a base para o mecanismo jurídico-político multilateral de combate à mudança do clima. A UNFCCC tem como princípio a decisão por consenso, onde cada país membro representa uma “Parte” da Convenção. Por esse motivo, a reunião anual da Convenção, que teve sua primeira edição em 1995, em Berlim, se chama “Conferência das Partes” (COP).

Em 2009, durante a COP15, o Brasil apresentou um compromisso voluntário de

redução de emissões de 36,1% a 38,9% das emissões projetadas para o ano de 2020, deixando assim de emitir cerca de 1 bilhão de toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂eq). Esse constitui o maior esforço de redução de emissões do planeta. As propostas apresentadas em Copenhague foram internalizadas por meio da Lei 12.187/09 que instituiu a Política Nacional sobre Mudança do Clima. Em 2010 foram criados os Planos Setoriais para o atingimento desse compromisso voluntário.⁶

Com a finalidade de reduzir emissões de gases de efeito estufa (GEE) do setor agrícola, disseminar e financiar boas práticas agrícolas, o Governo Federal lançou em 2010 o Plano ABC. Sendo composto por sete programas, seis deles referentes às tecnologias de mitigação, e ainda um último programa com ações de adaptação às mudanças climáticas: Recuperação de Pastagens Degradadas; Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e Sistemas Agroflorestais (SAFs); Sistema Plantio Direto (SPD); Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN); Florestas Plantadas; Tratamento de Dejetos Animais; Adaptação às Mudanças Climáticas.⁶

Além desse compromisso assumido na COP 15, o Brasil apresentou à UNFCCC sua pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada (*intended Nationally Determined Contribution* – iNDC), durante a COP 21 em Paris.⁷

Na iNDC, o Brasil propôs ações de mitigação de emissões de GEE e ações de adaptação aos efeitos da mudança do clima, assim como meios para implementar essas ações no país e em outros países em desenvolvimento, por meio de cooperação Sul-Sul. Em relação à mitigação, o Brasil se comprometeu a reduzir as emissões de GEE em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025, além de uma contribuição indicativa subsequente de reduzir as emissões de GEE em 43% abaixo dos níveis de 2005, em 2030.⁷

No setor agrícola, os iNDCs visam fortalecer a estratégia para a intensificação sustentável na agricultura, por meio da

restauração adicional de 15 milhões de hectares de pastagens degradadas e pelo incremento de 5 milhões de hectares de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) até 2030.⁷

Esse novo compromisso, adicional ao proposto pelo Brasil na COP15, reforça amplamente a consolidação da Agricultura de Baixo Carbono como uma forma real de alcançar a intensificação sustentável da produção agrícola. Essas tecnologias contribuem para a mitigação das emissões de gases, aumento da produtividade e da renda, aumento dos benefícios sociais dos produtores e para a consolidação do desenvolvimento sustentável.⁷

O governo brasileiro percebeu que é necessário a implementação de boas práticas agrícolas, que visem a redução da emissão de GEE, o aumento da incorporação de carbono no solo e diminuir a pressão sobre as florestas nativas. Práticas de uso da terra, como agricultura e reflorestamento, possuem grande impacto no fluxo de GEE da superfície do solo e no incremento de carbono no solo.^{8,9} Essas mudanças podem alterar substancialmente a dinâmica do carbono do solo e afetar as trocas de gases de efeito estufa entre o solo e a atmosfera.^{10,11}

3. Ciclo do Nitrogênio

O ciclo global natural do N tem sido severamente alterado por atividades antrópicas relacionadas à produção de alimentos e a geração de energia.⁵ A entrada do N reativo nos ecossistemas terrestres (florestas e áreas de cultivo) mais que dobrou nos últimos dois séculos e vem contribuindo para o aumento das descargas fluviais de N nos corpos hídricos.^{12,13} O N_r desempenha ainda papel crítico nos aspectos relacionados às mudanças climáticas (incluindo as questões de mitigação, adaptação e impacto) devido ao crescimento contínuo (ca. 0,3 % por ano) das emissões antrópicas globais de N_2O desde o período Pré-Industrial, sendo

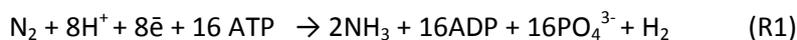
atribuído principalmente a expansão de áreas agrícolas e ao aumento do uso de fertilizantes.¹⁴

A ciclagem do N envolve os processos de entrada, via deposições atmosféricas (como formas dissolvidas de N orgânico e inorgânico) e, de saída, via escoamento fluvial (como formas dissolvidas e particuladas de N orgânico e inorgânico), infiltração da água no solo até ao lençol d'água subterrânea (principalmente como NO_3^-) e emissões de óxidos de N (N_2O e NO) para atmosfera resultante das atividades biológicas no solo,^{15,16} assim como as transferências internas (ciclagem dentro do próprio sistema) entre plantas, micro-organismos (decompositores e consumidores) e o meio-ambiente.^{15,17} A biogeoquímica do N é quase que inteiramente dependente das reações de oxirredução, mediada por processos físicos, químicos e biológicos.

Nestes ecossistemas a ciclagem do N engloba os seguintes processos: fixação biológica de N, amonificação, assimilação, nitrificação, desnitrificação e redução dissimilatória de nitrato a amônio (RDNA). Entretanto, as taxas de transformação de N (processos) podem variar de um ecossistema para o outro, uma vez que são controlados por uma série de fatores abióticos (água, temperatura, oxigênio e solo) e bióticos (comunidade de plantas e micro-organismos, qualidade da matéria orgânica, disponibilidade de nutrientes).

A fixação biológica do N (FBN) consiste em outra importante via de entrada de N, principalmente, em área de cultivo. Somente alguns grupos específicos de bactérias (bactérias dos gêneros *Frankia* e *Rhizobium*) e arqueias (micro-organismos estruturalmente similares embora evolutivamente distintas das bactérias) têm a capacidade de fixar diretamente o N_2 atmosférico. Isto é possível, uma vez que eles possuem a nitrogenase, um complexo enzimático que promove a catálise (quebra da tripla ligação entre os átomos de N) e redução da molécula do N_2 atmosférico a NH_3 (ou NH_4^+) conforme a reação 1:¹⁷

nitrogenase



As demais plantas adquirem N através da assimilação (pelas raízes) dos íons NH_4^+ e NO_3^- dissolvidos no solo. O fornecimento de NH_4^+ é dependente do processo de amonificação (ou mineralização do N). Este processo inicia-se com a ação de enzimas extracelulares (*i.e.*: celulase, protease e urease) dos organismos decompositores, que promovem a degradação do N orgânico particulado contido na matéria orgânica do

solo (derivada de folhas caídas no solo, raízes mortas e de material microbiano e animal) em Nitrogênio orgânico dissolvido (aminoácidos, ureia e ácidos nucleicos) e subsequente conversão à íons NH_4^+ (R2), disponível para a assimilação por plantas e imobilizado (absorção) por microorganismos.^{17,16} Eventualmente, o NH_4^+ é adsorvido nos minerais presentes na fração argila do solo (<0,02 mm).¹⁶



Os íons NH_4^+ provenientes da degradação da matéria orgânica estabelecem uma reação de equilíbrio com o NH_3 da solução do solo. Em condições de pH alcalino pode ocorrer a volatilização da NH_3 . O aumento da temperatura do solo e da velocidade do vento também favorece a razão $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ e conseqüentemente, a volatilização da NH_3 .¹⁸

No solo o NH_4^+ é biologicamente oxidado a NO_3^- durante a fixação do CO_2 . O processo

de nitrificação é iniciado com a oxidação do NH_4^+ a NO_2^- (R3) por bactérias do gênero *Nitrosomonas*, tendo como produto intermediário a hidroxilamina (NH_2OH), seguido da oxidação do NO_2^- a NO_3^- por bactérias do gênero *Nitrobacter* (R4). Os gases N_2O e NO são subprodutos desta reação. As bactérias nitrificadoras são obrigatoriamente aeróbicas e utilizam o O_2 como acceptor de elétrons.¹⁶

Nitrosomonas*Nitrobacter*

O NO_3^- disponível é assimilado por plantas e imobilizado por micróbios, mas não fixados nos argilominerais do solo. Portanto, é facilmente lixiviado, movimentando-se livremente pelo perfil do solo até as águas subterrâneas (infiltração), ou então, escoado lateralmente pelo solo até as águas fluviais¹⁹.

Em condições de esgotamento de O_2 (condição anóxica) e disponibilidade de

matéria orgânica (representada como CH_2O ; reação 5), as bactérias desnitrificadoras, principalmente as do gênero *Pseudomonas*, realizam a redução do NO_3^- (ou NO_2^-) sequencialmente a NO , N_2O e N_2 , por processo conhecido como desnitrificação. Essas bactérias utilizam nitrato como acceptor, e carbono orgânico como doador de elétrons.



A produção biológica de N_2O por nitrificação e desnitrificação é regulada por fatores ambientais tais como disponibilidade de O_2 , temperatura, umidade, pH e textura do solo, disponibilidade e qualidade da matéria orgânica.^{16, 20,21} As práticas de manejo e uso do solo favorecem a acumulação de C e N e a atividade de micro-organismos anaeróbicos e influenciam a capacidade de desnitrificação e alterações nas taxas de emissão de N_2O do solo para a atmosfera.²²

O NO_3^- também pode ser reduzido dissimilantemente (redução sem que ocorra assimilação) a NH_4^+ por bactérias fermentadoras estritamente anaeróbicas. A redução dissimilatória do NO_3^- a NH_4^+ (RDNA) requer condições similares ao processo de desnitrificação: matéria orgânica, disponibilidade de NO_3^- e condições anóxicas. Entretanto, a RDNA parece ser favorecida em condições mais redutoras. Este processo foi reportado em solos de florestas tropicais e representa um importante mecanismo de retorno de N inorgânico (na forma de NH_4^+) para o ambiente.^{23,24}

4. Uso do Nitrogênio nos diferentes setores da economia

A intensificação das atividades econômicas humanas, se iniciou com a Revolução Industrial e se prolonga até os dias de hoje. Essas atividades são grandes responsáveis pelo incremento das emissões dos GEE à atmosfera, principalmente do CO_2 , CH_4 e do N_2O .⁶

O N é um elemento utilizado em diversas atividades econômicas. Como já mencionado anteriormente, depois de passar por uma série de processos químicos ou biológicos, o N pode ser perdido para atmosfera via N_2O . No setor da agricultura o N é utilizado para fabricação de fertilizantes nitrogenados.^{25,26}

Os dados do Anuário estatístico do Brasil / IBGE de 2015,²⁷ relatam a produção bruta de fertilizante em 2014 (Tabela 01). Por meio deste, é possível observar que o fertilizante mais utilizado pelos agricultores em geral é a ureia. Já em relação às exportações, a Associação Nacional para Difusão de Adubos, relata que em 2016, a exportação de fertilizantes e formulações NPK foi de 549.444 em toneladas de produto.²⁸

Tabela 1. Produção bruta de fertilizantes nitrogenados em 2014 segundo o Anuário estatístico do Brasil/IBGE de 2015

Produção de Fertilizantes (2014)	Quantidade toneladas
Ureia	830.374
Nitrato de amônia	278.586
Sulfato de amônio	302.551

O uso irregular de fertilizantes na agricultura é o principal responsável pela contaminação das águas subterrâneas e superficiais. Esse uso inadequado aumenta as perdas de N no ambiente, nas formas como amônia (NH_3), amônio (NH_4), óxidos de nitrogênio (NO_x), óxido nitroso (N_2O) e nitrato (NO_3).⁵ A nível mundial, o setor da agricultura e da pecuária, são responsáveis

pela emissão de 2/3 do N_2O para atmosfera.²⁹

Segundo IPCC,³⁰ em menos de 10 anos, as emissões de GEE via fertilizantes sintéticos se tornarão a maior fonte de emissões em relação às de dejetos depositados em pastagens e a segunda maior de todas as categorias de emissões agrícolas.

Outro setor da economia que contribui

significativamente com as emissões de GEE e também utiliza N durante seu processo de produção é o setor de energia. O carvão mineral de origem fóssil foi uma das primeiras fontes de energia utilizadas em larga escala pelo homem. Ele era usado para gerar vapor e movimentar as máquinas e, no fim do século XIX, esse vapor produzido era utilizado na produção de energia elétrica.^{31,32} O carvão mineral é considerado uma das formas mais agressivas ao meio ambiente, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica,³² o dano mais severo em relação ao uso do carvão mineral é a emissão de partículas com nitrogênio (NO_x), enxofre (SO_x) e também de CO_2 .

Dados do relatório de emissões de GEE, do Observatório do Clima,³³ mostram que 71% das emissões de gases do setor de energia em 2014 foram oriundas da queima do petróleo, seguido do gás natural com 17% e por último o carvão mineral com 6% das emissões.

Os processos industriais também são setores da economia que acabam por emitir GEE para atmosfera e, a indústria química é um exemplo disso. Dentre as emissões deste subsetor, as de maiores importâncias são as emissões de CO_2 resultantes da produção de amônia, as emissões de N_2O e NO_x que ocorrem durante a produção de ácido nítrico e as emissões de N_2O , CO e NO_x resultantes da produção de ácido adípico.³⁴ O ácido adípico é a matéria prima para fabricação de fibras sintéticas, plásticos, lubrificantes sintéticos e, o mais importante ácido alifático dicarboxílico, usado na fabricação de poliéster e nylon 6.6.³⁵

Porém, devido a projetos no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), de 2005 a 2011, a indústria de produção de ácido adípico e ácido nítrico, apresentaram reduções significativas em relação a suas emissões de GEE.³⁶ Em 1990, as estimativas das emissões gerais de gases da indústria química era de 7.500 Gg CO_2eq e, em 2012 novas estimativas relataram que houve uma redução nas emissões, elas caíram para 3.446 Gg CO_2eq .³⁶

A mudança do uso da terra também se enquadra entre os setores que mais emitem GEE no Brasil. O setor de mudança e uso da terra e de florestas, respondem por mais de 2/3 das emissões brutas de CO_2eq do Brasil, deste volume, 2/3 correspondem ao desmatamento e o restante a produção agrícola e pecuária.³⁷ As mudanças no uso e cobertura do solo podem influenciar na dinâmica dos ciclos de C, do N e ainda, nas mudanças dos padrões dos fluxos de GEE.³⁸⁻⁴⁰ A matéria orgânica do solo é a principal fonte de N, logo com a alteração e remoção da superfície do solo, aumenta-se os processos de erosões e, conseqüentemente acabam contribuindo com uma maior perda de N do solo.³⁸

O relatório de 2014, do Observatório do Clima,⁴¹ referente a evolução das emissões de gases no Brasil de 1990 a 2012, relata que a durante esse período, esse setor foi responsável pela emissão de 28 bilhões tCO_2eq , correspondendo as 61% do total das emissões brasileira nesse período. O relatório de MCTI,³⁶ aborda as estimativas das emissões em CO_2eq referente a 2012 para o setor mudança e uso da terra nos diferentes biomas. Segundo o relatório, o Bioma Cerrado ocupa a primeira posição com emissão de 109 Tg CO_2eq , em segundo lugar está o bioma Amazônia com 33 Tg CO_2eq e o terceiro lugar está ocupado pelo bioma Pampa, responsável pela emissão de 16Tg CO_2eq .

Também durante o período de 1990 a 2012, o setor de resíduo brasileiro, foi responsável pela emissão de 883 milhões de T CO_2eq . Nesse período as emissões passaram de 28,6 Mt CO_2eq para 46,9 Mt CO_2eq , um incremento de 64% em 22 anos.⁴² Os aumentos dessas emissões estão vinculados ao crescimento da população urbana e conseqüente aumento da produção de vários tipos de resíduos sendo que, muitos deles são descartados no meio ambiente sem tratamento adequado. Os resíduos sólidos das indústrias de couro é um exemplo de rejeito com altas concentrações de N em sua composição e, que acaba contaminando o

meio ambiente devido à falta de um processo de reciclagem apropriado.⁴³

Os dejetos e a urina de animais também apresentam altos teores de N orgânico em sua composição e, por meio dos processos de nitrificação e desnitrificação, acabam por produzir e emitir grandes quantidades de N₂O para atmosfera, como é o caso dos dejetos da criação de porcos, de vacas leiteiras entre outros.⁴⁴⁻⁴⁶

5. Deposição atmosférica de Nitrogênio

As deposições atmosféricas de nitrogênio, bem como de outros elementos, ocorrem basicamente de duas formas, seca e úmida. A primeira representa o processo de transferência de material particulado em suspensão e de substâncias gasosas da atmosfera para a superfície do planeta. Esse processo depende de uma série de variáveis de controle, em destaque a composição química da partícula ou do gás, sua solubilidade em água, tamanho da partícula, velocidade do vento e características da superfície de deposição, que irão definir a velocidade de deposição. O produto da concentração da partícula ou do gás pela velocidade de deposição resulta no fluxo de deposição expresso em unidade de massa por área e tempo.

A deposição úmida representa tudo que é transferido da atmosfera para a superfície através da água da chuva. Nesse caso, o fluxo de deposição é o produto da concentração da substância dissolvida na água da chuva pela altura pluviométrica (espessura de chuva precipitada). A deposição seca de nitrogênio inorgânico recentemente estimada para a toda a superfície continental global é de 34,3 Tg N ano⁻¹ ($T = 10^{12}$), dos quais 65% são atribuídos à amônia, e o restante, nessa ordem, ao dióxido de nitrogênio (NO₂), ácido nítrico (HNO₃), amônio e nitrato.⁴⁷

Regionalmente, a deposição seca de nitrogênio inorgânico na América do Sul foi

estimada em 3,31 Tg N ano⁻¹, dos quais, nesse caso, 54 e 34% foram atribuídos à amônia e ao dióxido de nitrogênio. Considerando a área da América do Sul (1,78 x 10⁹ ha), em média, o fluxo de deposição de nitrogênio inorgânico é de 1,85 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ neste continente. Globalmente, em média, os fluxos de deposição seca de NH₃, NO₂, HNO₃, NH₄⁺ e NO₃⁻, estimados foram 1,64, 0,45, 0,27, 0,11 e 0,02 kg N ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente.⁴⁷ Os valores mais elevados, considerando os cinco compostos de nitrogênio, foram estimados para o leste da China, na faixa de 50-55 kg N ha⁻¹ ano⁻¹.

A deposição atmosférica total (seca e úmida) global de nitrogênio estimada é de 10⁶ Tg N ano⁻¹, distribuídos em 56% nos ambientes continentais, 19% costeiros e 25% oceânicos.⁴⁸ Com base no mapa de deposição total gerado, os fluxos de deposição úmida nas regiões tropicais variam de 1 a 4 kg N ha⁻¹ ano⁻¹, e na maior parte do Brasil,⁴⁸ especialmente nas regiões nordeste, sudeste e centro-oeste a faixa é de 2 a 4 kg N ha⁻¹ ano⁻¹. A média global da deposição atmosférica de N sobre os ecossistemas terrestres é 3,5 kg N ha⁻¹ ano⁻¹.

No Brasil, o aporte atmosférico de nitrogênio inorgânico (NH₄⁺, NO₃⁻), diretamente medido por meio de coletores automáticos ou de deposição total, varia de 5,0 a 20 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ em áreas extensamente afetadas por queima de biomassa e nos arredores dos grandes centros urbanos.^{4,49-52} Em áreas mais preservadas do país, como a bacia Amazônica,^{53,54} o aporte atmosférico de nitrogênio inorgânico tende a ser inferior a 5,0 kg N ha⁻¹ ano⁻¹. No setor litorâneo do nordeste do Brasil os valores são ainda mais baixos. De Ilhéus à Itabuna (cerca de 40 km da costa), na Bahia, foi verificado que o aporte de nitrogênio inorgânico fica na faixa de 2 a 3 kg N ha⁻¹ ano⁻¹.⁵⁵

Em diversas regiões do mundo, o aporte atmosférico de nitrogênio vem aumentando em virtude do crescimento contínuo da fixação do N₂ atmosférico (transformação de N₂ em formas de Nr), através de processos relacionados a algumas atividades humanas.

Esses processos transformam o N_2 da atmosfera em (1) amônia pelo processo Haber-Bosch (em escala industrial desde a segunda década do século XX), destinada principalmente à produção de fertilizante, (2) amônia pelo processo de fixação biológica do nitrogênio (FBN) por microorganismos e (3) óxidos de nitrogênio durante a queima de combustíveis fósseis (principalmente) e biocombustíveis. Em razão disso,⁵⁶ foi estimado, comparativamente, os valores do aporte atmosférico de nitrogênio em 34 biomas do planeta potencialmente suscetíveis a impactos provocados por excesso de nitrogênio.

Estes autores estimaram que em meados da década de 1990 estas áreas já recebiam em média um aporte atmosférico de nitrogênio 50% superior à média global e que em 2050 poderá mais que dobrar. No caso da Mata Atlântica, verificaram que, em meados da década de 90, aproximadamente um terço da área total remanescente recebia um aporte atmosférico superior a $10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Já para 2050, o cenário é de que 95% e dois terços da área total remanescente estarão recebendo aportes superiores a 10 e $15 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente.

6. Emissão de N_2O dos solos agrícolas e florestais

As atividades antropogênicas contribuem para o desequilíbrio do N no sistema terrestre, e estas vêm causando sérias consequências ambientais, em particular relacionado com as mudanças climáticas, através da liberação de N_2O para atmosfera.⁵⁷ O N_2O pode ser emitido para atmosfera por meio de processos naturais do solo e dos oceanos, ou ainda, por fontes antrópicas, como aplicação de fertilizantes e queima de biomassa.⁵⁷

Como já mencionado, as maiores emissões de N_2O de solos agrícolas, estão relacionadas à aplicação de fertilizantes

nitrogenados, aplicação de dejetos de animais e manejo inadequado do solo.^{26,58}

A rotação de leguminosas com cultura agrícola é uma das estratégias para redução da emissão de GEE, principalmente do N_2O . Essa rotação reduz a aplicação de fertilizantes nitrogenados liberando maiores teores de N mineral no solo oriundos dos resíduos da cultura e, ainda contribui com um aumento no estoque de carbono no solo.^{59,60}

Além das aplicações de fertilizantes, as práticas agrícolas podem influenciar na produção de N_2O para atmosfera. O manejo agrícola pode causar alterações nas propriedades físico-químicas do solo e consequente impacto nas emissões de N_2O do solo.⁶¹ Com o manejo agrícola, a textura do solo acaba sofrendo alterações, e este influencia na maior ou menor capacidade de retenção de água no solo. A umidade associada à temperatura, são importantes fatores que influenciam na velocidade dos processos de nitrificação e desnitrificação.^{18,20} A ocorrência da nitrificação ou da desnitrificação é resultado do nível de oxigênio do solo logo, com um manejo inadequado, a textura do solo acaba sofrendo alterações e podem influenciar no teor de umidade e oxigênio do solo, e consequente aumento da produção de N_2O .⁶²⁻⁶⁴

Já em áreas florestais, existem dois cenários relacionados à emissão de GEE do solo. No primeiro, áreas florestais sejam elas nativas ou plantadas, também ocorre de forma natural os processos de nitrificação e desnitrificação no solo e consequente produção de N_2O . Estudos relatam uma maior emissão de N_2O em solos de floresta nativa em relação a floresta plantada.⁶⁵

Esses estudos relatam que a matéria orgânica do solo da mata nativa apresenta baixa relação C/N, o que estimula o processo de mineralização, liberando mais NO_3^- , e este tende a entrar nas vias de formação do N_2O no solo. Já solos de florestais tropicais em função das altas temperaturas e umidade, apresentam uma taxa decomposição da

matéria orgânica do solo mais rápida. Isso leva a uma maior perda de nutrientes via processos de mineralização.^{66,67}

O segundo cenário está relacionado ao serviço ambiental que a floresta presta ao meio ambiente como um todo. Segundo a FAO,⁶⁸ as florestas são consideradas importantes sumidouros de carbono, pois as árvores e vegetação em geral, no processo de fotossíntese, absorvem CO₂ da atmosfera e o armazenam na forma de carbono, reduzindo assim as emissões de CO₂ para atmosfera. Em áreas de floresta nativa ou plantada, existe uma grande massa de serapilheira depositada sobre o solo. Esse resíduo florestal acaba por contribuir com uma maior estocagem e ciclagem de nutrientes no meio ambiente.⁶⁹ Em estudo realizado após três anos de monitoramento em uma área com monocultivos e cultivos mistos de Eucalipto e Acácia, foi relatada um incremento no conteúdo de C e N do solo.⁷⁰

Segundo os dados da Associação Brasileira de Celulose e Papel,⁷¹ o setor de base florestal tem um papel importante em relação à mitigação de GEE, pois as atividades de reflorestamento contribuem com o sequestro de CO₂ da atmosfera e com os estoques de C nas áreas de plantio e de reservas florestais. A associação discorre que nos anos de 2009 e 2010 o setor de papel e celulose contribuiu com a redução de 8,28% das emissões de CO₂eq para atmosfera.

Em geral, as florestas contribuem para a mitigação da mudança do clima, pois a mesma é envolvida em atividades de florestamento e reflorestamento, redução de desmatamento, manejo florestal e de produtos florestais, matéria prima para produção de bioenergia e ainda, melhoria genética das espécies afim de aumentar sua produtividade em biomassa.⁷²

7. Medidas de mitigação das emissões de N₂O na agricultura

São muitas as possibilidades de mitigação

das emissões de GEE (sistema plantio direto, recuperação de pastagens, manejo de dejetos, integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), fixação biológica de nitrogênio (FBN), plantio de florestas, redução das queimadas, dentre outras) para o setor agrícola que impactam diretamente nas emissões de N₂O. Aqui serão abordadas as medidas de mitigação propostas no Plano ABC.

7.1. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF)

O sistema ILPF consiste na implementação de diferentes sistemas de produção de grãos, fibras, carne, leite, bioenergia e outros na mesma área, em consórcio, plantio sequencial ou rotacionado, buscando efeitos sinérgicos entre os componentes do agroecossistema, contemplando a adequação ambiental, a valorização do homem e a viabilidade econômica.⁷³⁻⁷⁵ O Plano ABC prevê a expansão de 4,0 milhões de hectares, com um potencial de mitigação de 18-22 milhões MgCO₂eq.

Os benefícios de sistemas integrados, como a ILPF, incluem o aumento da fertilidade do solo, devido ao acúmulo de matéria orgânica,⁷⁶ melhoria da ciclagem de nutrientes e melhoria na agregação do solo.⁷⁶⁻⁷⁸ A rotação de culturas, como acontece em sistemas de ILPF, também pode ajudar a diminuir pragas, doenças e ervas daninhas, reduzindo assim os custos de produção, aumentando os resultados econômicos e ambientais.^{79,80}

7.2. Sistema Plantio Direto – SPD

A técnica de sistema plantio direto na palha consiste na eliminação da movimentação do solo por meio do uso de arados e grades, priorizando a rotação de culturas e a manutenção da cobertura vegetal durante todo o ano.⁸¹ De acordo com Plano ABC, o Governo Federal prevê um aumento de área de 8,0 milhões de hectares

com este tipo de manejo, com um potencial de mitigação de 83 – 104 milhões MgCO₂eq. Um dos efeitos dessa técnica sobre as emissões de GEE é a redução, a cada safra, em quase 50% ou algo próximo de 90 quilos de dióxido de carbono por hectare, devido à eliminação das operações de aração e gradagem.⁸²

Para exemplificar o uso do SPD para acúmulo de carbono e nitrogênio no solo, estudos de longo prazo conduzidos no Brasil, localizados na região tropical e subtropical, observaram que foi possível aumentar de forma significativa o estoque de carbono orgânico do solo (COS) sob SPD quando comparados com cultivos sob preparo convencional. Isso ocorre devido ao fato da rotação de culturas incluir leguminosas de alta eficiência para fixação biológica de nitrogênio (FBN) e da permanente cobertura de resíduos vegetais, oriundos das culturas, no solo. Segundo estimativas,⁸³⁻⁸⁶ a conversão de áreas de plantio convencional para o sistema plantio direto acarretaria aumento médio de acumulação de carbono no solo da ordem de 0,5 Mg por hectare ao ano.

7.3. Recuperação de Pastagens Degradadas

A degradação das pastagens ocorre devido à falta de manejo adequado, com uso de queimadas, uso de espécies não adaptadas, superpastejo, dentre outras. Esse quadro leva à queda de suporte das pastagens, elevação dos custos de produção (carne e/ou leite), com consequente aumento da pressão por novas áreas de produção (aumento do desmatamento). O Plano ABC prevê a recuperação de 15 milhões de hectares de pastagens degradadas, cujo potencial de mitigação é da ordem de 83-104 milhões MgCO₂eq.

As leguminosas desempenham um papel importantíssimo nas pastagens, que é a incorporação do nitrogênio atmosférico ao

sistema solo planta animal.⁸⁷⁻⁹⁰ A redução da disponibilidade de nitrogênio no solo com o envelhecimento de pastagens sem leguminosas, que não recebem adubação nitrogenada, é um dos principais fatores responsáveis pela queda da produtividade e pela degradação destas pastagens. O uso de leguminosas forrageiras em consórcio pode contribuir para manter a produtividade da pastagem e, ao mesmo tempo, incrementar a fertilidade do solo e disponibilizar mais proteína aos animais, além de aumentar os estoques de carbono e nitrogênio no solo.⁸⁷⁻⁹²

7.4. Fixação Biológica de Nitrogênio - FBN

O uso de fertilizantes na agricultura emite muito GEE em função de sua industrialização, distribuição e utilização nos sistemas de produção. Após a aplicação em áreas agrícolas, os fertilizantes à base de P ou K não promovem, pelo menos diretamente, emissões de GEE, ao contrário do que ocorre com os nitrogenados, que emitem N₂O devido aos processos biológicos de nitrificação e desnitrificação.

A FBN desempenha papel importante no aporte de N aos ecossistemas agrícolas. Estima-se que no mundo a FBN em áreas cultivadas contribua com 32 Tg ano⁻¹ de N, o que corresponde a 30% do N produzido na forma de fertilizantes. Sendo assim, o Plano ABC tem como objetivo aumentar em 5,5 milhões de hectares o uso da FBN, cujo potencial de mitigação é da ordem de 10 milhões Mg CO₂eq. O caso mais eficiente é a simbiose de *Bradyrhizobium* com soja no Brasil.

Algumas culturas, como a soja, dispensam integralmente a adubação nitrogenada.⁹³ Isso porque, com a FBN é possível suprir as necessidades nutricionais da planta. É importante ressaltar que, a FBN para outras culturas importantes, como o feijoeiro e o amendoim, não consegue, com a tecnologia atualmente disponível, suprir totalmente a

demanda por N dessas culturas, mas permite reduzir as doses de N aplicadas como fertilizantes químicos.⁹⁴ Alguns estudos indicam a possibilidade de se reduzir as doses de fertilizante nitrogenado, atualmente recomendadas, em até 50%, no caso da cana-de-açúcar, milho e trigo com o uso deste tipo de manejo.^{93,95}

7.5. Florestas Plantadas

O governo federal espera ampliar em 3 milhões de hectares, as áreas com florestas comerciais (Plano ABC) até 2020. O plantio de florestas para a produção de madeira, celulose e papel, e carvão vegetal se apresenta como alternativa tecnológica que viabiliza a geração de renda e o aumento do sequestro de carbono da atmosfera, contribuindo para atenuar os efeitos das mudanças climáticas. Além das reduções de emissões, as florestas proporcionam a conservação do solo e água, manutenção das bacias hidrográficas, aumento dos estoques de carbono, redução do desmatamento de florestas nativas, dentre outros.⁶

7.6. Tratamento de Dejetos Animais

Cerca de 20% dos resíduos produzidos por animais, bovinos e suínos, são aplicados diretamente sobre os solos, sendo assim uma das maiores fontes de N₂O na agricultura. O Plano ABC prevê a ampliação no tratamento de 4,4 milhões de m³ de dejetos de animais, cujo potencial de mitigação é de 6,9 milhões Mg CO₂eq. Os biodigestores para dejetos de suínos vêm sendo cada vez mais utilizados por produtores integrados a grandes corporações contribuindo com grandes reduções de GEE. Uma vez que esses biodigestores são usados para geração de energia e/ou queima de CH₄ e N₂O emitindo CO₂.⁶

8. Conclusões

O grande aumento das emissões de gases de efeito estufa, responsável pela mudança do clima atual foi severamente agravada nos últimos 100 anos e hoje o quadro está muito próximo de se tornar irreversível, mesmo em longo prazo.

Nesse cenário, o nitrogênio representa um papel de grande relevância, especialmente sob a forma do gás N₂O, largamente emitido pelo setor industrial e pela agropecuária. Por outro lado, o N é absolutamente essencial para esses importantes setores da economia. Desta forma, produzir mais e melhor com o menor impacto possível ao meio ambiente tornou-se imprescindível.

Entender o ciclo do N e quais setores da economia contribuem para emissão de N₂O são fundamentais para o direcionamento de políticas públicas e ações de mitigação que visem a redução da emissão desse gás para a atmosfera.

Nesse contexto, o Brasil tem se mostrado um ator extremamente relevante e proativo nas negociações internacionais. Ações de mitigação para reduzir a emissão desse gás, já são implementadas e estimuladas pelo governo brasileiro. Para o setor agrícola essas ações são internalizadas principalmente pelo Plano ABC. As tecnologias adotadas pelo Plano ABC são, em grande parte, dependentes do manejo adequado do N nos sistemas agrícolas e florestais. O uso racional dos fertilizantes nitrogenados e o manejo adequado dos dejetos animais são de fundamental importância para o estabelecimento da intensificação sustentável da agricultura.

No entanto, apesar de todo esse protagonismo do Brasil em ações de mitigação, muito ainda precisa ser feito no setor agrícola, como a recuperação de uma grande área de pasto degradados, que além de pouco produtivas contribuem para o agravamento do efeito estufa; o aprimoramento, o desenvolvimento, a

transferência e a adoção de tecnologias agrícolas sustentáveis; o monitoramento das ações de implementação das políticas públicas; a certificação de propriedades que adotam essas tecnologias; a capacitação adequada da assistência técnica e extensão rural no país e o estabelecimento de mecanismos de pagamento por serviços ambientais para os produtores que adotam as tecnologias.

Referências Bibliográficas

- ¹ Seinfeld, J. H.; Pandis, S. N.; *Atmospheric chemistry and physics from air pollution to climate change*, John Wiley & Sons Inc. 2006.
- ² Jickells, T.; Baker, A. R.; Cape, J. N.; Cornell, S. E.; Nemitz, E. The cycling of organic nitrogen through the atmosphere. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* **2017**, *368*, 1621. [CrossRef]
- ³ Cape, J. N.; Cornell, S. E.; Jickells, T. D.; Nemitz, E. Organic nitrogen in the atmosphere - where does it come from? A review of the sources and the methods. *Atmospheric Research* **2011**, *102*, 30. [CrossRef]
- ⁴ de Souza, P. A.; Ponette-González, A. G.; de Mello, W. Z.; Weathers, K. C.; Santos, I. A. Atmospheric organic and inorganic nitrogen inputs to coastal urban and montane Atlantic Forest sites in southeastern Brazil. *Atmospheric Research* **2015**, *160*, 126. [CrossRef]
- ⁵ Galloway, J. N.; Aber, J. D.; Erisman, J. W.; Seitzinger, S. P.; Howarth, R. W.; Cowling, E. B.; Cosby, B. J. The nitrogen cascade. *BioScience* **2003**, *53*, 341. [CrossRef]
- ⁶ Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura: plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono) / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Ministério do Desenvolvimento Agrário, coordenação da Casa Civil da Presidência da República. – Brasília: MAPA/ACS, 2012. 173 p. [Link]
- ⁷ Ministério das Relações Exteriores. Contribuição apresentada pelo Brasil às Nações Unidas (“iNDC”) para o acordo sobre mudança do clima que será adotado na Conferência de Paris (COP-21) – 27 de setembro de 2015. Disponível em: <<http://www.itamaraty.gov.br/pt-BR/ficha-pais/11915-contribuicao-brasil-indc-27-de-setembro>> Acesso em: 28 julho 2017.
- ⁸ Smith, K. A.; Dobbie, K. E.; Ball, B. C.; Orlanski, P. Oxidation of atmospheric methane in Northern European soils, comparison with other ecosystems, and uncertainties in the global terrestrial sink. *Global Change Biology* **2000**, *6*, 791. [CrossRef]
- ⁹ Houghton, R. A. Temporal patterns of land-use change and carbon storage in China and tropical Asia. *Science China Chemistry* **2002**, *45*, 10. [Link]
- ¹⁰ Li, Y. L.; Peng, S. L.; Zhao, P.; Ren, H.; Li, Z. A study on the soil carbon storage of some land use types in Heshan, Guangdong, China. *Journal Mountain Science* **2002**, *20*, 548.
- ¹¹ Lixia, Z.; Weimin, Y.; Zhigang, Y.; Zhian, L.; Mingmao, D. Soil microbial characteristics in rehabilitation process of degraded ecosystems in Heshan. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* **2004**, *12*, 202. [Link]
- ¹² Erisman, J. W.; Galloway, J. N.; Seitzinger, S.; Bleeker, A.; Dise, N. B.; Petrescu, A. M. R.; Leach, A. M.; Vries, W. Consequences of human modification of the global nitrogen cycle. *Philosophical Transactions of the Royal Society Biological Sciences* **2013**, *368*, 116. [CrossRef]
- ¹³ Seitzinger, S. P.; Harrison, J. A.; Dumont, E.; Beusen, A. H. W.; Bouwman, A. F. Sources and delivery of carbon, nitrogen, and phosphorus to the coastal zone: An overview of Global Nutrient Export from Watersheds (NEWS) models and their application. *Global Biogeochemical Cycles* **2005**, *19*, 2606. [CrossRef]
- ¹⁴ Reay, D. S.; Davidson, E. A.; Smith, K. A.; Smith, P.; Melillo, J. M.; Dentener, F. Global agriculture and nitrous oxide emissions.

Nature Climate Change **2012**, *2*, 410. [CrossRef]

¹⁵ Gundersen, P.; Bashkin, V. Nitrogen Cycling. In: Biogeochemistry of small catchments: a tool for environmental research. 1994. Edited by Moldan, B and Cerny, J., Wiley and Sons Ltd.

¹⁶ Schilesinger, W. H.; Bernhardt, E. S.; *Biogeochemistry – an analysis of global change*, 3rd, Elsevier, 2013.

¹⁷ Chaplin III, F. S.; Matson, P. A.; Vitousek, P. M.; *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*, 2nd ed, Springer, 2013.

¹⁸ Bouwman, A. F.; Boumans, L. J. M. Estimation of global NH₃ volatilization loss from synthetic fertilizers and animal manure applied to arable lands and grasslands. *Global Biological Cycles* **2002**, *16*, 1024. [CrossRef]

¹⁹ Brady, N. C.; Weil, R. R.; *Elementos da natureza e propriedades do solo*, 3rd ed., Bookman, 2013.

²⁰ Butterbach-Bahl, K.; Baggs, E. M.; Dannenmann, M.; Kiese, R.; Zechmeister-Boltenstern, S. Nitrous oxide emissions, from soils: how well do we understand the processes and their controls? *Philosophical Transactions of the Royal Society Biological Sciences* **2013**, *368*, 122. [CrossRef]

²¹ Rodrigues, R. A. R.; de Mello, W. Z. Fluxos de óxido nitroso em solos com cobertura de floresta Ombrófila Densa Montana na Serra dos Órgãos, Rio de Janeiro. *Química Nova* **2012**, *35*, 1553. [CrossRef]

²² Xu, W.; Xu, Z.; Cai, Z.; Reverchon, F. Review of denitrification in tropical and subtropical soils of terrestrial ecosystems. *Journal of Soil and Sediments* **2013**, *13*, 699. [CrossRef]

²³ Silver, W. L.; Liptzin, D; Almaraz, M. Soil redox dynamics and biogeochemistry along a tropical elevation gradient. *Ecological Bulletins* **2013**, *54*, 195. [Link]

²⁴ Templer, P. H.; Silver, W. L.; Pett-Ridge; DeAngelis, K. M.; Firestone, M. K. Plant and microbial controls on nitrogen retention and loss in a humid tropical forest. *Ecology* **2008**, *89*, 3030. [CrossRef]

²⁵ Spiro, T. G.; Stigliani, W. M.; *Clima*, Química Ambiental. 2a. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009, cap.6.

²⁶ Baird, C.; Cann, M. *Em Energia e Mudanças Climáticas*; Química Ambiental; 4ed, Porto Alegre: Bookman, 2011. cap. 6.

²⁷ Anuário estatístico do Brasil / IBGE 2015 - Rio de Janeiro: IBGE, 2015, 75. [Link]

²⁸ ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos. Disponível em: <<http://www.anda.org.br/estatistica/PrincipaisIndicadores2017.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2017.

²⁹ FAO- Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO Statistical Yearbook - World Food and Agriculture 2013. [Link]

³⁰ IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. In: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. [Link]

³¹ Vichi, F. M.; Mansor, M. T. C. Energia, meio ambiente e economia: o Brasil no contexto mundial. *Química Nova* **2009**, *32*, 757. [CrossRef]

³² ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). Atlas de energia elétrica do Brasil / Agência Nacional de Energia Elétrica. 3. ed., Brasília : Aneel, 2008. [Link]

³³ Observatório do Clima. Análise da evolução das emissões de GEE no Brasil (1990-2012) [recurso eletrônico]: setor de energia / Instituto de Energia e Meio Ambiente (Iema). – São Paulo: Observatório do Clima, 2014. 51 p. [Link]

³⁴ Brasil. Ministério da Ciência e Tecnologia. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. — Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010. cap.1. [Link]

³⁵ MCT- Ministério da Ciência e Tecnologia. Emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais: indústria química. Segundo inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa. Relatórios de referência 2010. [Link]

³⁶ MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. 2014, 2a. ed. [Link]

- ³⁷ Gouvello, C.; Soares Filho, B. S.; Nassar, A. (Coord.). Estudo de baixo carbono para o Brasil: relatório de síntese técnica: uso da terra, mudanças do uso da terra e florestas. Washington, DC: The World Bank, 2010. [\[Link\]](#)
- ³⁸ Bortolon, E. S. O.; Mielniczuk, J.; Tornquist, C. G.; Lopes, F.; Fernandes, F. F. Simulação da dinâmica do carbono e nitrogênio em um argissolo do Rio Grande do Sul usando modelo century. *Revista Brasileira de Ciências do Solo* **2009**, *33*, 1635. [\[CrossRef\]](#)
- ³⁹ Fleischer, E.; Khashimov, I.; Hölzel, N.; Klemm, O. Carbon exchange fluxes over peatlands in Western Siberia: Possible feedback between land-use change and climate change. *Science of the Total Environment* **2016**, *545-546*, 424. [\[CrossRef\]](#)
- ⁴⁰ Ribeiro, K.; *Dissertação de Mestrado*. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2017. [\[Link\]](#)
- ⁴¹ Observatório do Clima. Análise da evolução das emissões de GEE no Brasil (1990-2012) [recurso eletrônico]: mudanças do uso da terra / Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (Imazon). - São Paulo: Observatório do Clima, 2014. 19 p. [\[Link\]](#)
- ⁴² Observatório do Clima. Análise da evolução das emissões de GEE no Brasil (1990-2012) [recurso eletrônico]: setor de resíduos / Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola (Imaflo) e ICLEI-Governos Locais pela Sustentabilidade (ICLEI). - São Paulo: Observatório do Clima, 2014. 17 p. [\[Link\]](#)
- ⁴³ Nogueira, F. G. E.; Castro, I. A.; Bastos, A. R. R.; Souza, G. A.; Carvalho, J. G.; Oliveira, L. C. A. Recycling of solid waste rich in organic nitrogen from leather industry: Mineral nutrition of rice plants. *Journal of Hazardous Materials* **2011**, *186*, 1064. [\[CrossRef\]](#)
- ⁴⁴ EPA. Summary Report: Global Anthropogenic Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions: 1990–2030. Office of Atmospheric Programs, Climate Change Division, US Environmental Protection Agency, Washington, DC, 2012. [\[Link\]](#)
- ⁴⁵ Philippe, F. X.; Nicks, B. Review on greenhouse gas emissions from pig houses: Production of carbon dioxide, methane and nitrous oxide by animals and manure. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **2014**, *199*, 10. [\[CrossRef\]](#)
- ⁴⁶ Owen, J. J.; Silver, W. L. Greenhouse gas emissions from dairy manure management: a review of field-based studies. *Global Change Biology* **2015**, *21*, 550. [\[CrossRef\]](#)
- ⁴⁷ Jia, Y.; Yu, G.; Gao, Y.; He, N.; Wang, Q.; Jiao, C.; Zuo, Y. Global inorganic nitrogen dry deposition inferred from ground and space-based measurements. *Scientific Reports* **2016**, *6*, 19810. [\[CrossRef\]](#)
- ⁴⁸ Vet, R.; Artz, R. S.; Carou, S.; Shawa, M.; Roa, C.-U.; Aas, W.; Baker, A.; Bowersox, van C.; Dentener, F.; Galy-Lacaux, C.; Hou, A.; Pienaar, J. J.; Gilletti, R.; Forti, M. C.; Gromov, S.; Hara, H.; Khodzher, T.; Mahowald, N. M.; Nickovic, S.; Rao, P. S. P.; Reid, N. W. A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus. *Atmospheric Environment* **2014**, *93*, 3. [\[CrossRef\]](#)
- ⁴⁹ de Mello, W. Z. Precipitation chemistry in the coast of the Metropolitan Region of Rio de Janeiro, Brazil. *Environmental Pollution* **2001**, *114*, 235. [\[CrossRef\]](#)
- ⁵⁰ Lara, L.; Artaxo, P.; Martinelli, L. A.; Victoria, R. L.; Camargo, P. B.; Krusche, A.; Ayers, G. P.; Ferraz, E. S. B.; Ballester, M. V. Chemical composition of rainwater and anthropogenic influences in the Piracicaba River Basin, Southeast Brazil. *Atmospheric Environment* **2001**, *35*, 4937. [\[CrossRef\]](#)
- ⁵¹ Rodrigues, R. A. R., de Mello, W. Z., de Souza, P. A. Aporte atmosférico de amônio, nitrato e sulfato em área de floresta Ombrófila Densa Montana na Serra dos Órgãos, RJ. *Química Nova* **2007**, *30*, 1842. [\[CrossRef\]](#)
- ⁵² Forti, M. C.; Bourotte, C.; Cicco, V.; Arcova, F. C. S.; Ranzini, M. Fluxes of solute in two catchments with contrasting deposition loads in Atlantic Forest (Serra do Mar/SP-Brazil). *Applied Geochemistry* **2007**, *22*, 1149. [\[CrossRef\]](#)
- ⁵³ Filoso, S.; Williams, M. R.; Melack, J. M. Composition and deposition of throughfall in a flooded forest archipelago (Negro River, Brazil). *Biogeochemistry* **1999**, *45*, 169. [\[CrossRef\]](#)

- ⁵⁴ Williams, M. R.; Fisher, T. R.; Melack, J. M. Chemical composition and deposition of rain in the central Amazon, Brazil. *Atmospheric Environment* **1997**, *31*, 207. [[CrossRef](#)]
- ⁵⁵ Araújo, T. G.; Souza, M. F. L.; de Mello, W. Z.; Silva, D. M. L. Bulk atmospheric deposition of major ions and dissolved organic nitrogen in the lower course of a tropical river basin, southern Bahia, Brazil. *Journal of the Brazilian Chemical Society* **2015**, *26*, 1692. [[CrossRef](#)]
- ⁵⁶ Phoenix, G. K.; Hicks, W. K.; Cinderby, S.; Kuylenstierna, J. C. I.; Stock, W. D.; Dentener, F. J.; Giller, K. E.; Austin, M. T.; Lefroy, R. D. B.; Gimeno, B. S.; Asmore, M. R.; Ineson, P. Atmospheric nitrogen deposition in world biodiversity hotspots: the need for a greater global perspective in assessing N deposition impacts. *Global Change Biology* **2006**, *12*, 470. [[CrossRef](#)]
- ⁵⁷ Sanford, R. A.; Wanger, D. D.; Wu, Q.; Chee-Sanford, J. C. C.; Thomas, S. H.; Cruz-Garcia, C.; Rodriguez, G.; Massol-Deyáe, A.; Krishnanif, K. K.; Ritalahti, K. M.; Nisseng, S.; Konstantinidis, K. T.; Löffler, F. E. Unexpected nondenitrifier nitrous oxide reductase gene diversity and abundance in soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **2012**, *109*, 19709. [[CrossRef](#)]
- ⁵⁸ Zanatta, J. A.; *Tese de Doutorado*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. [[Link](#)]
- ⁵⁹ Lupwayi, N. Z.; Kennedy, A. C. Grain Legumes in Northern Great Plains: Impacts on Selected Biological Soil Processes. *Agronomy Journal* **2007**, *99*, 1700. [[Link](#)]
- ⁶⁰ Tribouillois, H.; Cruz, P.; Cohan, J.-P.; Justes, E. Modelling agroecosystem nitrogen functions provided by cover crop species in bispecific mixtures using functional traits and environmental factors. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **2015**, *207*, 218. [[CrossRef](#)]
- ⁶¹ Kim, G. W.; Das, S.; Hwang, H. Y.; Kim, P. J. Nitrous oxide emissions from soils amended by cover-crops and under plastic film mulching: Fluxes, emission factors and yield-scaled emissions. *Atmospheric Environment* **2017**, *152*, 377. [[CrossRef](#)]
- ⁶² Bouwman, A. F.; Boumans, L. J. M.; Batjes, N. H. Emissions of N₂O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data. *Global Biogeochemical Cycles* **2002**, *16*, 6. [[CrossRef](#)]
- ⁶³ Barnard, R.; Leadley, P. W.; Hungate, B. A. Global change, nitrification, and denitrification: A review. *Global Biogeochemical Cycles* **2005**, *19*, 1. [[CrossRef](#)]
- ⁶⁴ Snyder, C. S.; Bruulsema, T. W.; Jensen, T. L.; Fixen, P. E. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **2009**, *133*, 247. [[CrossRef](#)]
- ⁶⁵ Coutinho, R. P.; Urquiaga, S.; Boddey, R. M.; Alves, B. J. R.; Torres, A. Q.; Jantalia, C. P. Estoque de carbono e nitrogênio e emissão de N₂O em diferentes usos do solo na Mata Atlântica. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* **2010**, *45*, 195. [[CrossRef](#)]
- ⁶⁶ Moreira, F. M. S.; Siqueira, J. O. *Metabolismos e Processos Microbianos; Microbiologia e Bioquímica do Solo*. 2d. Editora UFLA: Lavras, 2006, cap. 4.
- ⁶⁷ Costa, E. M.; Silva, H. F.; Ribeiro, P. R. A. Matéria orgânica do solo e o seu papel na manutenção e produtividade dos sistemas agrícolas. *Enciclopédia biosfera*, **2013**, *9*. [[Link](#)]
- ⁶⁸ FAO- Food and Agriculture Organization of the United Nations. Managing forests for climate change. 2010. [[Link](#)]
- ⁶⁹ Reis, G. L.; Lana, A. M. Q.; Maurício, R. M.; Lana, R. M. Q.; Machado, R. M.; Borges, I.; Neto, T. Q. Influence of trees on soil nutrient pools in a silvopastoral system in the Brazilian Savannah. *Plant Soil* **2010**, *32*, 185. [[CrossRef](#)]
- ⁷⁰ Rachid, C. T. C. C.; Balieiro, F. C.; Peixoto, R. S.; Pinheiro, Y. A. S.; Piccolo, M. C.; Chaer, G. M.; Rosado, A. S. Mixed plantations can promote microbial integration and soil nitrate increases with changes in the N cycling genes. *Soil Biology & Biochemistry* **2013**, *66*, 146. [[CrossRef](#)]
- ⁷¹ Bracelpa – Relatório de Sustentabilidade. Associação Brasileira de Celulose e Papel. 2010. [[Link](#)]
- ⁷² Krug, T. Impacto, vulnerabilidade e adaptação das florestas à mudança do clima. Parcerias Estratégicas 2008. [[Link](#)]
- ⁷³ Balbino, L. C.; Barcellos, A. de O.; Stone, L. F. Marco referencial: integração lavoura

- pecuária floresta ILPF. Brasília: Embrapa, **2011**. 130 p. [Link]
- ⁷⁴ Macedo, M. C. M. Integração lavoura pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. *Revista Brasileira de Zootecnia* **2009**, *28*, 133. [CrossRef]
- ⁷⁵ Nair, P. K. R. State of the art of agroforestry systems. *Forest Ecology and Management* **1991**, *45*, 5. [CrossRef]
- ⁷⁶ Salton, J. C.; Costa, A. R.; Zanatta, J. A. 19th World Congress of Soil Science, Brisbane, Brisbane, Austrália, 2010.
- ⁷⁷ Flores, J. P. C.; Cassol, L. C.; Anghinoni, I.; Carvalho, P. C. F. Atributos químicos do solo em função da aplicação superficial de calcário em sistema de integração lavoura-pecuária submetido a pressões de pastejo em plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **2008**, *32*, 2385. [CrossRef]
- ⁷⁸ Cantarella, H. Nitrogênio. Em: Fertilidade do solo; Novais, R. F. de; Alvarez, V. H.; Barros, N. F. de; Fontes, R. L.; Cantarutti, R. B.; Neves, J. C. L., eds.; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo : Viçosa, 2007. p.375-470.
- ⁷⁹ Lazzarotto, J. J.; dos Santos, M. L.; de Lima, J. E.; Moraes, A. Volatilidade dos retornos econômicos associados à integração lavoura-pecuária no Estado do Paraná. *Revista Economia Agrônômica* **2009**, *7*, 259. [Link]
- ⁸⁰ Martha Júnior, G. B.; Alves, E.; Contini, E. Dimensão econômica de sistemas de integração lavoura-pecuária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* **2011**, *46*, 1117. [CrossRef]
- ⁸¹ Bolliger, A.; Magrid, J.; Amado, T. J. C.; Skóra Neto, F.; Ribeiro M. F. S.; Calegari A.; Neergard, A. Taking stock of the brazilian “zero-till revolution”: A review of landmark research and farmers’ practice. *Advances in Agronomy* **2006**, *91*, 47. [Link]
- ⁸² Fernandes, H. C.; Silveira, J. C. M.; Rinaldi, P. C. N. Avaliação do custo energético de diferentes operações agrícolas mecanizadas. *Ciência e Agrotecnologia* **2008**, *32*, 1582. [CrossRef]
- ⁸³ Amado, T. J. C.; Mielniczuck, J. Plantio direto e rotação de culturas com leguminosas – uma excelente combinação para promover o incremento da capacidade produtiva do solo. *Revista Plantio Direto* **1999**, *50*, 23.
- ⁸⁴ Amado, T. J. C.; Bayer, C.; Eltz, F. L. F.; Brum, A. C. R.. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **2001**, *25*, 189. [CrossRef]
- ⁸⁵ Sisti, C. P. J.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2001. [Link]
- ⁸⁶ Cerri, C. E. P.; Bernoux, M.; Chaplot, V.; Volkoff, B.; Victoria, R. L.; Mellilo, J. M.; Paustian, K.; Cerri, C. C. Assessment of soil property spatial variation in an Amazon pasture: Basis for selecting an agronomic experimental area. *Geoderma* **2004**, *123*, 51. [CrossRef]
- ⁸⁷ Urquiaga, S.; Alves, B. J. R.; Jantalia; C. P.; Boddey, R. M. Variações nos estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa em solos das regiões tropicais e subtropicais do Brasil: uma análise crítica. *Informações Agrônômicas* **2010**, *12*. [Link]
- ⁸⁸ Boddey, R. M.; Alves, B. J. R.; de Oliveira, O. C.; Urquiaga, S. Em: *Mudanças Climáticas Globais e a Agropecuária Brasileira*; Lima, M.A.; Cabral, O.M.R.; Miguez, J.D.G., eds.; Embrapa Meio Ambiente: Jaguariúna, 2001.cap.18.
- ⁸⁹ Alves, B. J. R.; Zotarelli, L.; Fernandes, F. M.; Heckler, J. C.; Macedo, R. A. T.; Boddey, R. M.; Jantalia; C. C. P.; Urquiaga, S. Fixação biológica de nitrogênio e fertilizantes nitrogenados no balanço de nitrogênio em soja, milho e algodão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* **2006**, *41*, 449. [CrossRef]
- ⁹⁰ Calegari, A.; *Workshop Nitrogênio na Sustentabilidade de Sistemas Intensivos de Produção Agropecuária*, Dourados, Brasil, 2000.
- ⁹¹ Tarré, R.; Macedo, R.; Cantarutti, R. B.; de Rezende, C. P.; Pereira, J. M.; Ferreira, E.; Alves, B. J. R.; Urquiaga, S.; Boddey, R. M. The effect of the presence of a forage legume on nitrogen and carbon levels in soils under Brachiaria pastures in the Atlantic forest region of the South of Bahia, Brazil. *Plant and Soil* **2001**, *234*, 15. [CrossRef]
- ⁹² Silva, J. E.; Resck, D. V.; Corazza, E. J.; Vivaldi, L. Carbon storage in clayey oxisol cultivated pastures in the “Cerrado” region,

Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **2004**, *103*, 357. [[CrossRef](#)]

⁹³ Hungria, M.; Franchini, J. C.; Campo, R. J.; Crispino, C. C.; Moraes, J. Z.; Sibaldelli, R. N. R.; Mendes, I. C; Arihara, J. Nitrogen nutrition of soybean in Brazil: contributions of biological n₂ fixation and of n fertilizer to grain yield. *Canadian Journal of Plant Science* **2006**, *86*, 927. [[Link](#)]

⁹⁴ Carvalho, J. L. N.; Raucci, G. S.; Cerria, C. E. P.; Bernoux, M.; Feigl, B. J.; Wruck, F. J.;

Cerrib, C. C. Impact of pasture, agriculture and crop-livestock systems on soil C stocks in Brazil. *Soil & Tillage Research* **2010**, *110*, 175. [[CrossRef](#)]

⁹⁵ Kennedy, I. R.; Choudhury, A. T. M. A.; Kecskés, M. L. Non-symbiotic bacterial diazotrophs in crop-farming systems: can their potential for plant growth promotion be better exploited? *Soil Biology and Biochemistry* **2004**, *36*, 1229. [[CrossRef](#)]