UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL

CICLOS BIOGEOQUÍMICOS COMO SUBSÍDIO PARA A SUSTENTABILIDADE DO SISTEMA AGROINDUSTRIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR

Valmir Barbosa
Engenheiro Agrônomo

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL
Junho de 2007

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL

CICLOS BIOGEOQUÍMICOS COMO SUBSÍDIO PARA A SUSTENTABILIDADE DO SISTEMA AGROINDUSTRIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR

Valmir Barbosa

Orientador: Prof. Dr. Miguel Ângelo Mutton

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Campus de Jaboticabal como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal.

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL
Junho de 2007

Barbosa, Valmir
B238c Ciclos biogeoquímicos como subsídio para a sustentabilidade do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar / Valmir Barbosa – – Jaboticabal, 2007
xi, 117 f. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2007
Orientador: Miguel Àngelo Mutton
Banca examinadora: Ailto Antônio Casagrande e Raffaella Rossetto
Bibliografia

1. Cana-de-açúcar-vinhaça-resíduos. 2. Agroecossistema. 3. Modelagem. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 633.61: 504

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

VALMIR BARBOSA, natural de Cajuru, SP, em 06 de novembro de 1958, onde cursou o primeiro e o segundo grau. Cursou Agronomia na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal (UNESP – Campus de Jaboticabal) no período de 1978 a 1981. Trabalhou na Cia Agropecuária Santa Emília, em Mococa-SP entre 1982 e 1984. Contratado pela Cia Energética Santa Elisa, em Sertãozinho-SP, em 1984. Fez especialização em Gestão de Tecnologia pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), em São Carlos, de 1996 a 1997. Fez MBA em Gestão Estratégica de Negócios na Faculdade de Sertãozinho (FASERT) em 2000. Atualmente, na Cia Energética Santa Elisa, atua como gerente de engenharia e desenvolvimento agrícola.

A essência do conhecimento científico
é a sua aplicação prática.

Confúcio

A criação do conhecimento acontece na
reflexão sobre a prática.

Paulo Freire

DEDICATÓRIA

À minha mãe Dona Toca, meu pai Sr. Olavo (*in memorium*) e meus irmãos.

À Dona Nice, ao Victor, Marília e Pedro.

AGRADECIMENTOS

À Nice pela revisão e sugestões de redação e, especialmente, pela paciência, apoio e dedicação.

A todos os meus professores, e em especial à Dna Dorcas, Antônio Dinalli, Luis Roberto Tommasi, Robinson Antonio Pitelli, Clovis Volpe, Miguel Ângelo Mutton, Ailto Antônio Casagrande e Nadir Almeida da Glória.

Ao amigo Paulo Zancaner Castilho e a tantos amigos da Cia Energética Santa Elisa, pelo apoio e incentivo.

Ao professores Marcos Silveira Bernardes e Márcia Justino Rossini Mutton pela provocação e incentivo.

Ao professor Ailto Antônio Casagrande e à Dra Raffaella Rossetto pelo exame e sugestões.

Ao Professor Miguel Ângelo Mutton pela orientação, paciência e confiança.

Ao Professor Nadir Almeida da Glória pelas sábias lições de química e de vida.

SUMÁRIO

RESUMO
SUMMARY
1. INTRODUÇÃO
2. REVISÃO DE LITERATURA
2.1. O Conceito de Desenvolvimento Sustentado
2.1.1. Aspectos sociais
2.1.2. Aspectos econômicos
2.1.3. Aspectos ambientais
2.2. Os Ciclos Biogeoquímicos
2.3. Destinação de resíduos e efluentes da agroindústria da cana-de-açúcar
2.4. Modelagem de Sistemas de Produção Agroindustrial
3. MATERIAIS E MÉTODOS
3.1. Ferramentas Conceituais
3.1.1. Resíduos
3.1.2. Ruptura de Ciclos Biogeoquímicos
3.1.3. Construção ou Adequação de Agroecossistemas
3.1.4. Regeneração ou Reconstituição de Ciclos Biogeoquímicos
3.1.5. Sustentabilidade Cruzada nos Agroecossistemas
3.1.6. Vias de Reciclagem
3.1.7. Logística aplicada e suas relações
3.1.8. Equação de configuração do canavial
3.1.9. Uso e ocupação da terra
3.1 10. Produtividade total
4. RESULTADOS E DISCUSSÂO
4.1. Identificação e descrição das principais vias biogeoquímicas
4.1.1. Açúcar e Álcool
4.1.2. Vinhaça

4.1.3. Vinhaça Concentrada
4.1.4. Águas Residuárias
4.1.5. Torta de filtro
4.1.6. Fuligem
4.1.7. Barros de decantadores
4.1.8. Palha
4.1.9. As perdas de elementos do agroecossistema
4.2. Considerações sobre Metais Pesados
4.3. Modelo Conceitual
4.4. Identificação de Indicadores
4.5. Modelo Quantitativo
5. CONCLUSÕES
6. IMPLICAÇÔES
7. REFERÊNCIAS

CICLOS BIOGEOQUÍMICOS COMO SUBSÍDIO PARA A SUSTENTABILIDADE DO SISTEMA AGROINDUSTRIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR.

RESUMO – O crescimento da cultura da cana-de-açúcar, frente à demanda global por energia renovável, provoca preocupações quanto à sua sustentabilidade. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é oferecer uma visão sistêmica do processo agroindustrial da cana-de-açúcar, do ponto de vista dos ciclos biogeoquímicos com a reciclagem de resíduos e efluentes. Para o desenvolvimento do trabalho foram elaborados modelos conceituais e numéricos, apresentando conceitos de ruptura e regeneração de ciclos, sustentabilidade cruzada, equação de configuração do canavial e coeficiente de uso cultural da terra. Foi elaborado um modelo das vias e de estratégias de uso de resíduos e efluentes para N, P, K, Ca, Mg e S, nos diversos compartimentos do processo de produção. Fez-se uma abordagem sobre metais pesados. Foram formulados e discutidos alguns indicadores: índice de adubação (IA), índice de retorno (IR) e índice de emissão (IE), que permitiram uma análise da circulação de nutrientes e da sustentabilidade. No cenário analisado para validação do modelo, concluiu-se que as quantidades de potássio, cálcio e magnésio em circulação foram suficientes para a adubação da cultura, enquanto o nitrogênio, fósforo e enxofre emitidos foram insuficientes, exigindo adubações complementares. Concluiu-se que a moderna agroindústria da cana-de-açúcar apresenta-se conceitualmente muito favorável à sustentabilidade, e ainda exige melhorias para a efetividade desses conceitos. A verticalização da produção, mesmo em monocultivo, pode contribuir para o estabelecimento de um equilíbrio de manejo favorável à sustentabilidade.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar, vinhaça, resíduos, agroecossistema, modelagem.

BIOGEOCHEMICALS CYCLES AS SUBSIDY FOR THE SUSTAINABILITY OF THE SUGARCANE AGRO-INDUSTRIAL SYSTEM.

SUMMARY - The expansion of the sugarcane culture, up against global demand for renewable energy, provokes concerns as for its sustainability. In this context, the objective of this work was to offer a systemic view of the sugarcane agro-industrial process, from the point of view of the biogeochemical cycles with the effluent and residues recycling. For the development of the work conceptual and numerical models were elaborated, showing concepts of rupture and regeneration of cycles, crossed sustainability, cane field configuration equation and cultural land use coefficient. A model of the logistics and use strategies of effluent and residues for N, P, K, Ca, Mg and S was elaborated, in the several compartments of the production process. An approach about heavy metals was made. Some indicators were formulated and discussed: fertilization index (IA), return index (IR) and emission index (IE), which allowed an analysis of the sustainability and nutrients circulation. In the scenario analyzed for the model validation, it was concluded, one concludes that the amount of potassium, calcium and magnesium in circulation were sufficient for the fertilization of the culture, while the nitrogen, phosphorus and sulfur emitted were insufficient, requiring complementary fertilizations. It was concluded that the modern sugarcane agro-industry is conceptually very favorable to the sustainability, and still demands improvements for the effectiveness of these concepts. The verticalization of the production, even in monoculture, can contribute to the establishment of a handling balance favorable to the sustainability.

Keywords: sugar-cane, vinasse, residues, agro-ecosystem, modelling.

1. INTRODUÇÃO

Os assuntos de ecologia e desenvolvimento sustentável, ao serem popularizados, adquiriram um intenso caráter passional, possivelmente devido à sua imagem relacionada ao bucolismo e salvacionismo, próprios da natureza humana. A aquisição deste caráter consolidou-se nos anos 60 e 70, quando movimentos ideológicos e sociais aconteceram na mesma ocasião em que a ONU promovia as conferências de Paris (1968), Londres (1970), e as reuniões de Nova York, Praga e Genebra (1971), preparatórias para a Conferência Mundial sobre Meio Ambiente em Estocolmo (1972). A partir dai, esses assuntos se popularizaram e têm sido tratados nos mais diversos níveis de conhecimentos e de interesses, muitas vezes desprovidos de fundamentos científicos, confundindo falso e verdadeiro. Desenvolveu-se aí uma dialética que caracteriza o recente e contemporâneo período histórico. Isto, porém, frequentemente tem acontecido com carência de conhecimento científico, o que leva à adoção do "princípio da precaução", que, por natureza, comete exageros e provoca reações contrárias, de repúdio; muitas vezes também excessiva. O que resulta numa dialética prejudicial ao caráter científico e verdadeiro da ecologia. O presente estudo foi concebido nesse contexto, com intenção de contribuir com uma área de conhecimento para gerar uma tecnologia de produção, entendendo que a maturidade dessa dialética é o conhecimento científico do meio ambiente aplicado às tecnologias de produção.

A cultura da cana-de-açúcar destaca-se em importância atual e potencial, como agricultura de biomassa ou energética, devido a características botânicas, eficiência fotossintética e o estágio de evolução de sua cadeia de produção.

A justificativa para esse projeto teve base em três premissas. A primeira foi a crescente demanda global por energia renovável que provoca preocupação quanto às dimensões e impactos ambientais que as agriculturas energéticas podem alcançar, particularmente a cultura da cana-de-açúcar. A segunda foi a proposta de

aplicabilidade da tese de que o sistema agroindustrial da cana-de-açúcar integra ciclos biogeoquímicos passíveis de gerenciamento para sua sustentabilidade; inclusive sustentabilidade cruzada com outros sistemas. A terceira foi a possibilidade de contribuir para a perpetuação das empresas pelo desenvolvimento de modelos sustentáveis. Fazendo lembrar a similaridade entre o conceito de desenvolvimento sustentado e o conceito de perpetuação das empresas.

O objetivo central deste projeto foi oferecer uma visão sistêmica da agroindústria da cana-de-açúcar do ponto de vista dos ciclos dos elementos, como ciclos biogeoquímicos, e apresentar conceitos para que outros modelos sejam elaborados. Pretende-se contribuir para o gerenciamento estratégico do processo de produção como agroecossistema em equilíbrio, sustentável.

Como sugere DOURADO-NETO et al. (1998b), um modelo deve dar uma direção estratégica para o desenvolvimento e adoção de tecnologias, e deve apresentar a integração das informações, sua mensuração e contribuir para a transformação do conhecimento em tecnologia, ou seja, transformar conhecimento em informação útil.

Este objetivo fundamentou-se na tese de que, no atual estado de conhecimento, poderiam ser desenvolvidos sistemas agroindustriais da cana-de-açúcar para produção de energias renováveis e alimento, com sustentabilidade. Enquanto, considerando que o âmbito deste projeto foi a sustentabilidade ecológica, os aspectos sociais e econômicos foram tratados apenas com a profundidade necessária para sinalizar a sustentabilidade.

Pretendeu-se trazer os conceitos de ciclos biogeoquímicos do nível de conhecimento científico para o nível de tecnologia de produção, com propósito de contribuir para a consolidação da sustentabilidade da cadeia de produção da cana-de-açúcar pelo incremento da eficiência de uso de recursos naturais.

Um desdobramento esperado foi dar visibilidade a um modelo viável e sensibilizar os atores do negócio para a sua adoção.

Em síntese, o objetivo deste trabalho foi oferecer uma visão sistêmica da agroindústria canavieira do ponto de vista dos ciclos biogeoquímicos dos elementos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Para desenvolver a presente revisão de literatura, é aplicável o pensamento de DESCARTES (1637) quando, no "Discurso do Método", diz "poder encontrar muito mais verdades no raciocínio que cada qual efetua nos negócios que lhe importam e cujas conseqüências aparecem em seguida, do que no raciocínio do homem de letras (...) especulações que não produzem efeito algum (...) tanto mais vaidade. Distinguir o verdadeiro do falso, para caminhar (trabalhar) com segurança. Não crer demasiado em nada do que fora inculcado... não ofuscar a luz... tornar-se capaz de ouvir a razão".

2.1. O Conceito de Desenvolvimento Sustentado

O conceito de desenvolvimento sustentado foi apresentado em 1987, no documento "Nosso Futuro Comum", também conhecido como "Relatório Brundtland", elaborado pela Comissão Mundial Para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento – ONU, como "*suprimento das necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades"* (CNUMAD, 2001; MMA, 1999). Nosso futuro comum depende da sustentabilidade de nosso empreendimento.

Segundo ALTIERI (1989), sustentabilidade de um agroecossistema é a sua habilidade em manter a produção através do tempo, face a distúrbios ecológicos e pressões sócio-ambientais de longo prazo.

O MMA – Ministério do Meio Ambiente, na versão final da Agenda 21 brasileira – Agricultura Sustentável (MMA, 1999), sugere como "muito mais apropriado" discutir o sistema agro-alimentar-energético, incluindo as dinâmicas de consumo, distribuição e transformação das matérias primas, ou seja, a sustentabilidade da economia rural e do conjunto da formação social, e não das partes em que ela costuma ser dividida. E

pode existir sustentabilidade sistêmica, sem que isto ocorra com suas partes isoladas. Mais do que isto, a sustentabilidade de um componente pode depender de suas interrelações com outros componentes. Ou ainda, pode-se pensar em caso de sustentabilidade como um bom manejo de um ciclo de insustentabilidades concatenadas.

A proposta estratégica da Agenda 21 brasileira para a promoção da agricultura sustentável, baseia-se no desenvolvimento de pactos territoriais, preferencialmente as bacias hidrográficas, e não setoriais. Uma agricultura sustentável não será alcançada por meio de ações isoladas, deste ou daquele setor. As soluções para os problemas da agricultura brasileira passam por negociação entre o governo, o setor privado e a sociedade civil, inclusive organizações de consumidores. Esta estratégia permitiria a aproximação entre a agricultura sustentável e atividades não agrícolas, que vêm se tornando cada vez mais importantes na geração de emprego e renda. (MMA, 1999)

Neste mesmo documento do Ministério de Meio Ambiente, seus autores consideram fundamental que se promova substituição progressiva dos sistemas agrícolas muito simplificados, como as monoculturas, por sistemas diversificados, sobretudo os sistemas rotacionais. Mas os sistemas diversificados serão muito mais exigentes em conhecimento ecológico do que os atuais sistemas monoculturais. Exigirão, provavelmente, a combinação do saber agronômico clássico ou convencional, com o conhecimento sistêmico, isto é, que permita integrar os diversos componentes de um agroecossistema. Consta ainda, ser bem provável que muitos elementos deste conhecimento “sustentável” já existam, e a chave parece ser a pesquisa agroecológica, baseada nas experiências bem sucedidas e na incorporação dos conhecimentos acumulados pelos agricultores. Tratando-se, assim, de uma proposta bem mais complexa do ponto de vista metodológico, que demandará disponibilidade e aptidão para se transpor os limites do saber específico e assumir perspectivas interdisciplinares. Tão importante quanto gerar novos conhecimentos e tecnologias é fazê-los chegar ao seu destino final.

O processo evolutivo para a conversão dos ecossistemas em sistemas agrícolas de alto grau de sustentabilidade, possui duas fases distintas: melhoramento do sistema convencional e redesenho dos sistemas agrícolas (GHINI & BETTIOL, 2000). Para o redesenho dos sistemas é necessário conhecer a estrutura e o funcionamento dos diferentes sistemas, seus principais problemas e, consequentemente, desenvolver técnicas limpas para resolvê-los.

O conceito absoluto de agricultura sustentável pode ser impossível de ser obtido na prática, entretanto, é função da pesquisa e da extensão oferecer opções para que sistemas mais sustentáveis sejam adotados.

2.1.1. Aspectos Sociais da Sustentabilidade do Sistema da Cana-de-açúcar

A agricultura da cana-de-açúcar tem relevante participação na formação social e cultural de diversos países, inclusive o Brasil. Em seu clássico ensaio Casa Grande e Senzala, FREYRE (1933), analisando a formação social do nordeste brasileiro, cita que "*o açúcar não só abafou as indústrias democráticas do pau-brasil e de peles, como esterilizou a terra, numa grande extensão em volta dos engenhos de cana, para os esforços de policultura e de pecuária. (...) com a monocultura absorvente (...)"*. Com essa abordagem, FREYRE exerceu grande influência na formação da opinião e da *visão plantacionista* que se tem hoje sobre a cultura da cana-de-açúcar. A *visão plantacionista,* atualmente, expressa-se cotidianamente pela contestação às monoculturas.

Por outro lado, BARICKMAN (1991) estuda detidamente as relações econômicas do Recôncavo Baiano no séc. XIX, a mesma época tratada por FREYRE, e constata a existência de uma complexa teia correlata à produção de cana, que começava na produção de mandioca e fumo, que gerava renda e alterava a estratificação social; em que os proprietários de engenho concentravam sua atividade na produção de cana e "terceirizavam" a produção de alimentos e fumo. BARICKMAN

contesta a *visão plantacionista*. Pode-se inferir que esse fenômeno estende-se a outras regiões do país até aos dias de hoje, onde a produção de alimentos e outras necessidades existem correlatas à produção da cana, na medida em que exista demanda do mercado.

POLITANO et al. (1983) estudando a caracterização por fotointerpretação da ocupação do solo no município de Monte Alto-SP, verificou que a partir de 1970, a cultura canavieira vem ocupando espaço de outras culturas. Reconhecidamente, esta constatação representa o ocorrido em diversas regiões do sudeste e do centro-oeste brasileiro.

SALIBE (2002) aborda a influência da mídia na formação da imagem dos empresários do setor sucroalcooleiro, analisa as razões e propõe que, pelos próprios canais, implementem-se programas de recuperação de imagem, como fizeram outros setores alvo de críticas similares. Mostra a importância dos meios de comunicação na formação da opinião pública e a influência da qualidade das informações.

Um dos mais reconhecidos motivos de conflito social do atual sistema da cana-de-açúcar é a queimada. A regulamentação das queimadas, pela legislação federal e estadual, foi estudada por GONÇALVES (2002), que concluiu que a regulamentação tem provocado mudanças significativas nos canaviais paulistas. E que, “se por um lado, melhora a relação entre a exploração agrícola e o meio ambiente local e global, por outro, acelera o processo de substituição de força de trabalho humana por máquinas. Trata-se de um processo de desenvolvimento que, buscando caminhar em direção à sustentabilidade ambiental e econômica, acaba por se afastar da sustentabilidade social”. Porém, esse estudo tratou das mudanças do número de postos de trabalho e não da qualificação do trabalho e da vida do trabalhador. Por outro lado, esse autor (BARBOSA, 1997), relacionou diversos atrativos para a colheita sem queima, justificando investimentos e riscos na busca de soluções viáveis. Esses atrativos foram as espectativas de: redução das impurezas minerais da cana colhida, moagem de cana fresca pela redução do tempo de queima, dispensa da operação de queima, fixação de carbono, proteção do solo pela palhada, melhor manejo da água

com maior infiltração e recarga dos mananciais, redução dos assoreamentos, melhor desenho dos talhões, menor custo de controle de mato, menor custo de adubação, potencial de uso da palha para geração de energia e melhor relação com a comunidade local e global. Portanto excedem os motivos sociais.

GONÇALVES (2005), após elaborado estudo, conclui que "*o desenvolvimento sustentável só passará a ser uma realidade nas regiões canavieiras quando a voz dos atores sociais locais puder ser ouvida e respeitada por toda a sociedade*". Entretanto, esse estudo, embora muito elaborado, parece ter obtido uma visão parcial da questão, pois agricultores, importantes atores sociais, não foram incluídos nas pesquisas. Enquanto Weid (1997), citado por MMA (1999), diz que o foco das intervenções não deve ser o agroecossistema, como aconteceu em várias tentativas fracassadas, mas, sim, os agricultores. A participação ativa dos agricultores nas etapas de diagnóstico, de planejamento, de execução e de avaliação, é imprescindível ao êxito das iniciativas que visam a sustentabilidade agrícola.

Considerando que a sustentabilidade é um objetivo comum, inclui a perpetuação das empresas e dos empreendimentos, não é privilégio de um ou de outro grupo social, todos os atores sociais têm responsabilidades e benefícios. Especialmente a agricultura (MMA, 1999), que permanece como a atividade humana que mais intimamente conecta a sociedade com a natureza e nela o trabalho humano visa regular as condições ambientais, sob as quais as plantas e os animais crescem e se reproduzem.

Portanto, por conceito, uma proposta será adequada aos propósitos da sustentabilidade e poderá ser aceita por todos os atores sociais, se o for ambientalmente, socialmente e economicamente. Neste contexto, do ponto de vista social, o presente trabalho propõe que um modelo de gerenciamento dos ciclos biogeoquímicos será sustentável se for aceito por todos os atores sociais.

De qualquer forma é reconhecido que a opinião pública tem, por várias razões e raízes históricas, uma visão perversa da cultura da cana-de-açúcar. Seja esta visão verdadeira ou não. E isto desencadeia um fenômeno sócio-político onde o poder

público, em suas várias instâncias, democraticamente influenciado pela opinião pública, tende a adotar posturas e práticas prejudiciais ou não benevolentes para os produtores de cana-de-açúcar. Muitas vezes isto resulta em perdas econômicas (BARBOSA, 2002).

2.1.2. Aspectos Econômicos da Sustentabilidade do Sistema da Cana-de-açúcar

Os principais mercados do agronegócio da cana-de-açúcar são, sumariamente, o mercado da cana, do açúcar, do álcool e da eletricidade. O mercado da cana caracteriza-se pela forte competição por produção em áreas a menores distâncias da indústria, devido ao elevado custo do transporte, e é movido pelo mercado do açúcar, álcool e eletricidade. O açúcar tem mercado de baixa elasticidade de demanda, porém com alta sensibilidade às oscilações de oferta mundial. Essas oscilações, geralmente decorrem das interações com o mercado de álcool, das condições climáticas instáveis nas regiões produtoras e, atualmente, da expansão de mercado em países orientais. O mercado do álcool, cuja expansão de demanda no Brasil e no mundo depende da segurança de oferta, do mercado de petróleo e de sua valorização como alternativa ambiental ao uso de combustíveis fósseis. Devido à diversidade de matérias primas e processos de produção, tende a ser altamente competitivo. Isto agrega importância à sustentabilidade do sistema de produção. Enquanto o mercado de eletricidade, em expansão a longo prazo, tem grande importância estratégica.

O agro-negócio da cana-de-açúcar tem características de agricluster, que poderá favorecer o desenvolvimento sustentável da cadeia de produção. O conceito de agricluster, caracteriza-se pela ocorrência de fortes interações entre produtores rurais, as cooperativas, as indústrias, as empresas de insumos, as entidades de pesquisa, os órgãos públicos, as universidades e outros agentes (CASE-IH, 2002). Ao mesmo tempo que a UNICA - União da Agroindústria Canavieira de São Paulo, em sua home-page, apresenta-se como “comprometida com o desenvolvimento

sustentável e com o imperativo da produção de energia limpa e renovável. Sente-se também, capaz de enfrentar o desafio de coordenar a consolidação de um sistema de autogestão privada, que garanta o equilíbrio entre oferta e demanda sem interferência governamental" (UNICA, 2003).

Alguns fatos marcaram a história recente do agronegócio da cana-de-açúcar no Brasil: O Programa Nacional do Álcool – PROALCOOL, em 1979; a substituição do chumbo tetraetila por álcool anidro na gasolina; o desabastecimento de álcool em 1990; a abertura de novos mercados de açúcar pela queda da URSS; o incremento da colheita sem queima a partir de 1991; a desregulamentação do álcool anidro em 1997 e da cana em 1999; a cogeração de energia elétrica a partir de 1999; e a expansão do inusitado consumo do "rabo-de-galo" – quando o consumidor adiciona por conta própria álcool hidratado à gasolina - a partir de 2000. Em junho de 2001, o Ministério de Desenvolvimento apresentou à Câmara de Desenvolvimento Econômico, do governo federal, uma proposta de política para o setor, com instrumentos para incentivar o mercado futuro e sinalizar o comportamento das commodities a médio e longo prazo. Esses rol de acontecimentos sinalizaram o caminho para que a iniciativa privada pudesse desenvolver um modelo de autogestão (UNICA,2002; PINAZZA & ALIMANDRO, 2003). Recentemente, a partir de 2004, os carros bi-combustíveis permitindo ao consumidor a livre escolha do combustível, provocou a consistente expansão da demanda de álcool. ROSA (1997), citado por RÍPOLI & RÍPOLI (2004), referindo-se à capacidade fotossintética da cana-de-açúcar, comenta que 1,6% da energia solar incidente é transformada em energia química, e dessa fração, apenas 13% é transformada em álcool.

São postas barreiras ao açúcar brasileiro pelo fato de ter o preço mais competitivo no mercado mundial, porque apresenta menores custos: agrícola (produção de cana-de-açúcar), logístico e de processamento básico – particularmente nas usinas localizadas no estado de São Paulo. Com o processo de desregulamentação do setor no Brasil – acelerada a partir de 1995 – as empresas tiveram que se posicionar no mercado com suas próprias competências. Simultaneamente a essa desregulamentação, nos anos 1997/98 ocorreu crise de

superprodução, queda de preços e forte descapitalização do setor. Esse cenário provocou intenso aprendizado em mudanças tecnológicas e organizacionais (ASSUMPÇÃO-ALVES, 2001).

Já se delineiam passos para a criação de um mercado internacional de carbono, a partir dos mecanismos de desenvolvimento limpo – MDL, estabelecidos no Protocolo de Quioto, 1997 (ROCHA, 2002). A cultura da cana-de-açúcar pode ser elegível para a obtenção de crédito de carbono significativo como plantação de biomassa para produção de energia e substituição de combustível fóssil (AUKLAND et al. 2002). Um exemplo foi a assinatura de um inédito acordo entre Brasil e Alemanha para a produção de 100 mil carros a álcool no Brasil. O investimento alemão será de US$40 milhões para compra das cotas de redução de carbono (PINAZZA & ALIMANDRO, 2003). A Cia. Energética Santa Elisa[1] tem créditos de 1.000.000 t de C, certificados pela ONU, dos quais 500.000 t já vendidas.

Segundo a ANEEL (2002), para a produção de eletricidade, uma das principais vantagens da biomassa é que, embora de eficiência reduzida, seu aproveitamento pode ser feito diretamente, através da combustão em fornos, caldeiras, etc. Para aumentar a eficiência do processo e reduzir impactos socioambientais, tem-se desenvolvido e aperfeiçoado tecnologias de conversão eficiente, como a gaseificação e a pirólise. No Estado de São Paulo a produção potencial é maior que 5.000 GW ha^{-1}. ano^{-1}. O cultivo e o beneficiamento da cana são realizados em grandes e contínuas extensões e o aproveitamento de resíduos (bagaço, palha, etc.) é facilitado pela relativa centralização dos processos de produção. Além de mais favorável ao meio ambiente, o uso energético da biomassa promove a geração local e descentralizada de empregos, reduzindo o problema do êxodo rural e a dependência externa de energia, em função da sua disponibilidade local. Neste contexto, a biomassa apresenta-se técnica e economicamente competitiva. No caso específico do Estado de São Paulo, o mais industrializado do país, com uma densidade populacional superior à da China, a produção de biomassa

[1] Informação pessoal

energética, através da cana-de-açúcar, é intensa, sendo comparável à produção de energia hidráulica. Isso se deve ao fato de o Estado ser importador de eletricidade (40% do que consome) e exportador de álcool para o resto do país. Verifica-se, portanto, que, apesar da produção de biomassa ser mundialmente considerada uma atividade extremamente demandante de terras, mesmo numa região com alta densidade demográfica é possível encontrar áreas para essa atividade. Segundo dados do Balanço Energético Nacional de 1999, a participação do bagaço de cana-de-açúcar na produção nacional de energia elétrica é resumida a cerca de 1,2%. RÍPOLI et al. (2000) estimou o potencial de energia da biomassa da cana de açúcar no Brasil naquele ano e concluiu que pode servir a 7.000.000 pessoas ano^{-1} pelo palhiço e 5.500.000 pessoas ano^{-1} pelo bagaço.

Segundo dados do Balanço Energético Nacional, ano base 2005, publicado pelo Ministério das Minas e Energia (MME, 2006), apresentado na Tabela 1, os produtos da cana-de-açúcar aparecem com a maior participação entre as fontes renováveis.

Novas tecnologias de produção e uso de energia de biomassa estão em franco desenvolvimento, a exemplo da gaseificação do bagaço da cana, que pode incrementar o potencial de geração de eletricidade das usinas instaladas em São Paulo de 3 mil MW para 12 mil MW (PINAZZA & ALIMANDRO, 2003), e do uso do etanol como fonte de hidrogênio em células de energia, considerando sua alta relação H:C.

A adoção de tecnologias limpas e sustentáveis ocorre na medida em que seus desenvolvimentos alcancem e demonstrem viabilidade econômica. O controle biológico da broca-da-cana (*Diatraea saccharalis*), a colheita de cana sem queima e o uso da vinhaça, são exemplos de uso mediante a viabilização econômica.

Tabela 1. Balanço Energético Nacional 2006: ano base 2005, publicado pelo Ministério da Minas e Energia (MME, 2006) onde pode ser observado que, no Brasil, entre as fontes renováveis, os produtos da cana tiveram a maior participação.

Fontes de energia primária	Produção %	Oferta interna bruta %
Petróleo	42,0	39,8
Produtos da cana	15,5	14,1
Energia hidráulica	14,5	13,2
Lenha	14,2	12,9
Gás natural	8,8	9,3
Outras fontes primárias	3,2	2,9
Carvão vapor	1,2	1,0
Urânio	0,7	2,1
Carvão metalúrgico	0,1	4,7

2.1.3. Aspectos Ambientais da Sustentabilidade do Sistema da Cana-de-açúcar

O conceito absoluto de agricultura sustentável pode ser impossível de ser obtido na prática, entretanto, é função da pesquisa e da extensão, oferecer opções para que sistemas mais sustentáveis sejam adotados. Para tanto, os projetos de pesquisa pontuais e de curta duração são de pouca utilidade. Somente estudos que incluem o monitoramento de sistemas de produção nas diferentes áreas de conhecimento fornecerão informações suficientes para o entendimento das diferentes interações. A sustentabilidade agrícola implica necessariamente na resolução dos problemas relacionados com o controle de doenças, pragas e plantas invasoras (GHINI & BETTIOL, 2000).

Um exemplo banal de possível desdobramento desse conceito ocorre quando o carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e de magnésio ($MgCO_3$) aplicado na forma de calagem

contribui para a emissão de carbono, pois a reação de neutralização libera CO_2, (VITTI & LUZ, 2001) devendo ser contabilizado como fator de efeito estufa, constituindo uma externalidade da atividade agrícola, de qualquer cultura.

PINAZZA & MACEDO (1993), tratando da monocultura canavieira e a agricultura sustentável, aborda seus impactos agroecológicos e vislumbra potencialmente, "uma total reversão histórica no processo de produção da lavoura canavieira, pois, de agente gerador de impactos negativos, ressurge com novos conhecimentos, desde que aplicados, como agente estimulador da preservação do agroecossistema". PAES (2005), citando ZORZETTO et al (2003), mostra que o período de expansão da cana no Estado de São Paulo – a partir de 1994 - coincide com o período de recuperação das áreas de florestas. Tendo a área de vegetação natural, no Estado, crescido de 33,3 mil km^2 em 1990 para 34,6 mil km^2 em 2000.

MUZILLI (1999) propõe a substituição gradativa e complementar de processos mecânico-químicos por processos biológico-culturais capazes de minimizar os impactos da degradação ambiental e reduzir os custos de produção. Aponta que o sistema de plantio direto, que assegura esses princípios, deve ser incluído numa estratégia holística de uso dos recursos naturais no âmbito de microbacias hidrográficas e é fundamental para promover a agricultura sustentável em diferentes situações agroecológicas e sócio-econômicas brasileiras.

O Fórum Nacional da Agricultura - FNA, publicou em 1998 um documento intitulado "*Mais do que uma política.... Uma estratégia para o agronegócio*", em que a sustentabilidade da agricultura é uma dessas estratégias e conta com 5 propostas: o manejo sustentado de recursos naturais; ampliar a base genética das culturas e preservar a biodiversidade; difusão de sistemas alternativos de produção; utilização de condomínios para cumprimento de legislação; e estimular o uso de lixo tratado e lodo de esgoto urbano na agricultura.

Segundo VAN RAIJ (1999), a agricultura moderna, a partir da "revolução verde", tem sido questionada em alguns pontos considerados pouco adequados à sustentabilidade, com destaque para as monoculturas com base genética estreita,

altamente dependentes de fertilizantes e pesticidas, insumos de alto custo e poluentes ambientais. O problema da poluição com nitratos, importante também no caso de adubos orgânicos, pode ser reduzido com o manejo adequado das fontes de nitrogênio. A poluição de cursos d'água com fosfatos, muitas vezes associada ao uso de fertilizantes, deve-se, em geral, mais a fertilizantes orgânicos, já que o fósforo mineral é praticamente imóvel no solo. De qualquer forma, este modelo de agricultura não parece ter sua sustentabilidade ameaçada, pelo contrário, continua com produtividade ascendente e utilizando tecnologias cada vez mais sofisticadas. Contudo, há necessidade de redução dos problemas ambientais associados a esse modelo.

PASQUALETO (2000), citando MIALHE (1982), refere-se à possibilidade do manejo da monocultura da cana-de-açúcar induzir ao declínio da produtividade após o primeiro ciclo de cultivo. Entretanto, essa degradação e esse declínio não tem sido observado, ORLANDO FILHO (1983) estudou solos cultivados com cana-de-açúcar e com uso de vinhaça por 20 anos e verificou que esse cultivo não provocou efeitos prejudiciais ao solo, trazendo benefícios diretos sobre a cultura e sobre as propriedades químicas do solo. PASQUALETO (2000) desenvolve interessante análise crítica da cultura e considera que seu cultivo racional pode potencializar impactos positivos na proteção do meio ambiente, ressalvando a necessidade de respeitar medidas de controle de poluição ambiental de forma a não comprometer o futuro da atividade e não prescindir de outras culturas.

Segundo LEWIS (1959), citado por ALTIERI (1989), existe um ponto chamado "equilíbrio de manejo", no qual o ecossistema, em equilíbrio dinâmico com os fatores ambientais e de manejo, obtém uma produção estável. Enquanto LAL (1999) sugere que altas produtividades agrícolas devem ser conciliadas com padrões elevados de qualidade do meio ambiente; e tais metas não são exclusivas nem difíceis de se atingir. Associando esses dois autores, pode-se deduzir que devem ser desenvolvidos agroecossistemas em equilíbrio de manejo e com altas produtividades.

Uma ilustração de caso de “equilíbrio de manejo”, onde uma nova composição de fatores criou oportunidade para super-expressão de uma espécie, pode ser observado no trabalho publicado por ALVAREZ (1998), comparando o desenvolvimento de cana crua e cana queimada em dois ciclos de crescimento, conduzidos em Morro Agudo-SP, na variedade SP70-1143, onde as biometrias indicavam maior desenvolvimento da cana crua, até que o aparecimento do ataque de cigarrinha-da-raiz (*Mahanarva fimbriolata*) a prejudicou, resultando em menor produtividade. Atualmente, segundo DINARDO-MIRANDA (2006), um programa de manejo da *M. fimbriolata*, no qual muitos pontos ainda precisam ser definidos, deve dispor de diversas ferramentas, como: amostragem e monitoramento, variedades resistentes, controle biológico, controle químico, retirada da palha, fogo e antecipação da colheita. Pode-se inferir que um novo equilíbrio de manejo estará estabelecido quando a cultura, o agroecossistema, exigir mínima interferência. Possivelmente isto ocorrerá com uso quase nulo de controle químico e fogo, medidas consideradas de alto impacto.

AYALA et al (2003), ao tratar da agricultura sustentável, recomenda a integração de métodos para controle de mato, como: evitar produção de sementes, limpeza de implementos, rotação de culturas, variedades de fechamento rápido, localização adequada de fertilizantes, controle manual, altas densidades de população da cana, cobertura de palha, controle químico e manejo de épocas de plantio.

BARBOSA et al (2006) recomenda algumas práticas, no uso de herbicidas, para contribuir com a sustentabilidade ambiental do empreendimento: preferência por herbicidas de menor impacto, embora este fator não seja relevante atualmente porque os herbicidas disponíveis atendem suficientemente bem a esse quesito; a preferência por herbicidas de menor embalagem; preferência por formulações que facilitem a limpeza das embalagens; devolução de embalagens vazias aos Centros de Coleta e cuidados com o transporte e aplicação para assegurar que não ocorram contaminações de solo ou águas.

RODRIGUES (1999) cita estimativas segundo as quais a cultura da cana-de-açúcar foi a principal fonte não pontual de contaminação de águas subterrâneas do estado de São Paulo, com maior atenção aos resíduos de organofosforados. E reconhece que dados analíticos em larga escala sobre os compostos, hoje preponderantes, são ainda escassos e que, nesse caso, recomenda o exercício do princípio da precaução.

PESSOA et al (1999) estudou a movimentação vertical dos herbicidas atrazina, tebuthiuron e diuron em Latossolo e em Areia Quartzosa com cana-de-açúcar na microbacia do córrego Espraiado, em Ribeirão Preto, em doses conforme seu uso para a cultura, até quatro anos após a aplicação. Verificou que nenhuma quantidade final dos herbicidas utilizados era significativa para efeito de contaminação do Aqüífero. Interessante sugerir que estudos semelhantes devem ser realizados com outros herbicidas.

Os sistemas agroflorestais (SAFs) apresentam-se como uma alternativa de sistema de produção agrícola interessante do ponto de vista ambiental. PINTO et al. (2003), num estudo de caso, simulou SAFs de cana com diversas espécies e concluiu que podem compatibilizar produção de cana-de-açúcar, conservação de recursos naturais e colheita mecanizada em significativa área da região de Piracicaba, havendo diversas espécies arbóreas para compor um SAF nessas condições. CORDANI et al. (1997) faz referência ao projeto FLORAM, elaborado pelo IEA-USP no final da década de 80, que preconiza a retirada biogênica de gás carbônico em excesso na atmosfera por meio da fotossíntese em espécies arbóreas de crescimento rápido. Prevê uma somatória de pequenos e médios espaços para florestas plantadas, ao lado de espaços reservados para atividades agrárias rentáveis. E sugere que os princípios do projeto FLORAM sejam acolhidos como política pública. E cita também, em referência à biodiversidade, que “embora a própria existência do Pronabio, do Probio, e do Funbio seja altamente positiva, os entraves burocráticos, os poucos recursos financeiros, e a falta de uma melhor orientação e coordenação a nível nacional, fizeram com que nenhuma destas ações estejam funcionando plenamente”. Outra

constatação interessante apresentada por CORDANI et al. é que as agendas dos dirigentes têm sido invadidas por outros problemas de curto prazo, de dimensão política, econômica e tecnológica e de segurança, reduzindo a importância relativa dos problemas ambientais.

Para a sustentabilidade da monocultura da cana-de-açúcar, do ponto de vista da segurança de produção pela amplitude da base genética, a estratégia adotada no Brasil, após o aprendizado imposto por algumas epidemias, parece bastante adequada. Segundo BURNQUIST & LANDELL (2005), em 2003/2004, em 260 unidades produtoras, eram utilizadas cerca de 500 variedades, 51 foram liberadas nos últimos 10 anos, 80% da área era ocupada por 20 variedades e a mais plantada – RB72454 – ocupava 12.6%. O banco de germoplasma da Copersucar, atualmente CTC, conta com mais de 3000 genótipos, entre os quais uma ampla coleção de espécies selvagens, com *Saccharum officinarum*, (423 genótipos), *S. spontaneum* (187 genótipos), *S. robustum* (65 genótipos), *S. barbieri* (61 genótipos) e *S. sinense* (32 genótipos).

Os processos de uso ou destinação de resíduos, podem ser inseridos como fases do processo de produção, com agregação de valor ao produto ou como adição de um novo produto ou como componente de redução de custos, geralmente por substituição de insumo que deixará de ser adquirido. Resultando em agregação de valor ao empreendimento ou reduzindo custos. Portanto, pode ser entendido como uma extensão do processo de produção. Por outro lado, essa extensão precisa ser avaliada quanto aos riscos que impõe ao ambiente. No caso da agro-indústria da cana-de-açúcar, sendo a destinação como aplicação em solo agrícola, conforme observado por HIRATA (2006), ocorre o efeito positivo da recarga de umidade do solo e do aquífero, e os riscos: contaminação do solo ou contaminação de águas, subterrâneas ou superficiais.

Estudando RODRIGUES et al (2000), que trata da avaliação de impactos ambientais em projetos de desenvolvimento tecnológico agropecuário, pode deduzir que avaliações ambientais podem ser vistas em três categorias: a) redução de uso de

insumos, b) conservação de recursos naturais e c) resiliência dos ecossistemas. Este conceito, aplicado ao sistema agro-industrial da cana-de-açúcar equivale a: a) redução do uso de fertilizantes minerais substituindo-os pelo uso de resíduos, b) conservação do solo e da qualidade das águas superficiais e subterrâneas, e c) melhoria de solos degradados pelo conjunto de tecnologias atualmente aplicadas ao sistema de produção.

Mediante pressões da sociedade, no sentido de defesa do meio ambiente como bem público, de interesse comum, desenvolveu-se uma ampla legislação ambiental. Referindo-se ao âmbito desse trabalho, pode-se referenciar a Lei Estadual 997, de 1976, aprovada pelo Decreto 8468, que dispõe sobre o Controle de Poluição do Meio Ambiente, estabelece:

> *Art. 51 - Não é permitido depositar, dispor, descarregar, enterrar, infiltrar ou acumular no solo, resíduos, em qualquer estado da matéria, desde que poluentes, na forma estabelecida no artigo 3º deste Regulamento.*
>
> *Art. 52 – O solo somente poderá ser utilizado para destino final de resíduos de qualquer natureza, desde que sua disposição seja feita de forma adequada, estabelecida em projetos específicos de transporte e destino final, ficando vedada a simples descarga ou depósito, seja em propriedade pública ou particular.*
>
> *Art. 53 - Os resíduos de qualquer natureza, portadores de patogênicos, ou de alta toxicidade, bem como inflamáveis, explosivos, radioativos e outros prejudiciais, a critério da CETESB, deverão sofrer, antes de sua disposição final no solo, tratamento e/ou condicionamento, adequados, fixados em projetos específicos, que atendam aos requisitos de proteção de meio ambiente.*

O Decreto Estadual 32.955, de 1991, regulamenta a Lei n. 6.134/1988, que dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas do Estado de São Paulo, estabelece:

> *Artigo 17 - Os projetos de disposição de resíduos no solo devem conter descrição detalhada de caracterização hidrogeológica de sua área de localização, que permita a perfeita avaliação de vulnerabilidade das águas subterrâneas, assim como a descrição detalhada das medidas de proteção a serem adotadas.*
>
> *§1º - As áreas onde existirem depósitos de resíduos no solo devem ser dotadas de monitoramento das águas subterrâneas, efetuado pelo responsável pelo empreendimento, a ser executado conforme plano aprovado pela CETESB.*
>
> *.§2º - O responsável pelo empreendimento deverá apresentar relatórios à CETESB, informando os dados obtidos no monitoramento.*
>
> *§3º - Se houver alteração estaticamente comprovada, em relação aos parâmetros naturais de qualidade da água nos poços a jusante, por ele causada, o responsável pelo empreendimento deverá executar as obras necessárias para recuperação das águas subterrâneas.*

Tratando dos riscos de poluição de águas superficiais, a Resolução CONAMA 357, de março de 2005, dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como, estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes (CONAMA, 2005). Segundo o parágrafo XX do artigo 2º, o enquadramento significa alcançar ou manter a qualidade estabelecida de acordo com a classe de uso.

Para a aplicação da vinhaça em solo agrícola no Estado de São Paulo, aplica-se a Norma Técnica CETESB nº 4.231, de janeiro de 2005, que estabelece limites de

locais para tanques, canais e aplicações, prazos para impermeabilização de tanques e canais, e cálculos de taxas de aplicação no solo. (CETESB, 2005)

GOLDEMBERG (2006), como Secretário de Meio Ambiente do Estado de São Paulo, expressou opinião de que “com boas práticas agrícolas é perfeitamente possível a expansão sustentável da cultura da cana-de-açúcar.” Atualmente, os aspectos ambientais da cultura da cana-de-açúcar, estão, de maneira relativamente consistente, sendo convertidos de fator de restrição para fator de sustentabilidade.

Frente às atuais projeções de expansão da demanda e da produção de cana-de-açúcar no Brasil, as demandas por insumos – sejam fertilizantes, calcários etc – sejam pela disponibilidade de matérias primas ou de capacidade de fabricação ou distribuição, é importante que o uso desses recursos sejam gerenciados. Com esse ponto de vista, é importante que se tenha uma visão clara dos “estoques dinâmicos” dos nutrientes nos diversos compartimentos dos ciclos biogeoquímicos do sistema agroindustrial.

2.2. Os Ciclos Biogeoquímicos

O princípio da sustentabilidade dos ecossistemas, segundo GOMES et al (2000), está no enunciado de ODUM (1971): “Quanto mais tempo os elementos puderem ser mantidos dentro de uma área e utilizados por sucessivas gerações de organismos, tanto menores serão as perdas e, portanto, menor será a necessidade de reposição desses elementos a partir de fontes externas”. E o funcionamento dos ecossistemas baseia-se na circulação dos nutrientes entre os diversos compartimentos, sendo, a ciclagem desses elementos por sucessivas gerações, constituída por fases em organismos vivos (bio) e fases sem vida (geo). Neste enunciado encontra-se fundamento para a colheita sem queima, do ponto de vista do gerenciamento dos ciclos biogeoquímicos para a sustentabilidade da produção de cana, pois na queimada ocorrem perdas de elementos para a atmosfera, seja por

volatilização ou por arraste de partículas de elementos não voláteis. E ainda, as cinzas depositadas sobre o solo, na ausência da palhada, serão facilmente arrastadas pela água e perdidas do agroecossistema.

ALTIERI (1989) observa que a agricultura tradicional simplifica os agroecossistemas, a decomposição é alterada, uma vez que a planta é colhida, e a fertilidade é mantida, não pela reciclagem, mas por fertilizantes, dependendo de uma contínua intervenção humana; e recomenda o emprego de métodos de produção que restaurem os mecanismos homeostáticos, otimizem a taxa de retorno e reciclagem de matéria orgânica e de nutrientes. Por outro lado, convém ressalvar que o uso de fertilizantes é importante para aumento da fertilidade e, consequentemente, da produção de biomassa.

No ecossistema de cerrado, “o aumento de biomassa determina aumento de quantidade de nutrientes reintroduzidos no solo. Este melhora suas qualidades físicas e químicas em virtude da proteção” (GOODLAND & FERRI, 1979).

Segundo GOMES et al (2000), o equilíbrio dinâmico do sistema é alterado no momento em que elementos ou componentes estranhos interferem nos parâmetros físicos, químicos e biológicos do solo. O solo funciona como um reservatório com grande capacidade de reter e complexar elementos químicos, mas sua capacidade de suporte é limitada e esse limite precisa ser determinado para cada elemento estranho que está sendo introduzido.

Segundo SIQUEIRA & FRANCO (1988), os resíduos orgânicos são componentes importantes dos ecossistemas naturais e agroecossistemas. Eles representam uma grande quantidade de carbono reduzido, um imenso reservatório de nutrientes minerais, importantes para os organismos heterotróficos que habitam o solo, bem como nutrientes minerais para as plantas. A atividade biológica do solo, que é dominada por organismos decompositores, transformam-no em um grande incinerador biológico; uma máquina decompositora operada pelos microrganismos que nele proliferam e que, por meio de suas atividades diversas, controlam o fluxo e ciclagem do carbono e dos elementos nutrientes essenciais.

A compactação dos solos cultivados com cana-de-açúcar é um dos impactos ambientais mais relevantes, seja pela ação de redução de produtividade da cultura, ou seja pela redução da taxa de infiltração de água, que reduz a recarga de água do solo, a recarga dos aquíferos e, pela enxurrada, provoca erosão do solo, perdas de nutrientes, assoreamento e poluição dos cursos d'água. TROUSE (1966), citado por CAMARGO & ALLEONI (1997), observou que veículos com pressão de contato de até 0,03 MPa tiveram pouca influência na taxa de infiltração de água de um solo tropical, reduzindo-a de 50 para 48 $mm \cdot h^{-1}$ após uma única passada. Uma carregadora com pressão de contato três vezes maior (0,092 MPa) reduziu a taxa para 3 $mm \cdot h^{-1}$, um caminhão com 0,7 MPa de pressão a reduziu para 2 $mm \cdot h^{-1}$.

SPAROVEK (1998), estudando indicadores para planejamento conservacionista, concluiu que a principal causa da degradação das terras em microbacias da região de Piracicaba, é sua superutilização. Cita que o preparo de solo profundo, e a aplicação de fertilizantes e corretivos, compensam as perdas de produtividade pelas altas taxas de erosão, e os agricultores não têm percepção de motivos para adotar inovações tecnológicas visando melhorar a sustentabilidade.

HEINRICHS et al. (2000) avaliaram a produção de adubos verdes na entressafra e observaram que para maior reciclagem de nutrientes é necessário plantas com alta produção. Mucuna e guandu produziram tanta massa verde quanto a área em pousio. Enquanto labelabe e crotalária se destacaram na reciclagem de fósforo, resultaram em 412% superior à testemunha em pousio.

PHAN GIA TAN (1995), em solo podzólico de baixa fertilidade, no Vietnan, encontrou fortes indicações que a palha da cana deixada na superfície do solo aumentou a produção de biomassa, melhorou a fertilidade e incrementou no solo a quantidade de carbono sequestrado.

A qualidade da água do subsolo sob vários sistemas de cultivo foi analisada por SHAPLEY & SMITH (1991), e verificaram que a cobertura do solo proporcionou

redução de perdas de nitrogênio por lixiviação e de fósforo por escorrimento superficial.

Segundo BASSOI (2006), um bom indicador da qualidade da água subterrânea é o nitrato, que no estado de São Paulo não ocorre naturalmente em concentrações acima de 5 mg.litro^{-1}, sendo 10 mg.litro^{-1} o valor limite do padrão de potabilidade..

O nitrogênio é o elemento mais abundante na atmosfera, cerca de 78% do ar é nitrogênio (N_2). No solo, mais de 95% do nitrogênio encontra-se na forma orgânica e pouco absorvida pelas plantas. Para ser absorvido, passa para a forma iônica, como nitrato, com carga negativa pode sofrer lixiviação, e como amônio, com carga positiva, pode ser adsorvido pelo complexo catiônico do solo. Constitui de 1 a 5% da matéria seca dos vegetais. (MELO et al., 2001).

Sendo o nitrogênio (N_2) um elemento pouco reativo, apesar de existir em abundância na atmosfera, cerca de 72% da composição do ar, a sua conversão em formas que possa ser utilizado por organismos vivos é uma função altamente especializada, num processo denominado “fixação do nitrogênio”. Portanto, é pelo processo de fixação que o nitrogênio é introduzido no seu ciclo biogeoquímico. A fixação pode ser física, química ou biológica. A fixação física acontece em vulcões e descargas elétricas atmosféricas, e representa quantidades muito pequenas. Segundos as teorias mais aceitas, as descargas elétricas e vulcões deram origem às primeiras formas de nitrogênio assimilável que permitiram o aparecimento dos primeiros organismos. WOHLER (1828), citado por BSCS (1972), conseguiu sintetizar uréia em laboratório a partir de substâncias inorgânicas, levando à hipótese heterotrófica da origem da vida. MILLER (1953), citado por BSCS (1972), construiu um aparelho simulando a atmosfera primitiva, com metano, hidrogênio, amônia, vapor d’água e descargas elétricas, produzindo aminoácidos.

A fixação industrial é realizada com alto custo energético, o nitrogênio do ar (N_2) se liga a hidrogênio fornecido por gás natural, petróleo, nafta ou álcool, sob condições de elevada temperatura e pressão, dando origem à amônia (NH_3) (GOMES et al. 2000).

A fixação biológica é a forma natural mais relevante. É realizada por bactérias e algas. Bactérias do gênero Rhizobium, em simbiose com leguminosas, formando nódulos em sistema radicular, frequentemente excede 100 kg de N por hectare, alfafa pode fixar de 300 a 500 $kg.ha^{-1}$, segundo RAVEN & JONHSON (1992). Em cultura de arroz irrigado, a fixação é realizada em quantidade muito expressiva pela cyanobactéria *Anabaena azollae*. Em algumas plantas a fixação é por associação com a Actinomicetos.

Bactérias não simbióticas dos gêneros Azotobacter (aeróbico) e Clostridium (anaeróbico), bactérias saprófitas comuns do solo, são capazes de fixar nitrogênio (GALLO, 2006).

Tabela 2. Estimativa de quantidades totais de nitrogênio fixadas anualmente, segundo GOMES et al. 2000.

Processo	milhões de toneladas de N	
Fixação biológica	15,0	
Industrial	30,0	
Chuvas e relâmpagos	10,0	
Vulcões	0,2	

O ciclo do nitrogênio pode ser entendido como as sucessivas transferências entre diferentes níveis tróficos e diferentes partes do ecossistema. Esse ciclo é ilustrado nas figuras 1, 2 e 3.

Em um ecossistema ou numa cadeia alimentar, o nitrogênio é transferido de um nível para outro em diferentes formas. Quando essa transferência sofre interrupção ou um desvio, seja em quantidade ou em rota, surgem efeitos que podem ser denominados “poluição”. Por exemplo, quando a nitrificação ou uma fertilização excessiva predispõe a lixiviação do N para águas subterrâneas ou arraste por erosão para águas superficiais, pode ocorrer excessos de teores de N nessas águas,

prejudicando organismos que nelas vivem ou a utilizam. Isto constitui uma forma de poluição.

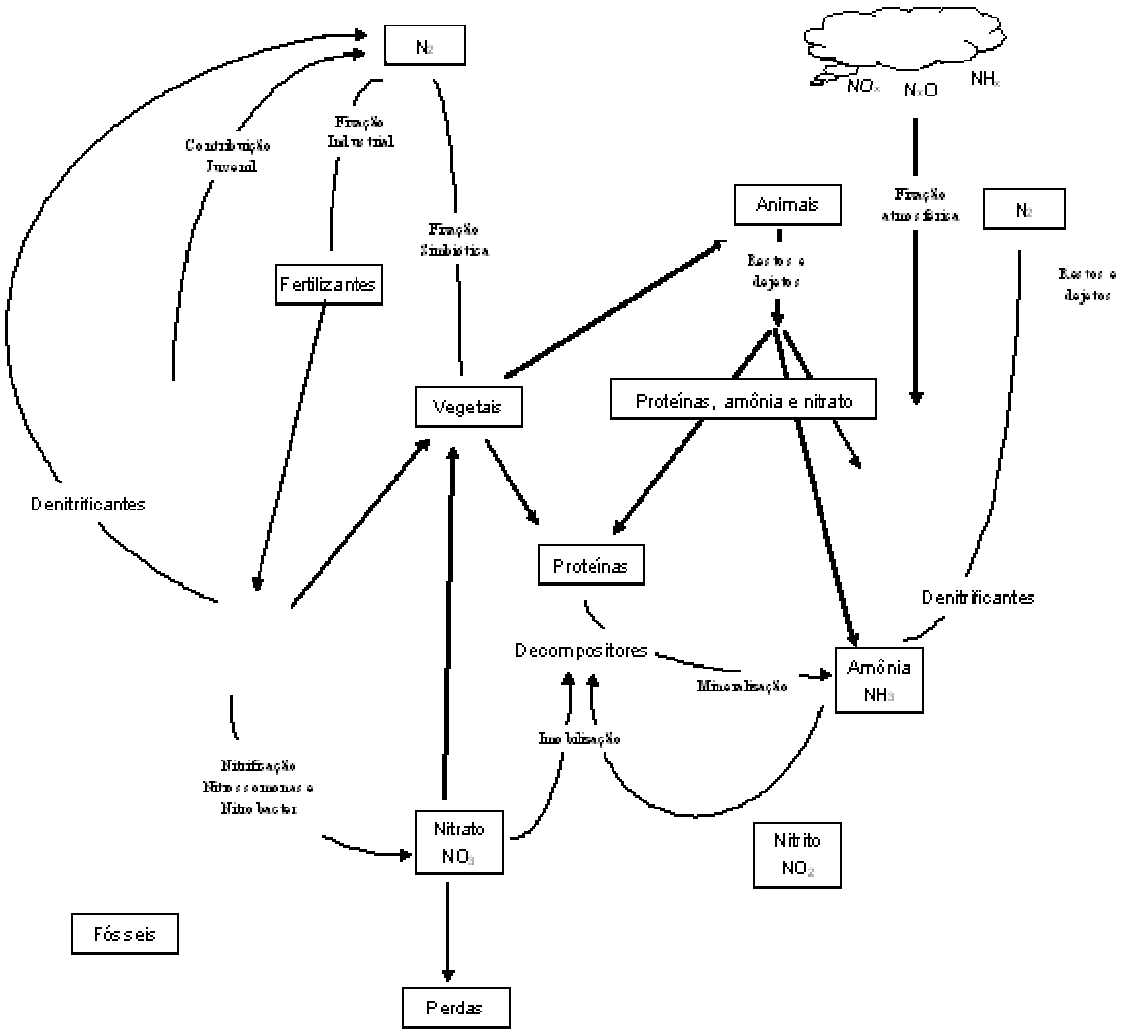


Figura 1. Ciclo do nitrogênio. Adaptado de GOMES et al. (2000)

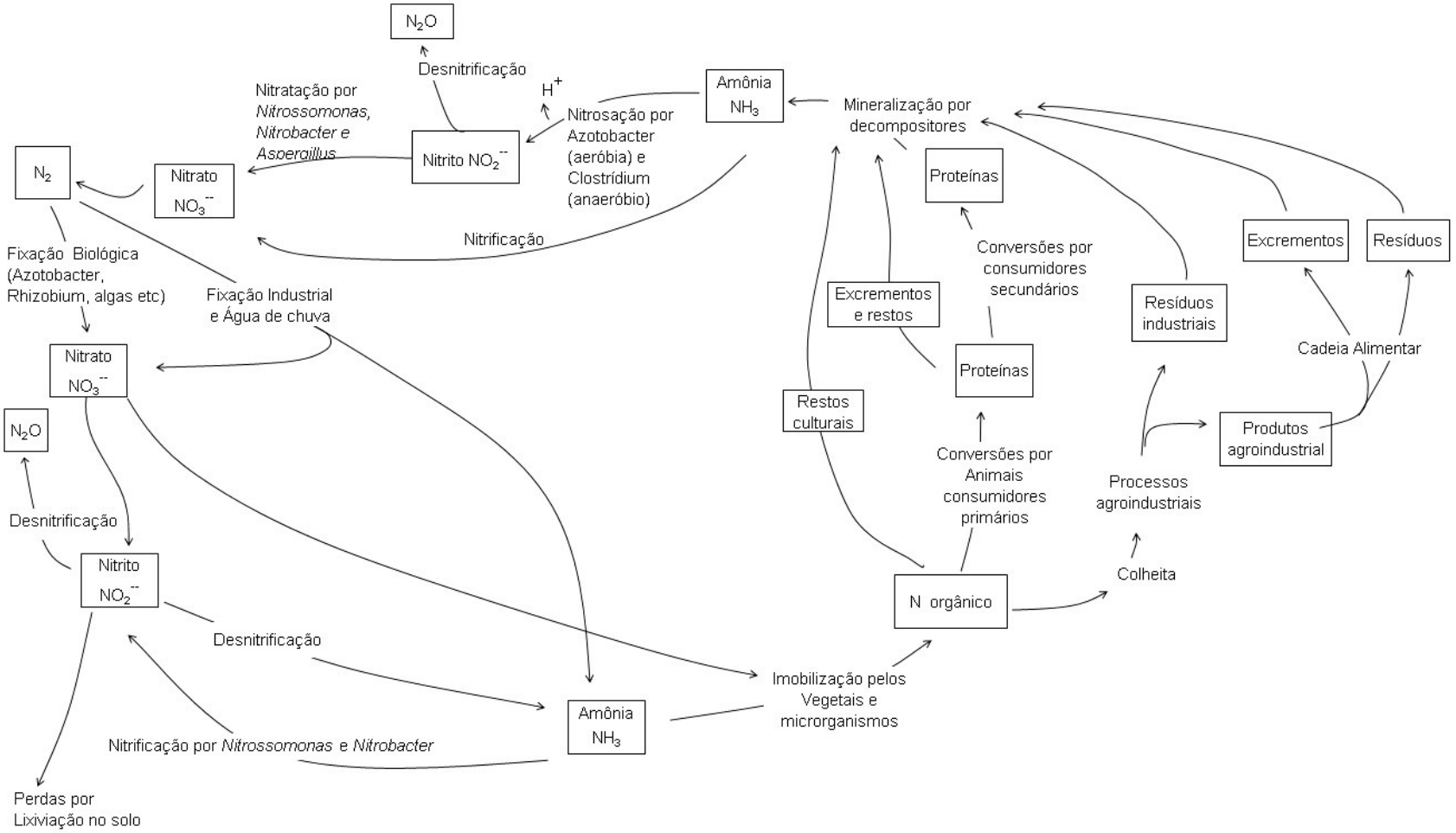


Figura 2. O ciclo do nitrogênio e o agroecossistema.

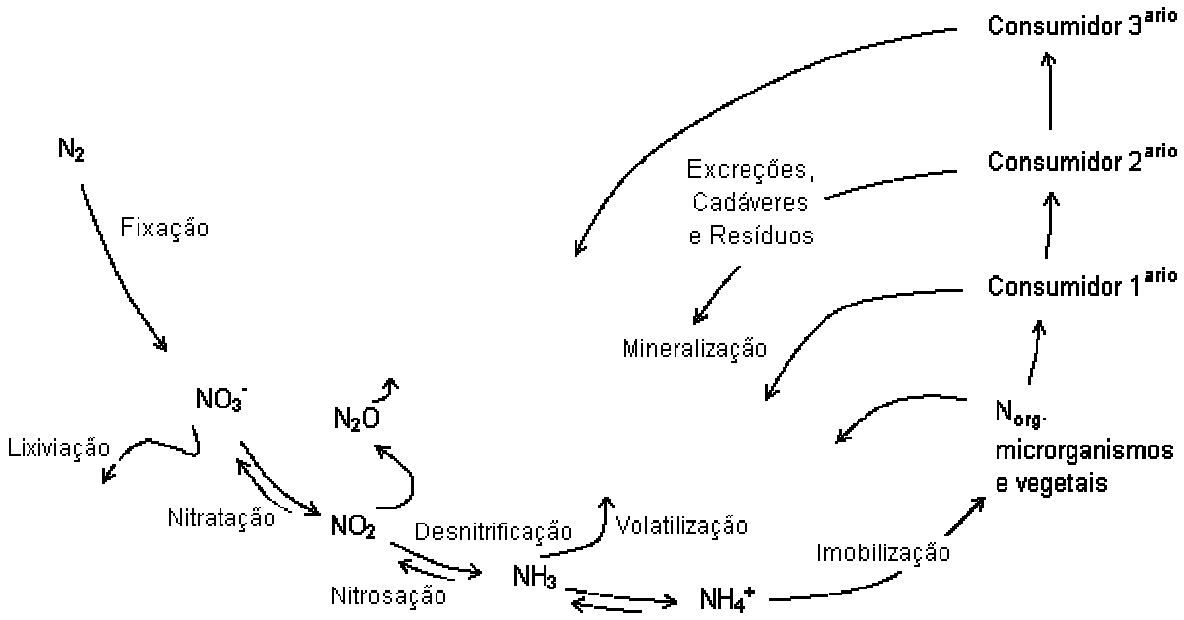


Figura 3. Uma ilustração do ciclo do nitrogênio elaborada do ponto de vista dos níveis tróficos e da reciclagem de resíduos, excrementos e cadáveres.

Em cana-de-açúcar, segundo BODDEY et al. (1990), foram identificadas por DOBEREINER (1959), bactérias fixadoras de nitrogênio, do gênero *Beijerinckia,* em grande quantidade na rizosfera, e LIMA et al. (1987), da mesma equipe, realizaram balanço de nitrogênio em plantas de cana-de-açúcar, e verificaram que houve acúmulo maior que 150 $kg.ha^{-1}$ de nitrogênio por microrganismos associados às plantas.

BODDEY et al. (1990) avaliaram a ocorrência de Acetobacter diazotrophicus em raízes lavadas de cana-de-açúcar e verificaram maior ocorrência em áreas “sempre” cultivadas e um aumento da população quando utilizada vinhaça (Tabela 3), e a contribuição dessas bactérias no nitrogênio acumulado pela cana-de-açúcar, confirmando a importância da fixação (Tabela 3a).

BRESSAN & GERALD (2002), experimentaram diversos métodos de inoculação, variedades e duas espécies de bactérias. Concluíram que esses métodos

poderão ser utilizados para dispensar ou reduzir a adubação nitrogenada na cultura comercial da cana.

Tabela 3. Ocorrência de Acetobacter diazotrophicus em raízes lavadas de quatro variedades de cana-de-açúcar amostradas na região de Campos-RJ. Número (x 1000) de bactérias por g de peso seco de raízes lavadas.

	CB 45-3	NA 56-79	RB739735	RB739359
	..... Número (x 1000) de bactérias por g de raízes			
Área sempre cultivada com cana				
Cana-planta	900	>10.000	>10.000	7.000
Cana-soca com 60 kg.ha^{-1} de N	<1	7.000	8.000	200
Área nova				
Cana-planta	200	300	400	20
Cana-soca com aplicação de vinhaça	2.000	10.000	7.000	nd

Tabela 3a. Contribuição da fixação biológica no acúmulo de nitrogênio por variedades de cana-de-açúcar (BODDEY et al. 1990).

Variedade	Contribuiçaõ da fixação biológica % do N acumulado
CB 47-89	41,9
CB 45-3	44,1
NA 56-79	42,9
IAC 52-150	46,2
SP 70-1143	52,3
SP 71-799	46,1
SP 79-2312	41,7
Chunee	37,2
Caiana	42,2
Krakatau	55,6
Brachiaria radicans	0

Segundo SANCHES (1976), citado por PADOVESI (1988), a chuva e a poeira adicionam anualmente ao sistema solo-planta, quantidades da ordem de 4 a 8 kg ha^{-1} de N. Na cana-de-açúcar, a fixação biológica é responsável por cerca de 17% do N utilizado, equivalente a cerca de 16,6 kg ha^{-1}. O cultivo de soja em rotação pode elevar esse valor para 35 kg ha^{-1}, e o cultivo intercalar de feijão pode corresponder a 25 kg ha^{-1}. O uso agrícola de leguminosas em rotação, intercalar ou consorciada aos cultivos é uma prática já incorporada em diversas culturas e ainda com grande potencial de expansão tecnológica e prática.

Denomina-se nitrogênio disponível aquele que se encontra em formas que possam ser assimiláveis pelos vegetais. Segundo LÓPEZ (1998), existem estudos sugerindo que as plantas estimulariam a mineralização do N orgânico pela exudação de substâncias pelas raízes. Espécies com tal potencial teriam vantagens em obter N.

A adição ao solo de material com alta relação C/N e facilmente decomponível resultará em imobilização de nitrogênio do solo (incorporação nos compostos nitrogenados constituintes dos microrganismos), ao passo que a mineralização ocorrerá quando o material adicionado tiver baixa relação C/N.

CAMARGO et al. (1987) estudando efeitos da aplicação de vinhaça no solo verificaram que a aplicação de vinhaça em doses de 100 e 1000 $m^3.ha^{-1}$ não provocaram alteração nos teores de nitrato (NO_3^-) e de amônio (NH_4^+) no solo de 0 a 40 cm. Os autores sugerem que a alternância entre seca e umedecimento do solo é fator que colabora para a mineralização do N.

Nitrificação é o processo de oxidação do NH_4 para nitrato NO_3 por *Nitrossomonas, Nitrobacter e Aspergillus*. A nitrificação é um bom indicador da atividade biológica e da fertilidade do solo, é sensível às alterações do ambiente e pode ser medida com razoável precisão. É usada para avaliar efeitos de vários poluentes químicos na biologia do solo. Entretanto, uma redução da taxa de nitrificação não é de todo indesejável, pois a manutenção do N na forma de amônio

favorece a sua manutenção no solo; sendo cátion será adsorvido nos colóides do solo. Enquanto, por outro lado, na forma de nitrato, um ânion, seria parcialmente lixiviado.

A nitrificação é constituída de duas etapas: nitritação quando ocorre a formação de NO_2^- e a nitratação quando o NO_2^- é transformado em NO_3^-. Sendo que o nitrito, forma intermediária neste processo, raramente se acumula em quantidades detectáveis.

Condições de maior aeração do solo, como revolvimento, gradagens, descompactação, drenagem, que favorecem metabolismos aeróbicos, tendem a migrar o nitrogênio para formas NO_2 e NO_3.

Segundo RAVEN & JOHNSON (1992), em presença de água, o íon amônia fica em equilíbrio com o íon amônio (NH_4), a Nitrossomona (bactéria quimiotrófica nitrificante) oxida a amônia NH_3 para nitrito e a Nitrobacter oxida o nitrito NO_2 para nitrato NO_3.

$$NH_4 + 1{,}5\ O_2 \longrightarrow NO_2 + 2\ H_2 + H_2O \qquad \text{(Nitrossomonas)}$$

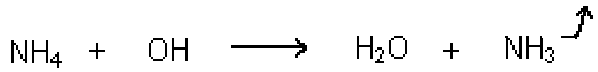
$$0{,}5\ O_2 + NO_2 \longrightarrow NO_3 \qquad \text{(Nitrobacter)}$$

Segundo KINJO & PRATT (1971) e KINJO et al. (1978), citados por PADOVESI (1988), há adsorção de $N\text{-}NO_3^-$ em solos ricos em óxidos de Fe e Al e materiais amorfos que ocorrem nas regiões tropicais. Segundo os autores, a adsorção de $N\text{-}NO_3$ depende principalmente da natureza dos colóides do solo, da acidez do meio e da concentração de NO_3^- na solução de equilíbrio.

LÓPEZ et all. (1998), estudando nitrificação e desnitrificação em solo sob plantio direto e plantio convencional, sugere que no sistema de plantio convencional, comparado com o plantio direto, a oxidação mais rápida da matéria orgânica, que

sempre foi atribuída à maior aeração do solo, seja também devida à adição de substâncias amoniacais, incrementando o efeito. Pode ser sugerido que, considerando o conteúdo de nitrogênio do ar, a aeração do solo seja veículo para oxigênio e nitrogênio, além de outros elementos possivelmente. Esses mesmos autores concluem, concordando com outros autores, que no sistema de plantio direto foi observado tendência de maior desnitrificação.

A volatilização da amônia ocorre com a alcalinização do meio, pela reação de amônio e hidroxila resultando em água e amônia volátil, ou seja:



Essa perda depende do equilíbrio, em solução, entre a forma gasosa NH_3 e a forma iônica NH_4^+, que é influênciada pela temperatura e pelo pH do meio (HOLTAN-HARTWIG & BOCKMAN, 1994, citado por TRIVELIN et al., 2002). Podendo isto ocorrer em condição de calagem excessiva ou aplicação de adubo nitrogenado sobre calcário aplicados em superfície. Neste caso é recomendável que a aplicação do calcário seja realizada alguns dias após a fertilização, após a solubilização do fertilizante. REYNOLDS & WOLF (1987) e RODRIGUES et al. (1986), citados por PADOVESI (1988), observaram que o secamento do solo pode acelerar a volatilização da amônia, principalmente nos primeiros cinco centímetros do solo. Segundo GLÓRIA (1995)[2] os fertilizantes nitrogenados sujeitos à volatilização devem ser incorporados ao solo pelo menos a 5 cm de profundidade.



[2] Informação pessoal

A lixiviação é atribuída à não retenção do ânion NO_3^- pelos solos tropicais que geralmente têm elevada capacidade de troca catiônica e quase nula capacidade de troca aniônica.

PADOVESE (1988), estudando movimento e perda de nitrogênio no solo, verificou que os tratamentos que não receberam vinhaça sofreram maiores perdas por lixiviação de NO_3^- abaixo de 100 cm de profundidade. E descreve que, provavelmente, a vinhaça inibiu a lixiviação do íon. Possivelmente ocorreu imobilização ou amonificação do nitrogênio.

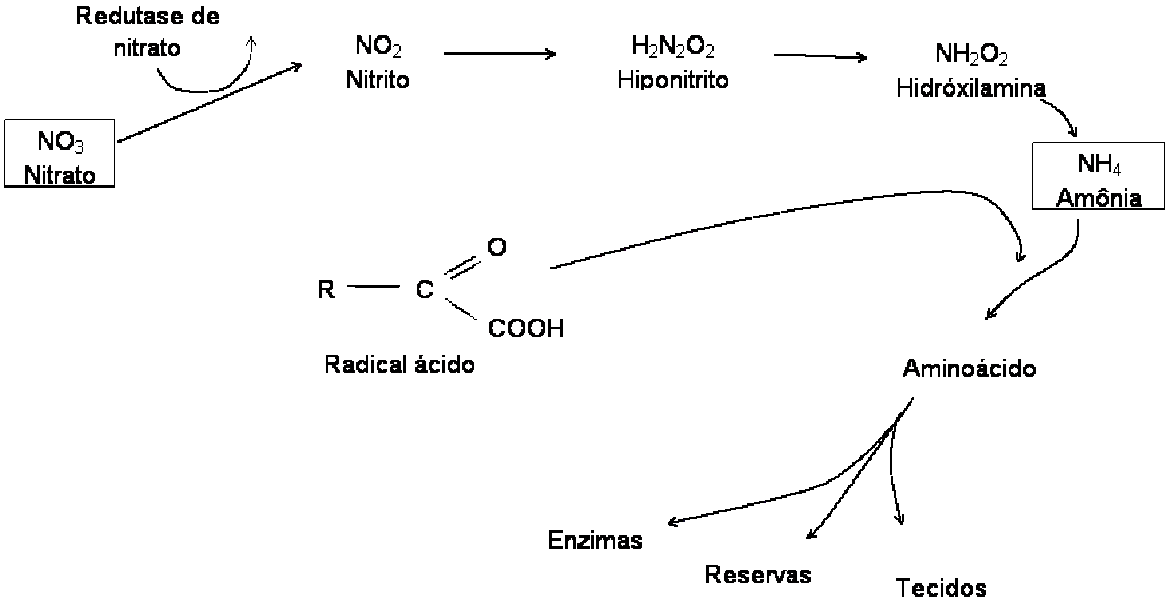
ORLANDO FILHO et al. (1995) avaliaram a lixiviação de nitrogênio em solo arenoso (AQ) ao longo do perfil do solo até 200 cm de profundidade, sob adubação mineral e com vinhaça durante 25 semanas após a aplicação, e verificaram que não ocorreu aumento no NO_3 e NH_4 do solo ao longo do perfil.

DYNIA (2000) estudou a retenção e lixiviação de nitrato em solos LR, LE e AQ, na microbacia do Córrego Espraiado em Ribeirão Preto-SP, sob cultura de cana-de-açúcar, e verificou que os solos apresentaram no subsolo, condições eletroquímicas favoráveis, com cargas elétricas positivas e, consequentemente, capacidade de adsorção de nitrato. Ocorrendo acúmulo de nitrato entre 260 a 400 cm em LR, entre 220 e 460 cm em LE, e entre 340 e 600 cm em AQ.

O nitrogênio é imobilizado quando assimilado por microrganismos ou vegetais. Esses organismos absorvem nitrogênio na forma de NH_4^+ e NO_3^-, incorporam-no à moléculas orgânicas e assim inserem o nitrogênio na cadeia alimentar. A Biomassa microbiana do solo possui um papel fundamental na manutenção da produtividade do agroecossistema, pois constitui um meio para transformação de todos os materiais orgânicos do solo em um reservatório de nutrientes no solo. E é o compartimento mais rápido da ciclagem da matéria orgânica. Sua estimativa fornece dados úteis sobre as alterações do solo, visto que respondem mais rapidamente à alterações do que parâmetros químicos e físicos. Os valores da biomassa do solo indicam o potencial de atividade microbiana que pode estar participando dos processos de decomposição de

resíduos e disponibilização de nutrientes no solo. A biomassa microbiana constitui um reservatório de N potencialmente mineralizável. Entretanto, em solos com baixos teores de N, o N contido na biomassa microbiana será preferencialmente utilizado para a decomposição do material orgânico, sendo incorporado, imobilizado e reduzindo sua disponibilidade para as plantas. (PAUL & CLARK, 1989, citado por LÓPES, 1998).

Baseado em MALAVOLTA et al. (1974) a imobilização pode ser apresentada da seguinte forma:



A complexidade do ciclo do nitrogênio pode ser ilustrada pela informação de HOLTAN-HARTWIG & BOCKMAN (1994), citado por TRIVELIN et al, (2002), de que ocorrem perdas ou trocas gasosas de nitrogênio pela folhagem. Nas concentrações de NH_3 na atmosfera abaixo do ponto de compensação de amônia da planta, ocorre sua emissão pela folha, em concentrações acima, sua absorção.

GLÓRIA & MATIAZZO (2001)[3] estudando diferentes modalidades de deposição de palha de cana no solo e adubação complementar com nitrato de amônio, verificaram que após 153 dias, não havia diferença no teor de N-total no solo na profundidade de 0 a 40 cm. Enquanto o N-disponível (NH_4^+ e NO_3^-) tendeu a menor teor no solo quando a palha foi incorporada, provavelmente pela função dreno dos microrganismos na decomposição da palha de elevada relação C/N (Tabela 4).

Tabela 4. Conteúdo de formas de nitrogênio no solo sob diferentes modalidades de deposição de palha de cana e adubações com nitrato de amônio (NA), obtido por GLÓRIA & MATIAZZO (2001).

Tratamento	N-total	$NH_4^+ + NO_3^-$
	..... $g.kg^{-1}$	
Solo	0,72 ab	0,06 bc
Solo + palha superfície	0,69 ab	0,06 bc
Solo + palha incorporada	0,72 ab	0,03 c
Solo + NA	0,63 b	0,11 a
Solo + palha superfície + NA	0,74 ab	0,10 ab
Solo + palha incorporada + NA	0,89 a	0,10 ab

O uso agrícola de lodo de esgoto representa, atualmente, uma importante fase do ciclo do nitrogênio, representa um exemplo da relatividade do conceito de poluição e referências para o gerenciamento de resíduos na agroindustria da cana-de-açúcar. A destinação do nitrogênio dos dejetos humanos e industriais constitui uma quebra do ciclo do N, resultando em desequilíbrio pela eutrofização das águas de superfície ou subterrâneas, uma importante forma de poluição, com prejuízo às populações de inúmeras espécies, e oferecendo condições insalubres à própria espécie humana. Segundo SOBRINHO (2001) as estações de tratamento de esgoto têm eficiência até

[3] Informação pessoal.

superior a 90% de remoção de nitrogênio da água, ficando retido no lodo. Tal que o uso agrícola desse lodo como fertilizante, representa um caso de regeneração do ciclo biogeoquímico do nitrogênio e de outros elementos, no sentido da sustentabilidade cruzada dos dois ecossistemas - agrícola e urbano. Para viabilizar esse processo é necessário que o lodo de esgoto seja adequado ao uso agrícola quanto a teores de nutrientes, conteúdo de metais pesados, substâncias tóxicas, patógenos, consistência física, etc.

Tabela 5. Conteúdo em macronutrientes do lodo de esgoto obtidos em algumas estações de tratamento de esgoto (ETEs) (MELO et al.,2001).

	SABESP			SANEPAR	
Elemento	Barueri	V. Leopoldina	Franca	ETE	RALF
	..... $g.kg^{-1}$				
N-Kjeldahl	22,5	18,5	79,1	49,1	22,1
Fósforo	3,2	9,4	10,6	3,7	2,1
Potássio	0,0	1,6	0,6	1,5	1,4
Cálcio	72,9	5,6	22,1	15,9	8,3
Magnésio	9,6	2,4	2,1	6,0	3,0
Enxofre	5,1	10,1	nd	nd	nd
RALF: Reator anaeróbico de leito fluidizado					

MELO et al. (2001) cita que grande parte do nitrogênio do lodo de esgoto encontra-se em forma orgânica, necessitando de mineralização, e recomenda que a taxa de aplicação de lodo de esgoto seja dada pela recomendação de nitrogênio para a cultura. Ou seja, a taxa de aplicação do lodo seja calculada pelo nitrogênio recomendado para a cultura e o conteúdo de N-disponível no lodo, expresso pela equação:

Taxa de aplicação (ton/ha) = N-recomendado (kg/ha) / N-disponível (kg/ton);

Onde o N-disponível é a soma de N-amoniacal, N-nitrico e N-mineralizável expresso pela taxa de mineralização.

A dinâmica de nitrogênio em lodo de esgoto foi estudada por CARNEIRO et al. (2005) sob higienização por alcalinização (adição de CaO 50% MS lodo). Parece ter observado que, além de ter ocorrido redução da concentração de N pela diluição devida à adição de CaO (50%), ocorreu perda de N pela volatilização de NH_3 e lixiviação organomineral. Com ou sem alcalinização o lodo apresentou significativas perdas de NH_4 por lixiviação no armazenamento. Uma proposta desse trabalho de CARNEIRO et al (2005), foi o tratamento dos resíduos no sentido de aumentar a sua concentração de nutrientes para viabilizar o transporte até locais onde ocorre deficiência ou até os locais onde ocorre a produção agrícola primária.

Conforme MELFI & MONTES (2001), de maneira geral, a aplicação de biossólidos nos solos promove sua valorização em função das transformações, quase sempre positivas, de suas propriedades físicas, químicas e biológicas. Entretanto, não deve ser negligenciado o fato de que sua aplicação pode provocar danos ao meio ambiente, devido ao possível aporte de organismos patogênicos, compostos orgânicos tóxicos e metais pesados. Assim sendo, o uso precisa ser gerenciado e mais pesquisas em zonas tropicais precisam ser realizadas. VANZO et al (2001) apresenta a ETE de Franca-SP como Estabelecimento Produtor de Insumo Agrícola, registrado no Ministério de Agricultura, e descreve o seu produto, o fertilizante Sabesfértil. GATTO (2003), estudou o uso de lodo de esgoto e vinhaça como fonte de nutriente para a cana-de-açúcar, em substituição a fertilização mineral em latossolo vermelho distrófico argiloso, e verificou que a fertilização do solo com lodo de esgoto e vinhaça pode substituir a adubação mineral sem ocasionar perdas agro-industriais.

GAVA et al. (2002) avaliando o balanço do nitrogênio (^{15}N) da uréia e da palhada no sistema solo-cana-de-açúcar, em podzólico vermelho amarelo, observou uma menor movimentação em profundidade do N-palhada, reforçando a idéia da lenta decomposição deste resíduo e da indisponibilidade para a cultura, sendo que 91% do

N permaneceram no resíduo após um ano. Em colheitas sucessivas contribuirá para aumentar a matéria orgânica do solo.

O fósforo, via de regra, é o elemento mais frequentemente limitante em todos os ecossistemas, as fontes primárias são as rochas, onde encontra-se em formas insolúveis, indisponíveis para os organismos superiores. O ciclo do fósforo não apresenta a fase atmosférica, exceto, em condições especiais com a formação de fosfina. O fósforo, no ecossistema, não passa pela forma elementar, circula na forma de ânion fosfato, sendo a solubilidade e adsorção variável em função da espécie química, do cátion associado e do pH do meio, entre outros. A deposição de partículas de solo e de fuligem em suspensão atmosférica algumas vezes é considerada entrada no ecossistema, outras vezes não, dependendo da extensão dada ao ecossistema. A entrada do fósforo na biosfera se dá pela absorção pelas plantas e microrganismos, retornando ao solo pela decomposição de matéria orgânica oriunda de plantas, animais e microrganismos (GOMES et al, 2000).

Segundo SIQUEIRA & FRANCO (1988), a capacidade dos microrganismos em solubilizar fosfatos inorgânicos, é de ocorrência generalizada, tanto em heterotróficos quanto em autotróficos, do solo. Sua influência na absorção pelas raízes ocorre através de favorecimento na absorção, no aumento da acessibilidade ao P-lábil, na mineralização e imobilização de P-orgânico e na solubilização de fosfatos inorgânicos. E ainda, incrementos de matéria orgânica no solo, além de melhorar as condições físicas do solo e conseqüente aumento do volume explorado, podem reduzir a fixação de fosfatos e aumentar a disponibilidade através de mecanismos de imobilização na forma de biomassa, sendo disponibilizado pela sua mineralização, e de mecanismos de proteção dos sesquióxidos por substâncias húmicas.

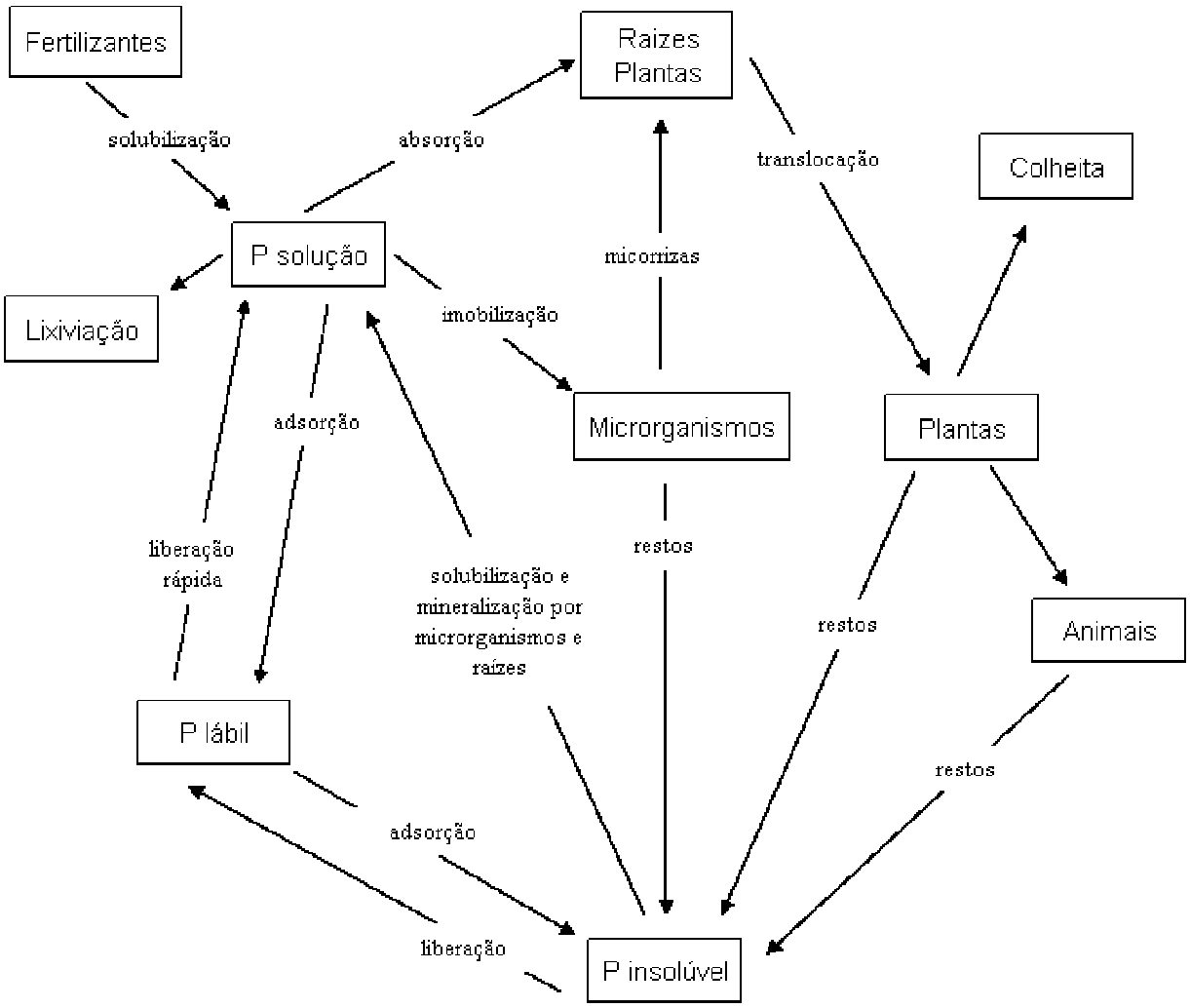


Figura 4. Ciclo do Fósforo, extraído de NAHAS (1991).

Interessante destacar que, segundo GOMES et al (2000), em ecossistemas naturais, a disponibilidade de fósforo é suficiente para a manutenção da comunidade biótica devido, principalmente, a mecanismos que a própria comunidade desenvolveu. Enquanto nos agroecossistemas ocorrem perdas por escoamento superficial e

subsuperficial, e exportação em produtos agrícolas. Exigindo reposição na forma de adubação. Pode ser acrescentado que a obtenção de maiores produtividades demanda maiores disponibilidades de fósforo.

LYNCH (1986) apresenta que as transformações microbianas do fósforo orgânico muitas vezes produzem a maior parte do fósforo em solução disponível às plantas e isto poderia constituir um efeito benéfico do uso de composto e do cultivo orgânico. O fósforo do solo está quase inteiramente na forma de fosfato, em níveis de aproximadamente 400 a 1.200 $mg.kg^{-1}$, pequena parte (provavelmente menos de 5%) está disponível para a planta, ocorrendo principalmente como fosfatos insolúveis e complexos orgânicos. Parte do fósforo entra na solução do solo, a partir da mineralização de rochas, mas a decomposição de matéria orgânica constitui uma fonte mais importante. A decomposição de ácidos nucléicos e de fosfolipídios é rápida, mas os compostos mais complexos, como o ácido fítico e os polifosfatos, são mineralizados mais lentamente.

A Figura 5, baseada em Malavolta & Kliemann (1985) e Stevenson (1986) citados por SIQUEIRA & FRANCO (1988), ilustra a compartimentalização do fósforo no solo, onde: 50-150 $kg.ha^{-1}$ é aplicado na forma de fertilizante, 447 $kg.ha^{-1}$ está fixado, 3 $kg.ha^{-1}$ está em forma lábil, 150 $kg.ha^{-1}$ está na forma orgânica, 0,3 $kg.ha^{-1}$ permanece na solução do solo e 30-40 $kg.ha^{-1}$ é absorvido pela planta. Esse autor considera o fósforo um recurso natural não renovável. E cita ainda que a adição de matéria orgânica ao solo pode favorecer a decomposição de determinadas frações de substâncias húmicas nativas e liberar fósforo. Esse fenômeno é conhecido como efeito “priming” e ocorre também com o nitrogênio orgânico do solo.

No sistema agroindustrial da cana-de-açúcar, além das adubações fosfatadas, a adição de ácido fosfórico no tratamento do caldo durante o processo industrial, representa importante introdução de fósforo, que é retido por filtragem, constituindo a torta-de-filtro, resíduo pelo qual esse elemento é reciclado para o campo como fertilizante.

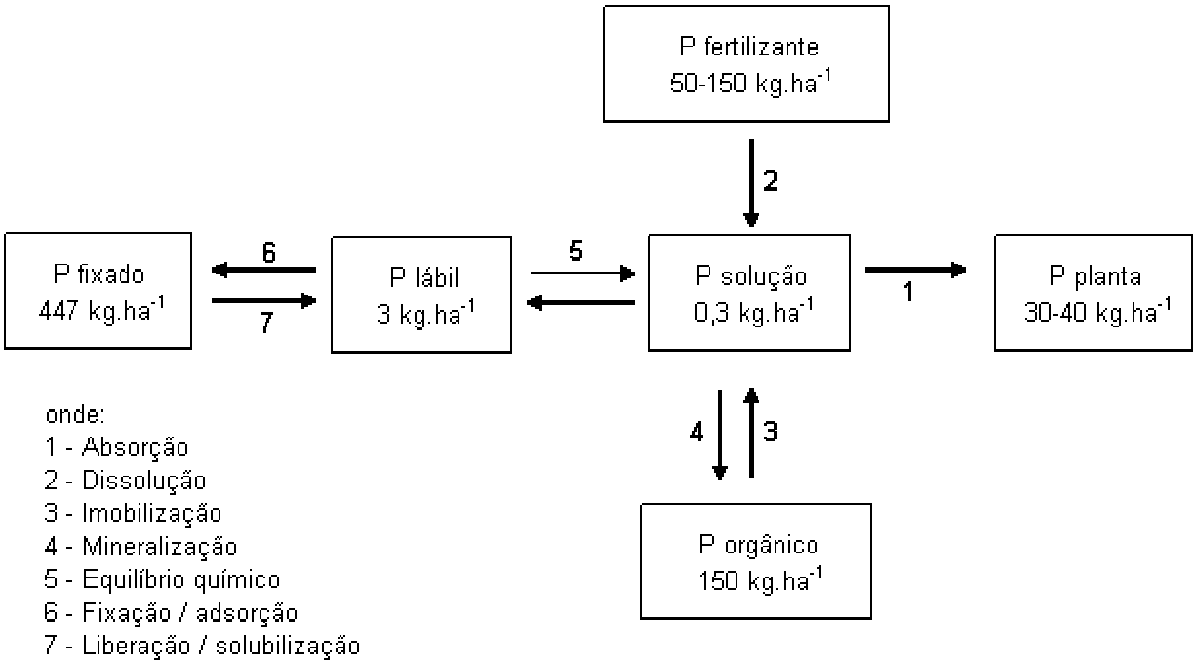


Figura 5. Compartimentalização do fósforo, baseado em MALAVOLTA & KLIEMAN (1985) e Stevenson (1986) citados por SIQUEIRA & FRANCO (1988)

O ciclo do enxofre, por sua vez, apresenta etapas e processos que ocorrem no solo, na água e na atmosfera (Figura 6), sendo a matéria orgânica a fonte mais importante no solo. Além das importantes funções na planta como constituinte de aminoácidos e de reguladores de crescimento, pode interferir, de forma marcante, nas condições fisico-químicas-biológicas do solo e da água. No Brasil, apesar do aumento das pesquisas com enxofre nos últimos anos, o conhecimento de sua dinâmica e disponibilidade ainda é insuficiente (GOMES, 2002).

No agroecossistema da cana, o enxofre exemplifica caso de externalidade com insustentabilidade social; é encontrado em maiores concentrações na vinhaça, que sob a ação de microrganismos libera o enxofre, principalmente gás sulfídrico, de odores fortemente desagradáveis. Sua destinação adequada como fertilizante equaciona esse problema.

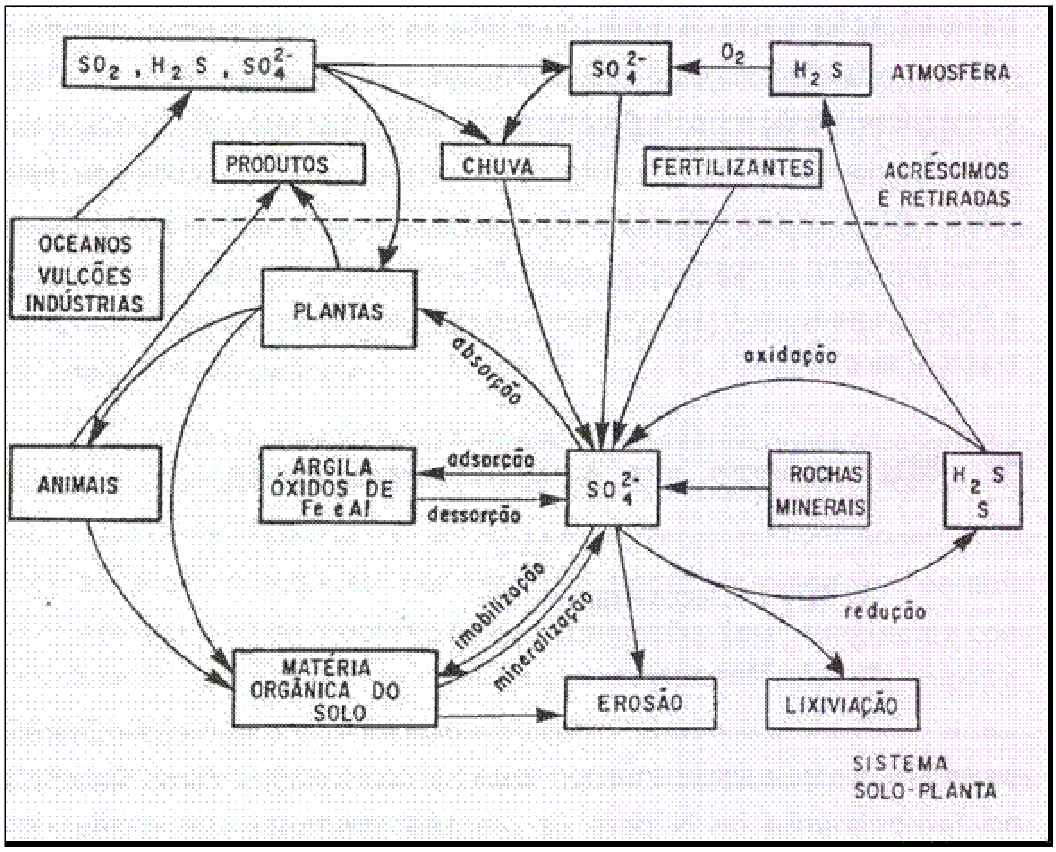


Figura 6. Ciclo do Enxofre, extraído de GOMES et al. 2000.

Na ciclagem dos outros elementos, como K, Ca e Mg, também influenciada por microrganismos, durante o processo de decomposição dos restos orgânicos, grandes quantidades desses elementos são liberadas, em forma iônica, pois são formas mono ou bivalentes, não estando fortemente ligados aos compostos orgânicos e também não sofrem reações de oxi-redução, como ocorre com N, P e S (SIQUEIRA & FRANCO, 1988). Sendo de ciclo sedimentar, esses elementos têm, na crosta terrestre, seu principal reservatório e sua origem a partir da solubilização de minerais.

Uma interessante redução do uso de fertilizante foi implementada na Cia Energética Santa Elisa (RAMOS-DURIGAN et al., 2001[4]). com base em alguns experimentos. Em dois experimentos de adubação NK fatorial, em latossolo vermelho, em Sertãozinho e Morro Agudo-SP, foi observado que os incrementos de produtividade se estabilizavam à doses de 90 kg de potássio, enquanto na área sem palha a estabilização só acontecia ao redor de 180 kg. Resultado este coerente com o observado por OLIVEIRA et al. (1999), em que respectivamente 13% e 95% do N e K da palha foi liberado para o solo durante o período de janeiro a novembro, em Piracicaba/SP.

LYNCH (1986), tratando dos efeitos das modificações do solo sobre fatores microbiológicos na produtividade agrícola, conclui que, "*qualquer material, natural ou sintético, aplicado ao solo, pode afetar a atividade microbiológica e a fertilidade do solo; desde que as aplicações sejam manejadas adequadamente, os efeitos prejudiciais, sobre o crescimento das plantas e sobre o meio ambiente, podem, geralmente ser evitados. Deve-se considerar, também que tal material pode, com freqüência ser potencialmente benéfico à estrutura do solo e ao crescimento da planta. Os esforços de pesquisas devem ser dirigidos à compreensão e aproveitamento desses efeitos benéficos com eficiência máxima*".

"*O solo é uma sepultura no seu mais amplo sentido*", dizem Wrightson & Newsham (1916), citados por LYNCH (1986) como expressão que mostra a função do solo nos ciclos biogeoquímicos. Cabe, porém, na medida em que intensificamos as interferências, adotarmos medidas de avaliação e gerenciamento da interferência, no sentido de sustentar a resiliência do solo. A Figura 3 foi elaborada a partir desse ponto de vista.

2.3. Destinação de resíduos e efluentes da agroindústria da cana-de-açúcar

[4] Relatório interno, Cia Energética Santa Elisa

A indústria da cana-de-açúcar é reconhecida como grande produtora de resíduos. Em 1908, relatos do então governador de Pernambuco à Assembléia Legislativa tratando da necessidade de cercear o abuso de usinas lançadoras de vinhaça às águas (FREIRE & CORTEZ, 2000), registram quão antiga é a questão. E ainda, a série de leis que se seguiram, denotam a resistência das empresas à implementação de outros destinos e o conflito social.

Possivelmente, o uso de resíduos da indústria canavieira em solo agrícola, como adubação orgânica, ocorria informalmente. Estudos do uso agrícola da vinhaça foram publicados por ALMEIDA et al (1950), citados por VALSECHI & PIMENTEL GOMES (1954). Esses autores, em 1954, utilizando doses de vinhaça de 250 a 1.000 $m^3.ha^{-1}$, concluíram que a incorporação de vinhaça ao solo determina um acréscimo significativo da soma de bases (S) e da capacidade de troca catiônica (T), com apreciável diminuição na concentração de H^+, os quais concorrem para um aumento no teor de sais e no pH do solo, que tende a se estabilizar naquelas doses mais elevadas de vinhaça.

PIMENTEL GOMES & CARDOSO (1958), no livro intitulado Adubação da Cana-de-açúcar, cita que "*as indústrias de açúcar e álcool possuem vários subprodutos e resíduos orgânicos excelentes para a adubação da cana-de-açúcar. (...) Uma das conquistas mais interessantes dos últimos anos no que se refere à fertilização dos canaviais é o uso da vinhaça como adubo."* Relata o uso da vinhaça na Usina Tamoio – Araraquara - e cita que "*seu aproveitamento, além de evitar seu lançamento aos cursos d'água, prejudicial sob todos os pontos de vista, se impõe como método econômico e prático de melhorar o rendimento dos canaviais*".

GLÓRIA (1975) propõe a aplicação racional da vinhaça, baseada no conhecimento de sua composição, e expõe que, focalizar apenas o problema da poluição, foi um erro de apreciação.

A composição da vinhaça é bastante variável, uma caracterização analítica da vinhaça de 28 usinas (SOUZA, 2006) é apresentada na Figura 6.

Tabela 6. Alguns componentes da caracterização analítica de vinhaça, expressos em mg L^{-1}, por SOUZA (2006)

Componente	Mínimo	Média	Máximo	Desvio padrão
	..... mg L^{-1}			
Nitrogênio	90	357	885	177
Fósforo total	18	60	188	36
Potássio total	814	2.035	3.852	804
Cálcio	71	515	1.096	213
Magnésio	97	226	456	71
Sulfato	790	1.538	2.800	514
Sulfito	5	36	153	32

ORLANDO FILHO et al. (1983) estudaram solos com uso de vinhaça em diversos locais do estado de São Paulo e, de maneira geral, observaram, nas condições dos ensaios, que a aplicação da vinhaça, mesmo por tempo mais prolongado (até 20 anos), não provocou efeitos negativos nas propriedades químicas dos solos estudados, em profundidades até 1,50 metros. Verificou-se um efeito benéfico da aplicação do resíduo, traduzido pela elevação do valor do pH e dos teores de K, Ca e Mg, da soma de bases e da CTC efetiva do solo.

HASSUDA (1989) observou que as águas subterrâneas sofreram alterações físico-química após ter sido aplicada vinhaça a taxas muito elevadas, cerca de 12.000 $m^3.ha^{-1}$ durante 9 safras, em solo arenoso. Importante considerar que essa referência não deve ser generalizada para caso de doses usuais de aplicação, que estão entre 60 a 500 $m^3.ha^{-1}$ por ano em diversos tipos de solo.

GLÓRIA & ORLANDO FILHO (1984), citando diversos autores, concluem que a necessidade ou não da complementação da vinhaça com adubos nitrogenados, depende das condições de fertilidade do solo e do volume e riqueza do resíduo. Uma

observação empírica de GLÓRIA (2003)[5], confirmada por diversas análises químicas, indica que, em geral, a vinhaça tem apresentado uma relação N:K equivalente a 1:7.

Neste período, desde os anos 50, no Brasil, foram publicados mais de uma centena de estudos sobre a vinhaça e seu uso agrícola, que permitem concluir que, de modo geral, em doses até 300 m^3 ha^{-1}, a aplicação de vinhaça resulta em correção da acidez, com aumento de pH, aumento da biomassa microbiana, aumento da fertilidade e da produtividade de cana-de-açúcar.

Portanto, se considerarmos o conceito de poluição adotado pela SABESP (2006) – "...poluição é tudo que ocorre com um meio e que altere suas características originais de forma a prejudicar a saúde, o bem estar e a segurança da população; criar condições adversas às atividades sociais e econômicas; e causar danos relevantes à fauna, flora e a qualquer recurso natural" – a vinhaça utilizada de maneira adequada não causa poluição e, ao contrário, pode aumentar o potencial biótico do ambiente.

A vinhaça concentrada é um produto obtido da redução de volume da vinhaça natural, atualmente por evaporação de água. Tem características para ser utilizada em

produtos biotecnológicos, pecuária, construção civil etc, mas atualmente é utilizada como fertilizante. BARBOSA et al (2006) estudando o uso da vinhaça concentrada como fertilizante, concluíram que, em doses equivalentes de N e K, substitui com vantagem os adubos minerais. Possivelmente, essa vantagem deve-se aos demais elementos constituintes desta vinhaça. A composição da vinhaça concentrada é apresentada na Tabela 6.

[5] informação pessoal

Tabela 6. Composição de uma amostra de vinhaça concentrada produzida na Cia Energética Santa Elisa (BARBOSA et al. 2006)

Componente	Vinhaça natural	Vinhaça concentrada
	kg. m^{-3}	
Sólidos solúveis	45,00	416,00
N total	0,64	5,85
P_2O_5	0,37	3,47
K_2O	4,50	40,75
CaO	0,72	6,69
MgO	0,24	2,21
SO_4	0,25	2,43

A torta-de-filtro constitui o material retido na filtragem do lodo decantado no processo de clarificação do caldo de cana. É constituída fisicamente pelo bagacilho – partículas finas de bagaço utilizado como material filtrante - e pelos materiais sedimentados após o tratamento do caldo. Sua composição química depende da variedade, do estado nutricional da cana, da maturação e, principalmente do ácido fosfórico, enxofre e calagem utilizados na clarificação do caldo. RODRIGUES (2002), cita Honig, Hugot, Spencer, Mead, Payne e outros que afirmam ser o teor de fósforo contido no caldo o fator mais importante para uma clarificação eficiente.

O uso da torta-de-filtro como fertilizante foi recomendado por PIMENTEL GOMES & MIRANDA (1958) e diversos trabalhos posteriores aprimoraram seu uso. Sendo, atualmente, de uso convencional, pode ser aplicada em área total e incorporada ao solo antes do plantio, pode ser aplicada no sulco de plantio ou pode ser aplicada na cana-soca incorporada ao solo pelo cultivo (ORLANDO FILHO et al, 1983b). Embora tenha referência segura e não publicada de redução da produtividade quando a torta-de-filtro é aplicada na cana-soca.

A Fuligem e Cinzas de caldeira é o material particulado recolhido no processo de lavagem dos gases e do piso das caldeiras. É material de composição bastante

variável dependendo da intensidade da queima e da composição do bagaço. Sua taxa de produção e composição são bastante variáveis, de acordo com o equipamento e operação.

GLÓRIA et al (1993), utilizando um Latossolo Roxo eutrófico (LRd) e uma Areia Quartzosa (AQ), incubados, com quantidades crescentes de fuligem, observaram aumento de pH, redução no alumínio trocável e acréscimo nos teores de fósforo e potássio do solo, mostrando a efetividade da fuligem em adubação, principalmente por potássio e fósforo. Com a interessante característica de lenta liberação por encontrar-se incrustrados em partículas fundidas de sílica pela queima.

No sistema agroindustrial da cana-de-açúcar, a ciclagem de nutrientes pelo uso agrícola de resíduos e efluentes é, atualmente, uma prática reconhecida. BARBOSA (2002) representou este ciclo na Figura 7 ilustrando o conceito da exportação de C, H, O e energia elétrica com reciclagem dos demais componentes da cana, como fundamento da estratégia de utilização de resíduos.

Considerando que a destinação de resíduos e efluentes, extrapola os efeitos fertilizantes e corretivos do solo, de interesse do agricultor e pode atuar como poluente no caso de uso inadequado, com prejuízo ao meio ambiente e ao bem estar público, é muito apropriada a necessidade de legislação. Atualmente, a CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo, através da Norma Técnica P4.231, estabelece critérios e procedimentos para a aplicação da vinhaça no solo agrícola (CETESB, 2007).

Para os demais resíduos e efluentes não há uma legislação específica, mas pode-se recomendar a aplicação da Norma CETESB P4.230, de 1999, que trata de aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas – critérios para projetos e operação (Tabela 7), podendo ser observado que o potássio, macronutriente vegetal, não é tratado nesta norma. Atualmente, está em discussão uma minuta de Decreto do governo estadual de São Paulo que regulamenta a Lei no

12.600, que estabelece a Política Estadual de Resíduos Sólidos, que dispõe de artigo específico para resíduos industriais.

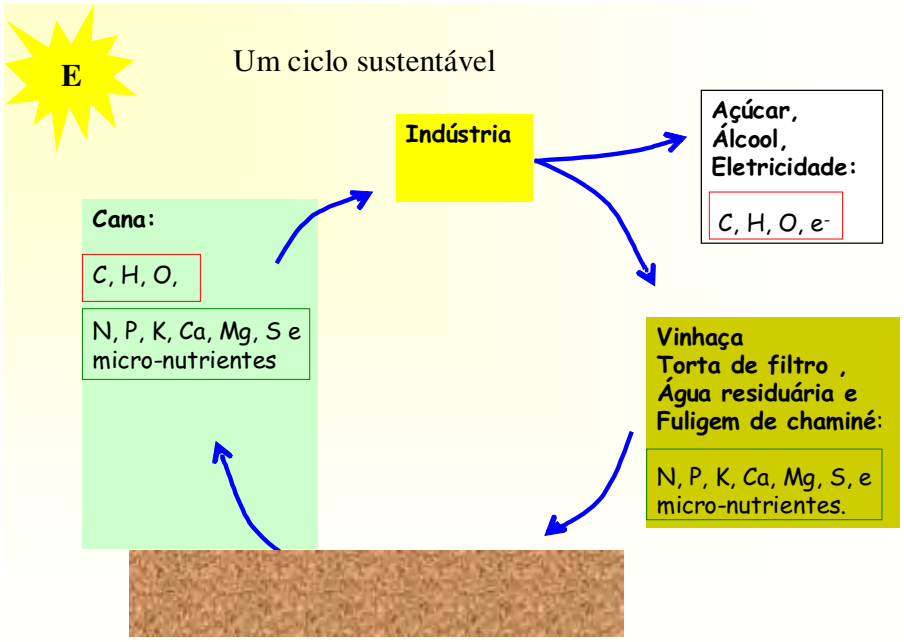


Figura 7. Reciclagem de elementos proposta para uma agroindústria sucro-alcooleira sustentável (BARBOSA, 2002)

Pode ser observado que, conceitualmente, há analogia ou semelhanças entre a reciclagem de lodos de esgoto urbano, de resíduos da agroindústria da cana-de-açúcar, da avicultura, suinocultura etc. Em todos esses casos, os resíduos produzidos têm elevado potencial de impacto ambiental local. Entretanto, se esses resíduos tiverem viabilizados, seu transporte para os locais da produção agrícola das matérias primas, o impacto ambiental pode ser equacionado ou até mesmo convertido em benefício pela substituição da aquisição de nutrientes minerais (fertilizantes químicos) pelo uso de resíduos.

Tabela 7. Taxa de aplicação anual máximas em solos agrícolas, estabelecidos na Norma CETESB P4.230. (CETESB, 1999).

Componentes	Limites anuais Norma CETESB 4.230
	kg ha^{-1}
Arsênico	2,0
Cádmio	1,9
Cobre	75,0
Chumbo	15,0
Mercúrio	0,9
Níguel	21,0
Selênio	5,0
Zinco	140,0

2. 4. Modelagem de Sistema de Produção Agroindustrial

A técnica de modelagem em agricultura pode ser útil para definir as prioridades de pesquisa, bem como para melhor entender as interações que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera. O modelo pode ser utilizado para estimar a importância e o efeito de certos parâmetros no intuito de definir os fatores a serem considerados. O modelador deve definir seus objetivos antes de iniciar o trabalho experimental, bem como desenvolver um modelo que atenda o objetivo proposto (DOURADO-NETO et. al. 1998a).

Segundo BERNARDES et al. (2002), o modelo é uma versão simplificada do sistema e será tão bom quanto o conhecimento que se tenha do sistema. No entanto, não só sistemas bem conhecidos podem ser modelados, pois a modelagem é uma ferramenta que pode ser utilizada para testar hipóteses, gerar hipóteses alternativas e

também para prever o comportamento do sistema em situações ainda desconhecidas. A procura por novos conhecimentos e o desejo de prever, induzem à concepção de modelos.

Segundo DOURADO-NETO et al. (1998b), os modelos não são simples mecanismos para arquivar e sintetizar informações, produzindo estimativas. O modelo representa a modernização da informação, do processo de mensuração e de um eficiente meio de aprender mais sobre sistemas complexos. Os modelos representam o melhor mecanismo de transformar conhecimento em informação útil e transferi-la para terceiros. O nível de detalhes que o modelador inclui depende de seu propósito. Raramente o modelo é o objetivo em si, enquanto o modelador precisa ter seus objetivos muito bem definidos ao iniciar seu trabalho. Um modelo precisa ser suficientemente simples para permitir sua manipulação e entendimento, e suficientemente complexo para permitir a extrapolação de conclusões.

BERGAMASCO et al. (2003) estudou a dinâmica do nitrogênio no sistema solo-cana-de-açúcar através de modelagem matemática, adaptando o modelo CERES N. Conclui-se que o modelo teórico preliminarmente obtido representa a dinâmica do nitrogênio em todo o sistema e simula seu balanço. Concluiu também que os fertilizantes, assim como a palhada da cana crua, influenciam a produtividade da cana e as perdas de nitrogênio.

DOURADO-NETO et al (1998c), citando FRANCE & THORNLEY (1984), argumentam que os modelos representam o melhor mecanismo de sintetizar conhecimento sobre diferentes componentes do sistema, arquivando dados de forma sintética, e transferindo resultados de pesquisa para os usuários.

Sobre os objetivos da avaliação da sustentabilidade, LAL (1999), incluem conservar os recursos naturais, caracterizar e quantificar os principais processos degradativos, identificar características de resiliência e restauração dos recursos solo e água, e identificar opções de manejo compatíveis com seu potencial. Portanto, adotando essa sugestão, podemos tentar assim estabelecer indicadores.

Conforme sugerido por TOMMASI (1974), tratando da “monitorização do meio-ambiente”, são necessárias informações quantitativas sobre o fluxo de materiais que pode ser modificados pela tecnologia. Recomenda ainda que, considerando que a poluição é um problema basicamente biológico, os organismos vivos podem ser utilizados como indicadores qualitativos e quantitativos. Estão continuamente expostos e funcionam como monitores de longa duração, refletindo modificações ambientais que nossos métodos de análise muitas vezes não indicam; e devem ser aliados aos métodos físicos e químicos para uma completa monitorização.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Considerando o conceito de tecnologia como conhecimento organizado, para o desenvolvimento desse trabalho foi adotado conceito de modelagem como tecnologia de gestão, inferindo que a modelagem que se propõe é a organização do conhecimento produzindo modelos que facilitem o entendimento das interações e a percepção das necessidades de pesquisas, soluções e investimentos. Bem como transformar o conhecimento empírico e tácito em conhecimento científico e organizado.

De forma que, para o desenvolvimento deste trabalho, objetivando a criação de modelos, não foi conduzido um experimento de campo, mas sim, foram elaborados conceitos e modelos gráficos. Fundamentados no estudo da literatura e na experiência de campo com a Cia Energética Santa Elisa. Essa empresa, com sede em Sertãozinho-SP, processa 6.000.000 toneladas de cana, das quais produz cerca de 3.000.000 toneladas; cultiva 36.000 hectares, iniciou colheita de cana sem queima experimental em 1987 e em escala de produção em 1991; atualmente a colheita crua (sem queima) está viabilizada e incorporada ao sistema de produção, independente da exigência legal, é realizada em 70% da área de produção própria, que corresponde à cerca de 25.000 hectares, e em cerca de 50% do total de cana processada. Iniciou, em 2003, a operação de termoelétrica com capacidade para 60MW, dos quais cerca de 30MW são para cogeração, correspondendo ao consumo aproximado de uma cidade 200 mil habitantes. O uso de resíduos e efluentes alcança uma área de aproximadamente 28.000 hectares (SANTA ELISA, 2006)[6].

Para a realização do trabalho, tendo em vista o objetivo de construção de modelos, foram estabelecidas etapas relacionadas com aquisição de conhecimento, a elaboração/criação dos modelos e validação dos modelos.

[6] fonte: Cia Energética Santa Elisa.

Essas etapas foram:

a. Aquisição de conhecimento da literatura,

b. Análises de práticas de campo,

c. Formulação de conceitos e premissas,

d. Elaboração de fluxogramas,

e. Identificação das vias de reciclagem,

f. Elaboração de modelos gráficos,

g. Elaboração de indicadores,

h. Elaboração de modelos matemáticos e

i. Validação.

Para viabilizar o presente trabalho, propõe-se centrar o escopo na modelagem conceitual, e não necessariamente na modelagem de dados, considerando a aplicabilidade suficiente para o gerenciamento no agroecossistema da cana-de-açúcar. A modelagem quantitativa trabalhada fez-se com a precisão e profundidade apenas suficiente para a formulação do modelo conceitual. Uma modelagem quantitativa de dados deve ser elaborada em outra instância ou na aplicação dos modelos conceituais para casos específicos do empreendimento. A modelagem conceitual, conforme descrita por BARBIERI (1994), deve preocupar-se com as "coisas" que o sistema deve lembrar e colocar essas "coisas" no modelo de entidades e relacionamentos. Diferenciando entidades, instâncias, atributos e relacionamentos.

3.1.. Ferramentas Conceituais

Para a elaboração dos modelos, entendidos como base para a elaboração de estratégias adequadas, foram elaboradas ferramentas conceituais que são descritas:

3.1.1. **Resíduos**

A Prática da reciclagem de materiais tem contribuído para desmistificar a palavra “resíduo, como algo inútil” (HARDOIM, 2001). A aplicabilidade da expressão “resíduo” depende da amplitude da visão adotada. Quando se trata de uma visão restrita à indústria, esses materiais podem ser entendidos como “resíduos”, pois são inúteis para a indústria. Por outro lado, quando se trata de uma visão global do sistema agroindustrial, esses materiais são meramente produtos parciais em trânsito no processo. Evidentemente a sustentabilidade do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar exige uma visão global, como um ecossistema agroindustrial. Sendo, portanto, um conceito relativo e temporário.

3.1.2. **Ruptura de Ciclos Biogeoquímicos**

Considerando que o princípio da sustentabilidade dos ecossistemas está na circulação de elementos e energia entre os compartimentos, essa circulação pode ser entendida como ciclo biogeoquímico, e seu equilíbrio é relativo ao tempo em que os elementos puderem ser mantidos dentro da área e utilizados pelas sucessivas gerações de organismos. Do ponto de vista antrópico, é interessante que isto ocorra no sentido de manter o potencial biótico do ecossistema, que se manifesta na forma de fertilidade do solo ou produtividade do agroecossistema. Quando ocorre transferência de elementos para fora do ecossistema, como ocorre na colheita do produto agrícola ou nos processos de erosão do solo, a ponto de comprometer seu equilíbrio, ocorreu uma ruptura do ciclo. Portanto, ruptura do ciclo biogeoquímico é o processo de interrupção ou desvio temporário do ciclo de um elemento. Temporário porque a homeostase levará a um novo equilíbrio. Do ponto de vista antrópico, do agricultor, essa ruptura é indesejável quando reduz o potencial de produção da cultura.

Essa ruptura pode afetar os dois ecossistemas envolvidos, o primeiro, que perdeu elementos ficando deficitário, e o segundo, que recebeu elementos ficando melhorado ou "poluído" pela alta concentração deste elemento.

Uma agroindústria açucareira que exporta mel residual pode tornar-se deficitária em potássio, enquanto aquela que recebe esse mel pode sofrer com excedentes de potássio.

Um ciclo biogeoquímico completo, dentro de um ecossistema natural, é, fundamentalmente, composto pelos compartimentos do solo fornecendo nutrientes para os produtores primários e por consumidores componentes da cadeia alimentar, ocorrendo ai a reciclagem dos nutrientes de volta para o solo pelos excrementos, cadáveres e restos, fechando o ciclo e estabelecendo mecanismos de conservação desses nutrientes. Em um agroecossistema antropizado, os produtos primários são transportados e não retornam ao ecossistema, este é um caso de ruptura do ciclo e do ecossistema.

Por outro ponto de vista, pode ser entendido que, com o distanciamento geográfico entre produtores e os consumidores da cadeia, ocorreu uma "globalização" do ecossistema. Exigindo que sejam também desenvolvidos mecanismos de ciclagem que vençam essas distâncias ou que os componentes das cadeias de produção sejam dispostos de forma que sejam minimizados os transportes de elementos.

3.1.3. **Construção ou Adequação de Agroecossistemas**

O estabelecimento de uma agricultura implica em ocupação de uma área. Considerando que o objetivo seja a máxima produtividade sustentável da cultura para otimizar o uso da terra na produção da cultura, e que o ecossistema precessor foi praticamente suprimido, o agricultor precisa construir um agroecossistema viável. Essa tarefa deve incluir o controle das populações de espécies indesejáveis concorrentes, vegetais ou animais, o suprimento de nutrientes deficitários e o controle de alguns fatores condicionantes, como alcalinidade, elementos tóxicos e controle de

erosão. Considerando que o funcionamento deste agroecossistema tem por princípio a manutenção e a circulação de elementos entre seus compartimentos, a sua sustentabilidade e viabilidade será maior tanto quanto maior o tempo que esses elementos se mantiverem em circulação. Daí, a construção ou melhoramento do agroecossistema depende da adoção de estratégia e práticas que promova a manutenção e circulação de nutrientes.

Quando o agroecossistema não dispõe de nutrientes suficientes para a obtenção de produtividades viáveis, torna-se importante a adição desses nutrientes, na forma de fertilizantes. Após a adequação da demanda para o equilíbrio ou sustentação do ciclo, deve-se trabalhar para que o funcionamento do ecossistema mantenha a ciclagem.

A adequação do solo é componente fundamental nesse processo. O solo deve ser condicionado para aumento de sua capacidade de reter, armazenar e disponibilizar elementos para a sustentação dos ciclos biogeoquímicos e consequentemente, do ecossistema. No sentido da alta produtividade.

3.1.4. **Regeneração ou Reconstituição de Ciclos Biogeoquímicos**

Considerando que a ruptura de um ciclo comprometa o seu equilíbrio, a sua sustentabilidade; o seu gerenciamento deve ser no sentido de regenerá-lo. E isso deve envolver equipamentos e processos.

Usualmente, as rupturas de um ciclo, normalmente pela exportação de elementos ou por perdas, é compensada pela aquisição de elementos na forma de corretivos e fertilizantes. Propõe-se que esta regeneração seja pela regeneração do ciclo com o retorno do elemento ora exportado.

Uma ruptura de ciclo pode provocar, por homeostase, um ajuste do ecossistema a uma nova configuração, com alteração do potencial biótico ou da

fertilidade. Quando essa nova configuração for prejudicial à produtividade da cultura, o gerenciamento deve ser no sentido de regenerá-lo.

Quando o produto agrícola precisa ser exportado, propõe-se que o agricultor precisa encontrar uma forma de recuperar esse elemento. Para isto é importante o conhecimento do ciclo biogeoquímico dos elementos exportados.

A configuração do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar, com localização das lavouras próximas às indústrias representa um cenário favorável à regeneração dos ciclos, em função das grandes massas a serem transportadas, tanto de cana para a indústria como de resíduos para o campo. Por outro lado, as indústrias processadoras de outros produtos agrícolas localizadas muito distantes das lavouras, enfrentam restrições para a regeneração de ciclos. E ainda incorrem em custos para evitar a poluição por seus resíduos, que, na verdade, muitos são fertilizantes potenciais. Portanto, a integração dos diversos componentes de uma cadeia produtiva pode corresponder a um processo de regeneração de ciclos biogeoquímicos.

3.1.5. **Sustentabilidade Cruzada nos Agroecossistemas**

Observando os conceitos de sustentabilidade sistêmica e insustentabilidade concatenada, apresentados pelo MMA (1999), na Agenda-21 brasileira, pode-se deduzir uma proposta de conceito de sustentabilidade concatenada ou sustentabilidade cruzada, em que, outros ecossistemas têm sua sustentabilidade integrada e recíproca ao agroecossistema. Alguns porque podem ser integrados artificialmente e outros porque realizam trocas de materiais. Por exemplo, ecossistema urbano emite fósforo, que pode ser absorvido pela agricultura no uso de adubo oriundo do tratamento de esgoto. Outro exemplo, a pecuária pode absorver potássio, enxofre e outros elementos, processados pela indústria da cana, na forma de melaço.

Trata-se de integração entre ecossistemas estabelecendo relações dinâmicas que criam condição de sustentabilidade, se possível, para os dois.

3.1.6. **Vias de Reciclagem**

Para operacionalizar o gerenciamento dos ciclos biogeoquímicos, permitindo a elaboração de modelos, bem como a determinação de modalidades de transportes e aplicação, foram definidas Vias de Reciclagem, ou Vias Biogeoquímicas. Pode-se propor como via de reciclagem "*o material que carrega os elementos em circulação, cujo estado físico vai determinar a modalidade de transporte e aplicação para a regeneração ou construção de um ciclo biogeoquímico. Seja como elemento de interesse principal, de interesse secundário ou apenas como indiferente à via".* A regeneração ou construção de um ciclo sustentável ocorrerá quando este tiver viabilidade econômica, social e ambiental. A viabilidade social ocorrerá quando o processo for reconhecido e aceito pela comunidade afetada.

Para o desenvolvimento e gerenciamento de ciclos sustentáveis, parece ser necessário identificar e gerenciar vias de reciclagens.

3.1.7. **Logística aplicada no sistema agro-industrial e sua relação com os ciclos biogeoquímicos.**

A reconstituição e o gerenciamento dos ciclos biogeoquímicos do agroecossistema da cana-de-açúcar fundamenta-se na integração entre a agricultura e a indústria. E essa integração é essencialmente logística, relacionando localizações, distâncias e vias de transporte de materiais. Tanto da cana - matéria prima - para a indústria; quanto de resíduos e efluentes, para o campo.

No sistema agroindustrial da cana-de-açúcar, o custo do transporte das grandes quantidades de matéria prima, tornou primária a necessidade da indústria ser localizada no centro da região de produção agrícola primária. Este cenário, de certa forma, induziu e facilitou a evolução do uso agrícola dos resíduos e efluentes da indústria. Por outro lado, os custos de transportes transferem valor para as terras a

menor distância da indústria, consequentemente promovem a intensificação no uso destas terras. Isto aumenta a pressão de ocupação sobre os outros ecossistemas e outras culturas. Tal que, um plano de uso de terras, adquire maior importância.

Para essas regiões, propõe-se um uso intensivo da terra, com uma clara definição e delimitação de áreas de reserva de biodiversidade, de áreas de preservação permanente (APPs), de áreas de infra-estrutura e da áreas de produção agrícola. Com uso intensivo do solo, em espaço e tempo, resultando em máxima produção a menores distâncias da unidade industrial, a verticalização da produção, facilitando a viabilidade do transporte da matéria prima e dos materiais emitidos para reciclo agrícola (Figura 8), inserido no que se denomina “Plano de Uso de Terras”. Isto contribui positivamente para a sustentabilidade ambiental e econômica do sistema de produção e cria recursos econômicos para a proteção de recursos naturais.

Este fenômeno, associado à necessidade de especialização para alta eficiência e competitividade, demandada pela sociedade, produziu a imagem de “mar-de-cana”, pois, nas regiões especializadas nesta atividade estabeleceu-se um domínio espacial da cultura da cana-de-açúcar, um caso de monocultura. Esse fenômeno, embora provoque uma aversão passional de parte da sociedade à cultura da cana-de-açúcar, é um componente positivo para a eficiência de uso da terra e regeneração de ciclos biogeoquímicos, resultando em ganho ambiental.

A verticalização da produção, como esforço para obtenção de altas produtividades, tem forte contribuição na integração indústria-campo e na viabilização da regeneração de ciclos biogeoquímicos. Alta produtividade permite atender à demanda de matéria prima a distâncias menores e, geralmente, distâncias menores implicam em facilidade logística.

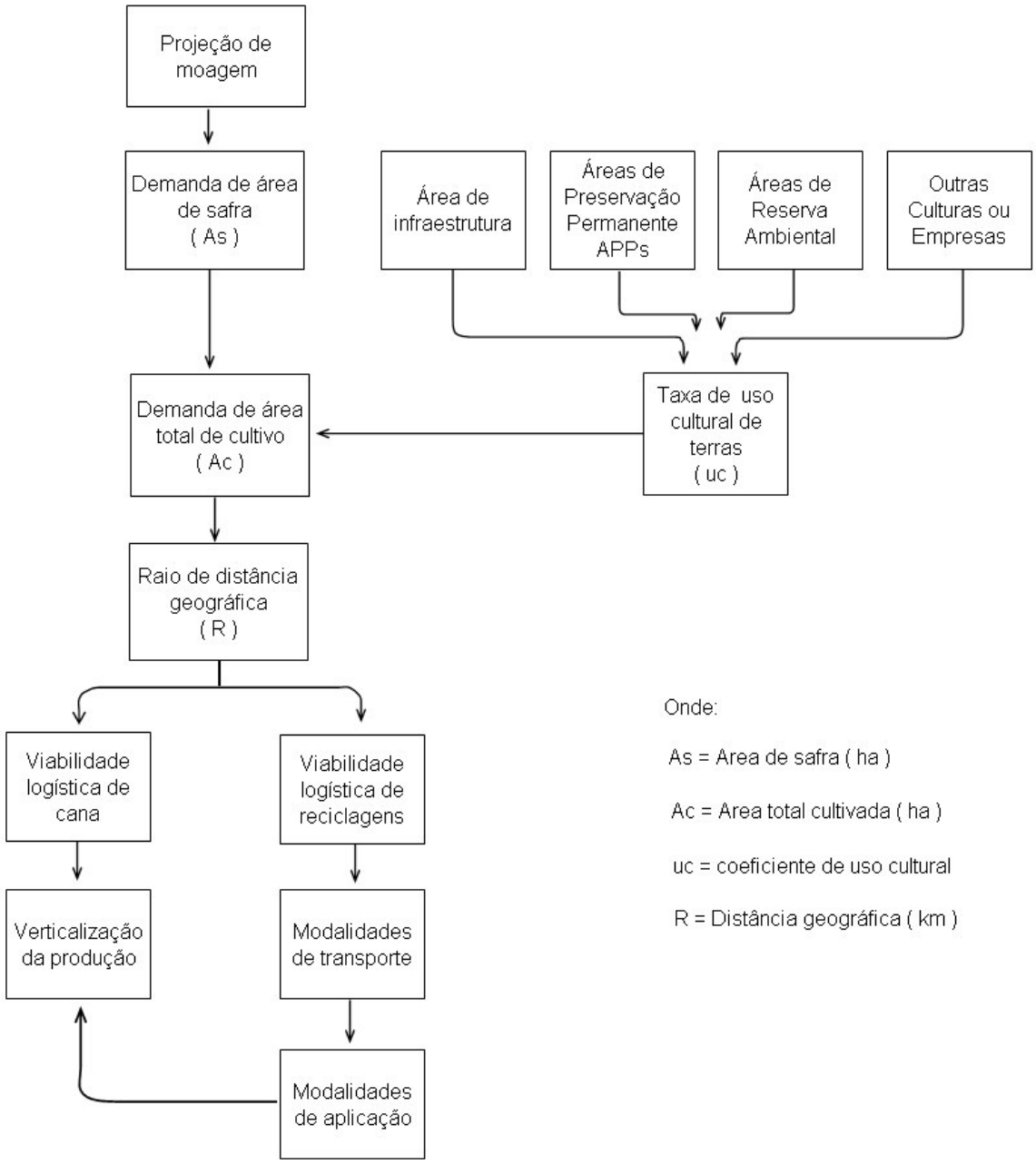


Figura 8. Modelo de estratégia de Uso de Terras e Vias de Reciclagens

.

3.1.8. **Uso cultural da terra e configuração do canavial**

A localização das áreas de produção concentrando-se ao redor da indústria contribui para a sustentabilidade dos agroecossistemas pela viabilização do funcionamento dos ciclos biogeoquímicos de praticamente todos os componentes da cana; exceto carbono, hidrogênio e oxigênio, que têm circulação geral na atmosfera.

Considerando que o desenho da ocupação das terras para a produção de cana é determinado pelo custo logístico da cana, dos resíduos, dos efluentes e da terra como fatores de produção, que atuam no sentido da concentração das áreas ao redor da indústria; e da ocupação de terras por outras culturas, outras empresas, por áreas de reservas ambientais etc, que atuam no sentido de dispersão das áreas. A partir de um determinado raio de distância geográfica da indústria podemos circunscrever uma área total (At) e deduzir um coeficiente de uso da terra para a cultura, que passamos a denominar como uso cultural (uc). Definidos por:

$$At = \pi \cdot (10\,R)^2 \qquad (1)$$

$$uc = \frac{Ac}{At} \qquad (2)$$

$$Ac = uc \cdot \pi \cdot (10\,R)^2 \qquad (3)$$

$$R = \sqrt{\frac{At}{\pi \cdot uc}} \qquad (4)$$

Onde:

At = área total circunscrita (ha).

R = raio geográfico (km).

10 = fator de correção para expressão em hectare.

uc = coeficiente de uso cultural ($ha.ha^{-1}$).

Ac = área da cultura (ha).

Para configurar e dimensionar a área de cultivo mediante uma demanda de produção, pode-se partir da observação de que as áreas anuais de cultivo podem ser representadas por:

$$Ac = As + Af + Av \qquad (5)$$

$$Af = \frac{Ac}{L + 1} - Aa \qquad (6)$$

Onde:

Ac = área cultivada (ha)

As = área de safra (ha)

Af = área em formação como plantio-de-ano-e-meio (ha)

Av = área de viveiros (ha)

Aa = área de plantio de cana-de-ano (ha)

L = longevidade do canavial = número de cortes.

Substituindo (6) em (5) e desenvolvendo a equação, tem-se:

$$Ac = \frac{(L + 1) \cdot (As - Aa + Av)}{L}$$

ou

$$As = \frac{Ac \cdot L}{L + 1} + Aa - Av$$

Desenvolvendo a equação (5) e considerando o conceito de produtividade, tem-se:

$$Ac = As + Af + Av \qquad (5)$$

$$As = Ac - Af - Av \qquad (7)$$

$$P = p \cdot As \qquad (8)$$

Onde:

P = produção (t)

p = produtividade ($t.ha^{-1}$).

Substituindo (7) em (8) e desenvolvendo a equação a partir das anteriores, tem-se:

$$P = p \left(uc. \pi . (10\,R)^2 - \frac{v + 1}{v} \frac{uc. \pi . (10\,R)^2}{L + 1} + \frac{v - 1}{v} Aa \right)$$

Onde:

v = taxa de multiplicação dos viveiros.

Essa equação, adotada como modelo matemático, denominou-se “equação de configuração do canavial”, será utilizada como ferramenta para a simulação de cenários e de estratégias de manejo do canavial. Representa as relações entre os componentes fundamentais do uso e ocupação da terra.

3.1.9. **Produtividade Total**

É a produtividade, expressa em produção por unidade de área e unidade de tempo, obtida pela relação entre produção total e área total cultivada, considerando o ciclo fenológico anual. Também pode ser denominada “produtividade por área total cultivada”. Ou seja, expressa a produtividade em:

$$\mathbf{t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}}$$

Que indica:

$$\mathbf{biomassa \cdot área^{-1} \cdot tempo^{-1}}$$

É proposta como expressão adequada para a eficiência de uso de terra como “área de captura de energia solar”, importante indicador para o gerenciamento da sustentabilidade.

Como exemplo de aplicação destes conceitos e equações são apresentados na Tabela 7, os cenários A, B e C, sobre os quais se sugere atenção aos valores de produção e coeficiente de uso da terra. As distâncias adotadas são reconhecidas como altamente viáveis para o transporte da produção e permitem, com as tecnologias atualmente disponíveis e de uso comum, viabilizar o uso pleno dos efluentes e

resíduos. Mesmo sem a utilização da vinhaça concentrada. Enquanto os coeficientes de uso cultural indicam, respectivamente, uma ocupação de 60%, 50% e 32% da área, que significa disponibilidade de áreas para outras atividades e preservação ambiental. Essa modelagem permite o gerenciamento da configuração do canavial para a viabilização de um equilíbrio de manejo e sustentabilidade.

Tabela 7. Exemplos de configuração de canavial em 3 cenários (A, B e C)

Cenários	A	B	C	
Produtividade de área de safra.	110,0	100,0	94,0	$t\ ha^{-1}$
Coeficiente de uso cultural.....	0,60	0,50	0,32	$ha\ ha^{-1}$
Distância geográfica.....	9	14	25	km
Taxa de viveiros.....	7	7	7	$ha\ ha^{-1}$
Longevidade.....	7	6	5	cortes
Área de cana-de-ano.....	900	1.200	3.300	ha
Área cultivada.....	15.268	30.787	62.830	ha
Área total de circunscrita.....	25.446	61.573	196.344	ha
Produção.....	1.524.382	2.678.887	5.046.950	t
Produtividade total.....	99,8	87,0	80,3	$t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A elaboração de modelos para o gerenciamento dos ciclos biogeoquímicos propostos tem por base a aplicação dos conceitos apresentados.

4.1. Identificação e Descrição das Principais Vias Biogeoquímicas

Um aspecto marcante da caracterização dessas vias é a grande variabilidade de composição dos resíduos e efluentes (SOUZA, 2006). Certamente devido à diversidade de ambientes, de equipamentos, de processos e de produtos. Essa variabilidade observa-se entre as unidades industriais e ao longo do tempo, ou seja, é uma variação local e temporal, indicando que a aplicação de qualquer modelo exige que sejam utilizados dados coletados nas condições específicas de uso. Ou mesmo para diagnosticar eventual alteração ou ajuste de processo.

4.1.1. **Açúcar e Álcool**

Açúcar e álcool são produtos usuais exportados do sistema. Seus principais constituintes, carbono, hidrogênio e oxigênio, não representam perdas para o agro-ecossistema por serem reciclados pela circulação geral na atmosfera, na forma de gás e água, enquanto o seu conteúdo de N, P, K, Ca, Mg e S, representa perda de elementos do ecossistema agroindustrial. Na Tabela 8 são apresentados teores desses elementos nos materiais utilizados nesta modelagem.

Para a sustentabilidade do sistema é recomendável observar as quantidades exportadas desses elementos e averiguar a necessidade de reposição. Essa reposição pode ser operada por regeneração de ciclos ou por sustentabilidade cruzada (ciclos cruzados). Por regeneração de ciclos seria através do rastreamento e

recuperação desses elementos. Por exemplo, se o melaço é utilizado em uma destilaria não anexa, pode ser recuperada a vinhaça lá produzida. Por outro lado, se o melaço é utilizado em ração animal, pode ser recuperado na forma de esterco. Na medida em que essa recuperação vai se distanciando, torna-se mais viável a adoção de ciclos cruzados. Ou seja, procurar outro sistema, que tenha logística ou distância viável, tenha esses elementos disponíveis e viabilize a aquisição. Esse procedimento pode contribuir para a sustentabilidade dos dois sistemas, o primeiro porque apresentava deficiência do elemento e o segundo porque apresentava excedente.

Tabela 8. Teores de macronutrientes encontrados nos materiais utilizados na modelagem.

Material		Nitrogênio total	Fósforo (P_2O_5)	Potássio (K_2O)	Cálcio (CaO)	Magnésio (MgO)	Enxofre (S)
Açúcar branco	kg t^{-1}	0,070	0,001	0,094	0,139	0,087	0,106
Álcool	kg m^{-3}	0,000	0,000	0,009	0,003	0,002	0,000
Águas residuárias	kg m^{-3}	0,028	0,015	0,407	0,420	0,315	0,144
Torta de filtro	kg t^{-1}	5,170	4,646	1,489	5,402	1,400	0,685
Vinhaça	kg m^{-3}	0,632	0,108	3,792	0,594	0,400	0,797
Fuligem	kg t^{-1}	0,222	0,494	0,726	0,423	0,284	0,958
Barros	kg t^{-1}	0,478	0,115	3,437	0,577	0,413	0,795

4.1.2. **Vinhaça**

A vinhaça natural pode ser descrita como efluente residual da desalcoolização do vinho obtido da fermentação do caldo de cana. Sua composição é função de ser via preferencial para elementos mais solúveis do caldo, que não são separados no processo de clarificação do caldo. Pode conter elementos oriundos do desgaste por corrosão ou abrasão de equipamentos industriais e de insumos aplicados ao processo.

Nos ciclos biogeoquímicos agro-industriais da cana-de-açúcar, a vinhaça é via preferencial para elementos em formas solúveis do caldo. Elementos em suspensão no caldo são separados nos processos de decantação e filtrações, sendo conduzidos para vias de resíduos sólidos.

As pesquisas realizadas e o estado atual dos locais de aplicação de vinhaça, fornecem evidências que consolidam suficientemente seu conceito como importante fator de contribuição para a sustentabilidade do agroecossistema da cana-de-açúcar.

a. Seu uso apresenta viabilidade econômica como substituto de adubos minerais. Esse conceito é consolidado por um grande número de trabalhos (MENESES et al,1984; LEME et al, 1987; GERALDI FILHO et al,1988; MATIOLI, 1989; BARBOSA, 2006; e outros). Atualmente, análise de viabilidade econômica de projetos de uso de vinhaça é uma prática rotineira nas empresas.

b. Sua viabilidade econômica motiva os empreendimentos no uso e o cumprimento à legislação, particularmente a Norma Técnica CETESB nº 4.231.

c. Os resultados de produção agrícola, confirmando os resultados obtidos pela pesquisa, foram fortes atrativos para os agricultores.

d. A melhoria da fertilidade observada pelos agricultores, também confirmando os resultados da pesquisa, e agregou valor às terras.

e. O ganho de produtividade obtido nas áreas de uso, com aumento de produção a menores distâncias da indústria, contribui para a redução do custo de transporte e outros benefícios indiretos.

f. As áreas de sumidouro, também conhecidas como áreas de sacrifício foram eliminadas.

g. O estado físico da vinhaça, com o uso de materiais resistentes à corrosão, facilita a viabilização de transportes e aplicação.

Portanto, o uso agrícola da vinhaça é uma prática consolidada.

4.1.3. **Vinhaça Concentrada**

A Cia Energética Santa Elisa, em Sertãozinho-SP, tem uma concentradora produzindo anualmente cerca de 19.000 m^3, beneficiando uma área de aproximadamente 4.200 ha, como fertilizante. Do ponto de vista do ciclo biogeoquímico, a comercialização e transporte da vinhaça concentrada para outros sistemas, corresponderia a uma exportação de nutrientes com ruptura do ciclo. Requerendo uma solução para a o suprimento dos nutrientes exportados. Enquanto seu uso como fertilizante na área de produção de cana-de-açúcar, viabiliza seu transporte para uso em locais mais distantes, sendo, nas condições atuais, viável até cerca de 100 km (BARBOSA, 2005).

4.1.4. **Águas Residuárias**

Denominam-se como águas residuárias a mistura de todas as águas não servíveis efluentes dos processos industriais, após sucessivos reusos. As características e a composição dessas águas são bastante variáveis entre as indústrias e também durante a safra, pois depende dos processos e dos equipamentos e mesmo de eventos isolados, uma vez que reúne águas de origens muito diversas.

A modelagem proposta considera:

a. Que todas as águas residuárias são utilizadas na fertirrigação, não havendo qualquer lançamento em curso d'água ou em lagoa de estabilização.

b. A água captada não é considerada como consumo industrial, mas sim como via biogeoquímica.

c. Como via biogeoquímica, da indústria para o campo, as águas residuárias têm alta viabilidade de transporte e aplicação.

d. Após cumprir diversas funções físicas e químicas no processo industrial, e ao longo desse processo é enriquecida por elementos químicos, são carreadas para o campo.

e. Tendo sua composição muito variável, é importante que sejam realizadas análises químicas para triagem e dosagens de nutrientes no campo.

f. Sua análise química deve ser voltada para caracterização tendo em vista seu uso no solo. Tal que os parâmetros estabelecidos pela Resolução CONAMA 357, não são muito adequados para esta aplicação.

g. Deve ser realizado controle interno ao processo industrial para gerenciar consumo de energia, dimensionamento de equipamentos e perdas de açúcares ou álcool.

h. Por precaução, deve ser realizado monitoramento para detectar eventual presença de microrganismos patogênicos e seu conteúdo de metais pesados, ou outros elementos que possam implicar em risco para a saúde dos operadores ou para o meio ambiente.

A fertirrigação com uso de águas residuárias no sistema agro-industrial da cana-de-açúcar, do ponto de vista logístico, tem uma dimensão estratégica para a verticalização da produção e uso ou reuso de recursos naturais. A água captada, somada à água vegetal condensada, é utilizada em diversos processos, recebe substâncias não-açúcares da matéria prima e é devolvida ao campo. O processo de fabricação de açúcar, de modo simplista, consiste em separar o açúcar do caldo. Para isto, todas as substâncias não-açúcares são transferidas para as águas residuárias, para a torta-de-filtro ou para a vinhaça. Desta maneira, esses efluentes ou resíduos são vias de separação e transporte dessas substâncias indesejáveis àquela fase do processo. Neste cenário, a adução e uso de águas residuárias significa um meio de transporte muito econômico para essas substâncias, que separadas dessa água, como sólidos, exigiria transporte rodoviário, de maior custo ambiental. Considerando o valor da água como recurso natural, esse meio de transporte pode parecer de alto

impacto, porém, deve ser observado que sua aplicação na lavoura é uma irrigação, que proporciona umidade ao solo e recarga de mananciais. Equivale a captação para irrigação e, antes de usá-la, enriquecê-la com nutrientes no processo industrial. Deste ponto de vista, a água é um meio de transporte. de solutos ou sólidos em suspensão que foram separados do açúcar no processo.

O uso intensivo dessa água residuária tem ainda uma importante função na estratégia de uso de terras como fator de viabilização do plantio de cana-de-ano, durante a estação seca. Na região Sudeste do Brasil, denominada cana-de-inverno. Isto resulta em ganho de eficiência de uso da terra, da água, de transportes e de inúmeros fatores envolvidos.

4.1.5. **Torta de Filtro**

A torta-de-filtro é o resíduo sólido retido na filtragem do lodo decantado no processo de preparo do caldo de cana. De modo geral é rico em componentes decantados no processo de preparo do caldo.

A composição da torta-de-filtro, principalmente seu conteúdo de fósforo e cálcio são oriundos do estado nutricional da cana processada e da dosagem de cal e de ácido fosfórico durante o processo de clarificação. Quando está sendo produzido açúcar de menor cor, a dosagem de ácido fosfórico é maior. Por ser o fósforo um elemento bastante estável neste sistema, essa variação reflete diretamente no teor de fósforo da torta-de-filtro. Devido ao elevado custo do ácido fosfórico, a sua dosagem é apenas a mínima necessária para a clarificação desejada.

Sua aplicação no campo tem sido de duas maneiras: no fundo do sulco de plantio, em dose equivalente à adubação fosfatada de sulco; ou aplicada em área total e em seguida incorporada ao solo por gradagem, correspondendo a um corretivo. Sua aplicação na soqueira, embora bastante favorável à operação, tem resultado em redução da produtividade da soqueira.

Para a elaboração desta modelagem foi considerado:

a. As características da torta-de-filtro, para seu uso no solo, não exigem qualquer tratamento.

b. A prática da secagem da torta-de-filtro se justifica para a redução da massa a ser transportada para o campo, reduzindo o custo de transporte e melhorando sua fluidez para a aplicação.

c. A perda de carbono promovida pela aeração, quando esta é por aeração e tempo de exposição, por um lado reduz o custo de transporte relativo ao maior conteúdo de nutrientes, por outro lado promove perda de carbono orgânico.

d. A compostagem da torta-de-filtro, misturando-a com a fuligem ou bagaço, resulta em redução dos teores de nutrientes pelo efeito de diluição. Esta redução ou aumento de volume precisa ser contabilizado na logística e estratégia de uso.

4.1.6. **Fuligem**

A fuligem é o material particulado capturado pelo lavador de gazes de chaminé, normalmente instalado com objetivo de controle de poluição em caldeiras de queima de bagaço. A lavagem é via úmida, sendo a fuligem separada da água por decantação e filtragem. A quantidade produzida e sua constituição são bastante variáveis, dependendo das caldeiras, dos separadores e da operação. Seus principais componentes são silício e potássio, contém quantidades menores de nitrogênio, cálcio, magnésio e fósforo. Análise realizada na Companhia Energética Santa Elisa, em 2006, apresentou teores relativamente altos de molibdênio, isto, adequadamente gerenciado, pode valorizar seu uso. Uma característica interessante é a baixa solubilidade desses nutrientes, por estarem oclusos em sílica fundida durante a queima, podendo isto ser vantajoso devido à liberação lenta favorável para a disponibilização à planta (GLÓRIA et al, 1993). Seu conteúdo de nitrogênio permite

considerar a hipótese de que tenha absorvido elementos dos gases emitidos pela caldeira.

Uma alternativa recomendada para a ciclagem desse material é na fertilização de soqueira considerando o potássio como elemento chave.

4.1.7. **Barros de decantadores de águas residuádias**

Os barros são produzidos nos decantadores de águas residuárias, Com objetivo de reduzir a carga de sólidos em suspensão na água para reduzir os custos com equipamentos de bombeamento, adução e aspersão dessas águas. Pode-se presumir que se existissem equipamentos aptos para transporte e aplicação da água com a carga de sólidos em suspensão, a decantação e toda a operação de carregamento e transporte seriam dispensadas. Neste caso, a aplicação seria adequada às características físicas e químicas desse material.

Sendo as águas residuárias oriundas dos descartes dos circuitos de lavagem de cana, lavador de gases de chaminés e da lavagem de cinzeiros de caldeiras, sua composição é rica em areia separada do solo removido na lavagem de cana, é rica em cinzas e fuligem da lavagem dos cinzeiros e chaminés. Isto resulta em material bastante heterogêneo.

4.1.8. **Palha**

A colheita sem queima, que normalmente recolhe apenas os colmos, deixa sobre o terreno uma quantidade de palha de aproximadamente 25 $ton.ha^{-1}$ de biomassa, correspondente a cerca de 12 $ton.ha^{-1}$ de matéria seca. Porém, como este material é disposto no solo simultaneamente à colheita e, como em um ecossistema natural, aí mesmo sofre a decomposição e seus componentes circulam no agroecossistema, a ciclagem da palha será disposta nos modelos, mas não serão desenvolvidos cálculos.

Em caso de uso da palha para geração de energia, conforme apresentada por RÍPOLI & RÍPOLI (2004), seja por colheita integral ou por recolhimento do palhiço, os constituintes desse material devem ser contabilizados como elementos exportados do campo e devem ser identificadas as suas vias de reciclagem. Provavelmente seus componentes, após a combustão, seguirão 3 vias:

a. Perdas nas emissões atmosféricas, como gás ou partículas;

b. Reciclagem para o campo com as águas residuárias, de lavagem de cinzas ou de lavagem de gases; e

c. Reciclagem pela fuligem recolhidas nos sistemas de lavagem de gases nas chaminés.

Neste caso, após a identificação das vias, essas deverão ser gerenciadas para o retorno desses elementos ao campo. Neste processo, não haverá ruptura dos ciclos, uma vez que apenas a energia elétrica será exportada e os demais elementos serão mantidos no sistema, princípio da sustentabilidade dos ecossistemas..

A palha, como cobertura do terreno, mesmo em menor quantidade deixada pela colheita para geração de energia, tem funções bastante relevantes nos ciclos biogeoquímicos, Na proteção do solo contra o impacto de gotas e no impedimento ao arraste de solo reduz a perda de solo e de elementos, conservando os elementos no agroecossistema, princípio da sustentabilidade dos ecossistemas.

HARDOIM (2001), tratando das destinações para os resíduos agrícolas, entre eles o uso como fonte de energia, como alimentação animal e, como a menos nobre, a proteção do solo, como reposição de nutrientes e manejo de pragas. E afirma que a economicidade do aproveitamento indicará a destinação do produto que poderá até mesmo não ter uso comercial.

4.1.9. As perdas de elementos do agroecossistema da cana-de-açúcar

As perdas de elementos químicos do sistema agroindustrial da cana não têm sido avaliadas ou estimadas, seja pela falta de uma visão sistêmica ou pela falta de informações ou métodos. Perdas percebidas por minoração de valores ao longo das vias biogeoquímicas, sem uma determinação analítica direta, podem ser denominadas "perdas indeterminadas". Por outro lado, pode-se inferir que essas perdas ocorrem principalmente por:

a. Emissões gasosas na indústria;
b. Arraste de solo nos processos erosivos;
c. Carregamento de nutrientes solúveis em fluxos de águas, como enxurrada;
d. Lixiviação no solo para fora do alcance das raízes; e
e. Comercialização e exportação de produtos contendo nutrientes, exceto C, H, O.

4.2. Considerações sobre Metais Pesados

A ocorrência de metais pesados nos resíduos da agroindústria da cana-de-açúcar pressupõe-se que sejam decorrentes do desgaste de equipamentos metálicos, por corrosão ou por abrasão. Pode também acorrer entrada de metais como contaminantes em insumos como a cal e o enxofre. A presença de alguns metais na matéria prima, a cana, ocorre, pois são nutrientes essenciais da planta. Porém, em quantidades pressupostamente insuficientes para alcançar níveis de risco.

Para subsidiar a elaboração desta modelagem, foram utilizados dados de composição de resíduos da fabricação de açúcar e álcool da Cia Energética Santa Elisa, em Sertãozinho-SP. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 10. Como referência, foram adotados os limites aceitáveis pela Environmental Protection Agency (EPA), dos EUA, em regulamentação de 1982 (CARVALHO & CARVALHO, 2001). Considerando as doses anuais de resíduos, normalmente utilizadas, verifica-se

Tabela 10. Quantidades de metais pesados encontrados nos resíduos, taxas de aplicação utilizadas e um *sinal* de conformidade em relação aos limites anuais recomendados pela USEPA – U.S. Environmental Protection Agency (CARVALHO & CARVALHO, 2001).

Elemento	Limite anual USEPA	Vinhaça			Água Residuária			Barro (Lodo)			Torta-de-filtro			Fuligem		
Dosagem do resíduo			200 $m^3.ha^{-1}$			800 $m^3.ha^{-1}$			200 $t.ha^{-1}$			25 $t^3.ha^{-1}$			100 $t^3.ha^{-1}$	
	$kg.ha^{-1}.ano^{-1}$	Conteúdo $mg.dm^{-3}$	Dosagem $kg.ha^{-3}$	Sinal	Conteúdo $mg.dm^{-3}$	Dosagem $kg.ha^{-3}$	Sinal	Conteúdo $mg.kg^{-1}$	Dosagem $kg.ha^{-3}$	Sinal	Conteúdo $mg.kg^{-1}$	Dosagem $kg.ha^{-3}$	Sinal	Conteúdo $mg.kg^{-1}$	Dosagem $kg.ha^{-3}$	Sinal
Arsênico	2,000	0,001	0,000	sim	0,001	0,001	sim			nd			nd			nd
Cádmio	1,900	0,010	0,002	sim	0,030	0,024	sim	1,104	0,221	sim	0,969	0,024	sim	3,112	0,311	sim
Cromo	150,000	0,010	0,002	sim	0,010	0,008	sim	50,003	10,001	sim	23,752	0,594	sim	12,347	1,235	sim
Cobre	75,000	0,530	0,106	sim	0,350	0,280	sim	38,279	7,656	sim	46,474	1,162	sim	45,605	4,561	sim
Chumbo	15,000	0,010	0,002	sim	0,010	0,008	sim	44,486	8,897	sim	45,262	1,132	sim	39,868	3,987	sim
Mercúrio	0,850	0,003	0,001	sim	0,000	0,000	sim	0,635	0,127	sim	0,527	0,013	sim	0,7	0,070	sim
Molibdênio	0,900		-	nd		-	nd	3,242	0,648	sim	10,301	0,258	sim	23,143	2,314	não
Níguel	21,000	0,212	0,042	sim	0,250	0,200	sim	11,242	2,248	sim	8,240	0,206	sim	15,364	1,536	sim
Selênio	5,000		-	nd		-	nd	traços	traços	sim	traços	traços	sim	traços	traços	sim
Zinco	140,000	0,050	0,010	sim	0,041	0,033	sim	46,417	9,283	sim	95,250	2,381	sim	46,772	4,677	sim

nd: não determinado

que, com exceção do molibdênio para aquela dose de Fuligem, todos os demais elementos têm suas taxas dentro dos limites aceitáveis.

Sendo e conteúdo desses componentes variáveis em função dos equipamentos, matéria prima, insumos e processos, é recomendável que, para cada caso, sejam realizadas amostragens compostas ou pontuais, de modo a obter melhor representatividade e diagnóstico.

Para o gerenciamento da presença de metais pesados nos ciclos biogeoquímicos do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar, é recomendável o monitoramento de sua ocorrência nos resíduos, por amostragens adequadas e, caso excedam limites aceitáveis, sejam diagnosticadas as origens e adotadas ações corretivas. Uma prática que vêm ocorrendo é a substituição de equipamentos metálicos por plásticos ou por metais mais adequados.

4.3. Modelo Conceitual

O modelo conceitual ou modelo qualitativo do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar, do ponto de vista dos ciclos biogeoquímicos foi elaborado com base no processo utilizado na Cia Energética Santa Elisa, empresa agroindustrial produtora de cana-de-açúcar, açúcar, álcool e energia elétrica, localizada em Sertãozinho-SP-Brasil. É apresentado na forma de fluxograma (Figura 9), representando os compartimentos e as vias, que foram denominadas vias biogeoquímicas.

Neste fluxograma das vias biogeoquímicas foram incluídos a cana colhida, a captação de água, o uso da água vegetal – aquela condensada dos vapores emitidos nos diversos processos de concentração de caldo de cana - , o reuso de águas, especialmente as de lavagem de gases de chaminé, e as produções de águas residuárias, barro decantado, fuligem, torta-de-filtro e vinhaça.

Ao trabalhar na elaboração do modelo, pode-se perceber a utilidade da modelagem para a percepção e identificação de componentes do sistema, particularmente nas relações de causa e efeito.

Notadamente, a principal contribuição da modelagem é estabelecer uma visão sistêmica, de forma que, conforme sugerido por DOURADO-NETO et al. (1998), o modelo possa dar uma direção estratégica para o desenvolvimento e adoção de tecnologias. Para isto, a partir dos conceitos e premissas apresentados, propõe-se o modelo geral das vias biogeoquímicas, apresentado na Figura 9.

Observa-se neste modelo, que praticamente todos os compartimentos e vias têm alguma quantidade de todos os nutrientes, isto justifica o acompanhamento dos elementos, em suas diversas formas, por essas vias, para que sejam contabilizados e gerenciados. Pode ser deduzido que a modelagem e gerenciamento tornam-se prática e adequada quando se trabalha com as vias biogeoquímicas. Enquanto, por outro lado, trabalhar com o ciclo de cada elemento parece que tornar-se-ia confuso e de difícil operacionalização.

No modelo geral das vias biogeoquímicas (Figura 9) a palha residual da colheita é imediatamente devolvida ao solo, exceção deve ocorrer nos casos de colheita da palha. No circuito de lavagem de cana, a água é tratada com cal, isto é uma entrada de insumo que resulta em incremento de Ca e Mg no ciclo. O lodo e a água descartada no circuito de lavagem de cana, inservível, são conduzidos para os tanques de decantação. A cana é processada e o bagaço conduzido às caldeiras.

Na combustão ocorrem perdas atmosféricas de nitrogênio e enxofre em estado gasoso e dos demais nutrientes na forma de partículas. O processo de lavagem de gases tem uma relativa eficiência na função de adequar as emissões aos padrões aceitos pelas agencias de controle de poluição, entretanto, carecem de quantificação e gerenciamento como perdas. Por outro lado, o efluente desse sistema, tendo absorvido partículas e, possivelmente, gases, tem a função de resgatar esses

nutrientes, mantendo-os no ecossistema agroindustrial. Essa água passa por um sistema de separação que produz a fuligem retida e a água residuária.

A fuligem tem características que permitem seu transporte e aplicação direta no campo. Quando seca, produz uma grande quantidade de poeira que, além de insalubre, prejudica a operação. Por isso, preferivelmente, é distribuída no campo enquanto ainda úmida. A água utilizada neste processo tem reduzido impacto na demanda de água pela indústria porque utiliza águas inservíveis de outros processos.

Por outra via, o caldo, no processo de preparo, recebe enxofre, cal e ácido fosfórico, que introduzem diversos elementos no sistema, principalmente S, Ca, Mg e P. Esses elementos normalmente contribuem significativamente para o aumento do potencial biótico dos ecossistemas agroindustriais. Existe risco desses insumos conterem substâncias contaminantes, como metais pesados, que podem ser nocivos, dependendo das quantidades, e que deve ser gerenciados.

Nesta etapa do processo, o caldo é filtrado produzindo a torta-de-filtro. Existem diversas alternativas de tratamentos para a torta, mas, em geral, esses tratamentos visam reduzir seu peso para reduzir custo de transporte. Para seu uso como fertilizante, a torta-de-filtro não exige nenhum tratamento.

Na fabricação do açúcar existem grandes volumes de água envolvidos nos aparelhos de vácuo e resfriamentos, que são reutilizadas, e na limpeza industrial, que é conduzida para as residuárias. Neste processo de concentração e cozimento do caldo, ocorre a evaporação e condensação da água, denominada água vegetal. Essa água corresponde a cerca de 60% da massa total de cana e é utilizada em diversos processos.

Na fabricação do açúcar é separado o mel residual, com considerável teor de sais, principalmente potássio. Esse mel tem sido um ponto crítico nos ciclos bogeoquímicos da cana. Quando ele é conduzido para a fabricação de álcool, seus constituintes vão para a vinhaça e são mantidos no ecossistema agroindustrial. Quando é comercializado e exportado, representa uma ruptura com perda de

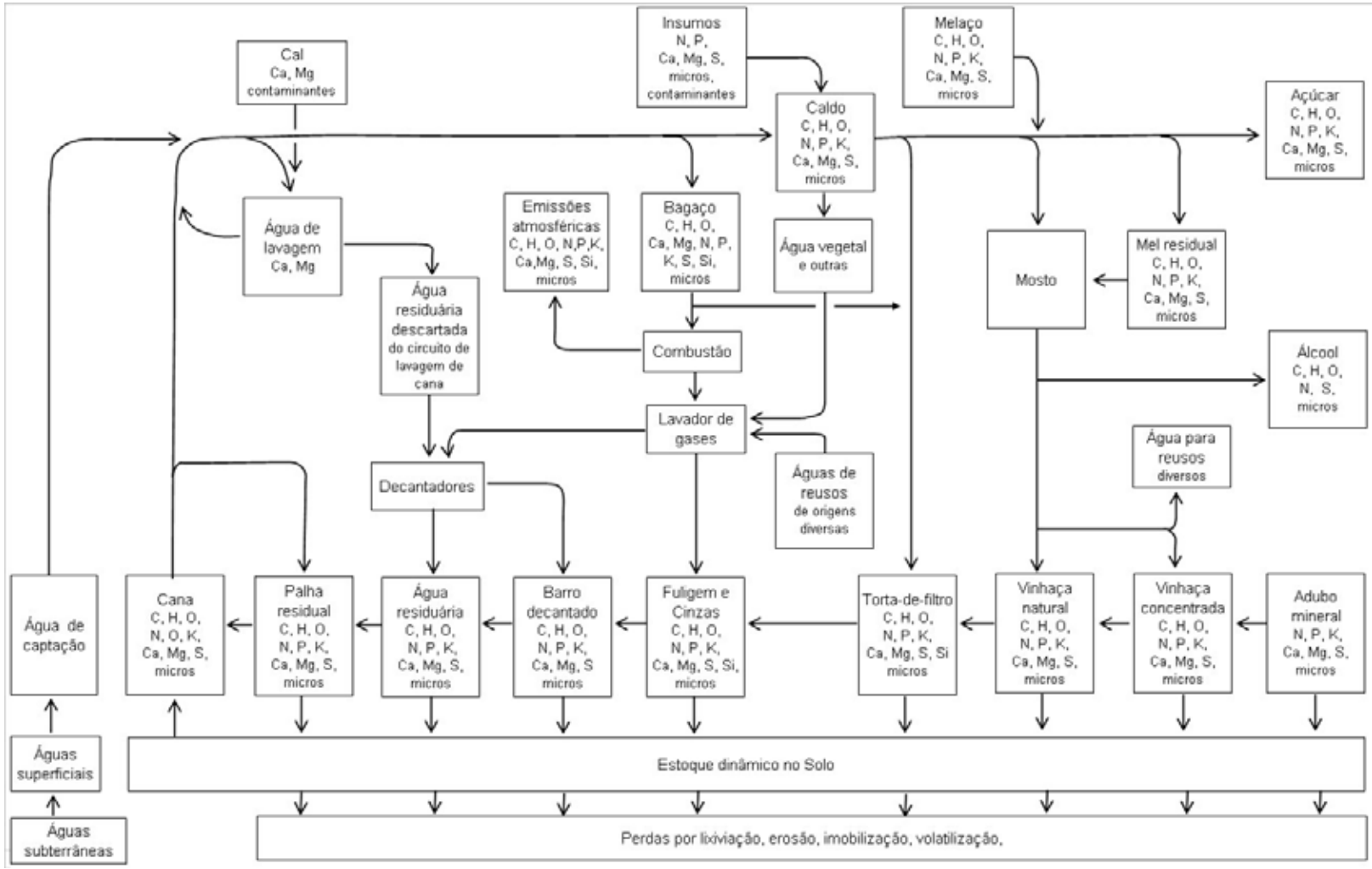


Figura 9. Modelo geral das vias biogeoquímicas no sistema agroindustrial da cana-de-açúcar sem queima na colheita.

elementos. Quando é adquirido para a fabricação de álcool, representa uma entrada de elementos e vai enriquecer o ecossistema.

Na fabricação do álcool, a partir de caldo ou de mel residual, a fermentação, eventualmente, exige adição de nutrientes, principalmente nitrogênio, que representa uma entrada no sistema. Após a fermentação, é produzida a vinhaça, rica em nutrientes porque, de certa forma, é o próprio caldo tendo sofrido a fermentação e a retirada do álcool na destilação. O teor de nutrientes na vinhaça depende do teor de nutrientes do caldo em relação ao teor de açúcares. Quando se utiliza mel residual, tendo já retirado açúcar, apresenta um maior teor relativo de sais, principalmente potássio, enquanto a diluição do mosto é determinada pelo teor de açúcar, isto resulta em vinhaça com maior concentração de sais.

A vinhaça concentrada é produzida atualmente pela simples retirada de água da vinhaça natural, por evaporação, preservando as mesmas quantidades totais de nutrientes a serem ciclados. E a água evaporada é condensada e reutilizada.

As referências da literatura fazem entender que os elementos retornados ao campo por essas vias, em suas diversas formas e reações, vão se incorporar à dinâmica biogeoquímica do solo. Esses elementos serão retidos e disponibilizados conforme o funcionamento de seu ciclo.

Na modelagem da via dos efluentes líquidos (Figura 10) a água natural, captada, juntamente com a vegetal condensada no processo, fazem a reposição nos diversos circuitos dentro da indústria. Uma parte da água captada pode ser incorporada direta às águas residuárias efluentes da indústria e, associadas, serem transferidas para o campo. Neste sistema de distribuição, as águas residuárias podem receber doses de vinhaça adequadas para um balanço de nutrientes para atender a necessidade recomendada para os locais de aplicação. Neste caso, de certa forma, a água residuária teria uma função de transporte da vinhaça. Por outro lado, a vinhaça natural pura, poderia ser conduzida para um sistema de transporte por caminhão e para um sistema de distribuição por adutoras e canais, conforme o desenho particular

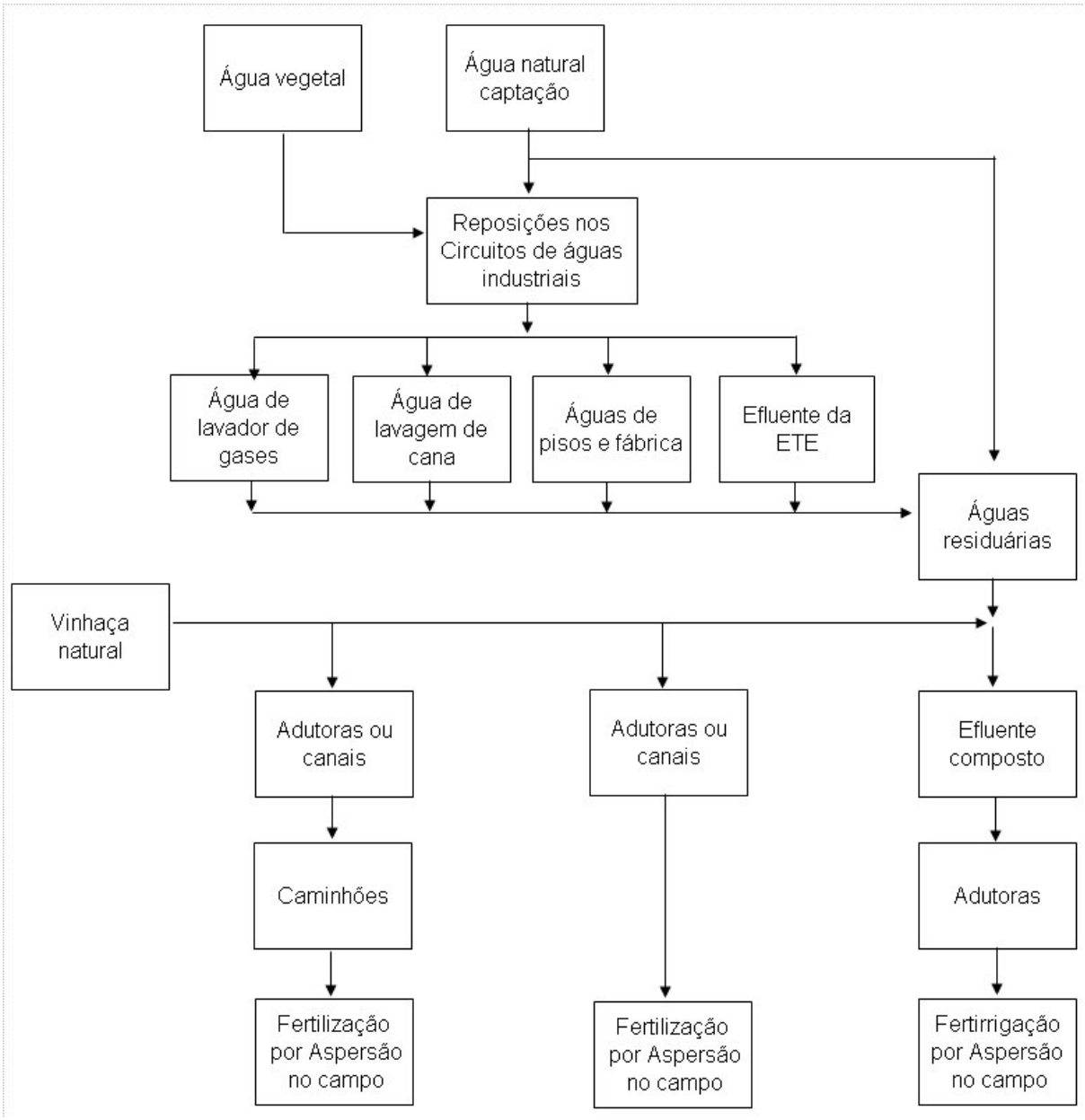


Figura 10. Modelo da via de uso dos efluentes líquidos.

das terras. Mediante a diversidade de condições geográficas, estruturais e ocorrências momentâneas, nas agroindústrias, os modelos devem ter flexibilidade para permitir muitas combinações de transportes, aplicação e misturas de efluentes.

Os resíduos sólidos têm vias bastante simplificadas (Figura 11) devido à facilidade de armazenamento e de transporte. Por outro lado, oferece dificuldades para misturas, que exige equipamentos especializados, com elevado consumo de energia. A torta-de-filtro pode ser transportada e aplicada direta ao campo, sem qualquer tratamento. Ou pode ser disposta em pátio aberto para simples armazenamento ou para processos de simples secagem ou compostagem em misturas com fuligem, bagaço ou outros materiais. Para o funcionamento do ciclo biogeoquímico, sua dinâmica no solo e disponibilização de nutrientes para as plantas, a torta-de-filtro não requer qualquer tratamento, e os processos de decomposição e mineralização podem ocorrer no solo. Entre seus constituintes, o nitrogênio tem ciclo mais complexo, será imobilizado rapidamente por microrganismos no solo, possivelmente devido ao carbono prontamente disponível, tal que, cana-soca, que demanda nitrogênio no início do ciclo, tem resposta negativa ao uso de torta-de-filtro. Enquanto a cana-planta obtém altas produtividades, mas ainda assim, pode responder a doses suplementares de N. O uso continuado certamente incrementa a biomassa microbiana do solo, melhorando a capacidade de retenção do solo e a disponibilidade de todos os nutrientes.

Os tratamentos que visam reduzir a massa de torta-de-filtro por perda de carbono, para reduzir custos de transporte, devem considerar o impacto ambiental dessa emissão e os benefícios renunciados desse carbono orgânico à biomassa do solo.

Para a determinação das doses mais adequadas de torta-de-filtro, obtida em filtro oliver, foram realizados ensaios de calibração, testando várias doses, tanto aplicando no sulco de plantio, como em área total. Ensaios esses em grande número, desde BRASIL SOBRINHO (1958). Os resultados obtidos por esse autor indicam que a torta substitui a adubação mineral e, na presença de torta, a resposta à adubação mineral é maior. Resposta coerente com o funcionamento dos ciclos biogeoquímicos, principalmente do nitrogênio.

A Fuligem (Figura 11), preferencialmente, não deve ser armazenada. Devido a seu conteúdo de metais e pela elevada produção de poeira, quando seca, sujeita à ação do vento e de operações mecanizadas. Pode ser aplicada diretamente sobre o

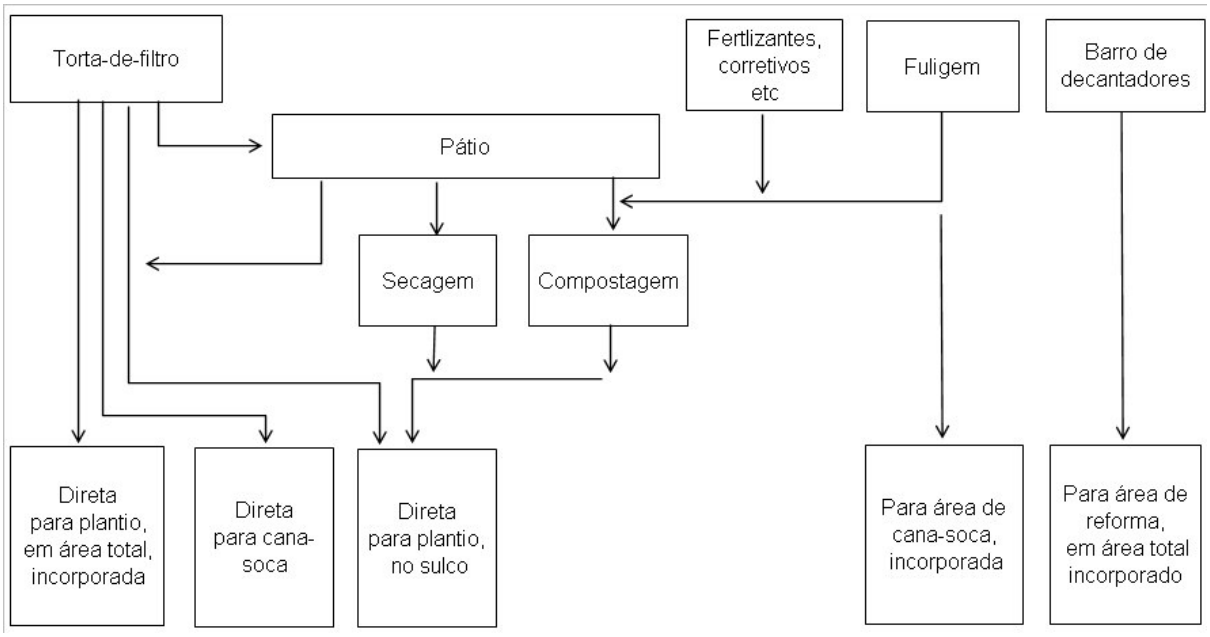


Figura 11. Modelo das vias de resíduos sólidos.

terreno, em área de reforma ou soqueira. O seu uso deve ser gerenciado no sentido dos locais de melhor resposta, e contabilizados os elementos para complementações ou restrições por riscos de contaminações.

O Barro de decantadores, em decorrência de apresentar baixo conteúdo de nutrientes e seu estado físico de difícil e custosa aplicação, tem sido aplicado em taxas bastante elevadas, acima de 150 $t.ha^{-1}$, dentro de limites das taxas de aplicação de metais pesados. As quantidades de nutrientes resultantes, devem ser contabilizadas no gerenciamento dos ciclos.

4.4. Identificação de Indicadores

Os modelos conceituais apresentam as vias e os compartimentos dos ciclos, bem como suas inter-relações. Isto, entretanto, é insuficiente para a compreensão e o gerenciamento desses processos. Fundamentalmente, os indicadores devem quantificar a eficiência de uso de recursos naturais e indicar tendências da manutenção dos elementos dentro dos ciclos biogeoquímicos do agroecossistema. Devem expressar as dimensões dos processos, dar sensibilidade ao analista e estar adequadamente posicionados em pontos críticos, tal que permitam uma identificação precoce de um evento ou distúrbio. (LAL, 1999).

Na escolha de indicadores para o gerenciamento dos ciclos, é considerada a recomendação de Oakley (1991), citado por LAL (1999). Os indicadores devem ser: simples e de fácil mensuração; aplicáveis em diferentes escalas; extrapoláveis; versáteis; relevantes e dirigidos a processos.

Considerando o modelo geral das vias biogeoquímicas (Figura 9) e referências da literatura, pôde-se elaborar o modelo apresentado na Figura 12, para representar os compartimentos e vias críticas para estabelecer os indicadores.

Para o gerenciamento dos ciclos dos macronutrientes, são propostos os indicadores relacionados na Figura 13, que caracterizam 4 grupos: os indicadores dimensionais das vias biogeoquímicas, os indicadores de conteúdo de nutrientes, os indicadores de quantidade de nutrientes, e indicadores relativos. Os indicadores dimensionais das vias são essenciais para o planejamento e logística de transporte para o campo, suas quantidades e estado físico determinam a logística. Os indicadores de conteúdo caracterizam os materiais e determinam a viabilidade econômica. Os indicadores relativos expressam a eficiência do gerenciamento.

Com essas considerações, pode-se elaborar a modelagem quantitativa das vias e dos nutrientes.

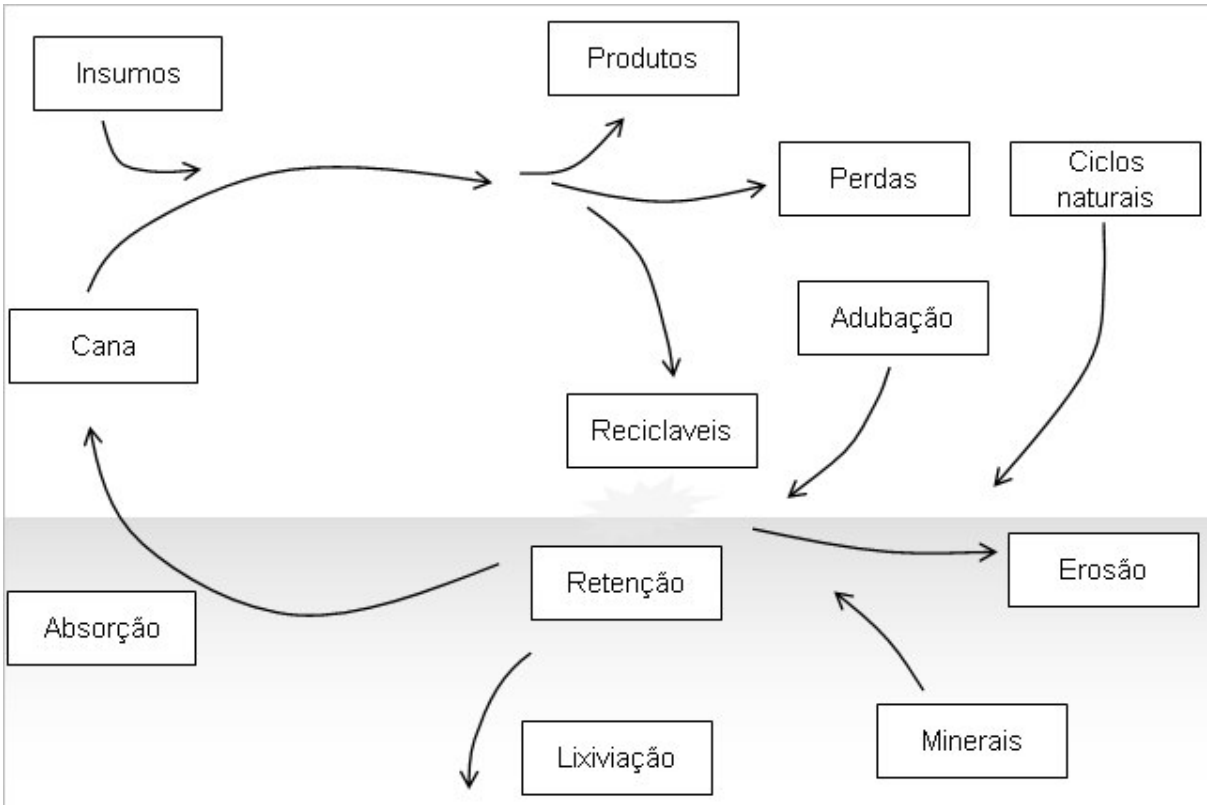


Figura 12. Compartimentos e vias para balanço do *pool* de elementos

Natureza	**Indicadores**
Indicadores dimensionais das vias	Cana processada
	Água captada
	Água residuária produzida
	Vinhaça produzida
	Fuligem produzida
	Torta-de-filtro produzida
	Barro de decantadores
Indicadores de conteúdo	Conteúdo de nutrientes no material
Indicadores de totalizações de nutrientes	Demanda em adubação
	Exportação pela cana colhida
	Retorno ao canavial
	Necessidade de adubação complementar
Indicadores relativos	Índice de adubação
	Índice de emissão
	Índice de retorno

Figura 13. Indicadores propostos para o gerenciamento dos ciclos biogeoquímicos dos macronutrientes no sistema agroindustrial da cana-de-açúcar.

4.5. **Modelo Quantitativo**

A modelagem quantitativa foi elaborada com base no fluxograma apresentado na Figura 14, e o processamento elaborado e executado em uma planilha eletrônica em Microsoft Excel 2003®, onde são relacionados e equacionados os componentes e indicadores do modelo. Esta planilha é apresentada nas Tabelas 11, 12, 13 e 14, onde os macronutrientes nas colunas e os compartimentos nas linhas.

Para a quantificação dos elementos dentro dos compartimentos e vias, procedeu-se uma coleta de dados com base nos dados da Cia Energética Santa Elisa e CASAGRANDE (1991). A precisão desses dados não é relevante para esse trabalho, uma vez que são apenas referências para a elaboração dos modelos e dos indicadores. E quaisquer que fossem, representam uma situação pontual, devendo ser recomendado que, uma aplicação de modelo, deve ser com uso de dados específicos do caso.

Considerando que o conceito deve ser aplicado, não só sobre a área de colheita, mas sim sobre a área total cultivada, faz-se uma configuração do canavial, com estimativa dessa área total e da produtividade total, aplicando a equação apresentada em 3.1.8, a partir de:

a. Produção (t)
b. Produtividade ($t.ha^{-1}$)
c. Longevidade (número de cortes)
d. Plantio de cana-de-ano (área - ha)

É presumido que, independente das tecnologias de transportes e aplicação, os materiais serão aplicados de forma racional, conforme sua composição e as necessidades de cada local (GLÓRIA, 1975). Para isto as modernas unidades industriais, conhecendo os custos logísticos da produção de cana e do uso de

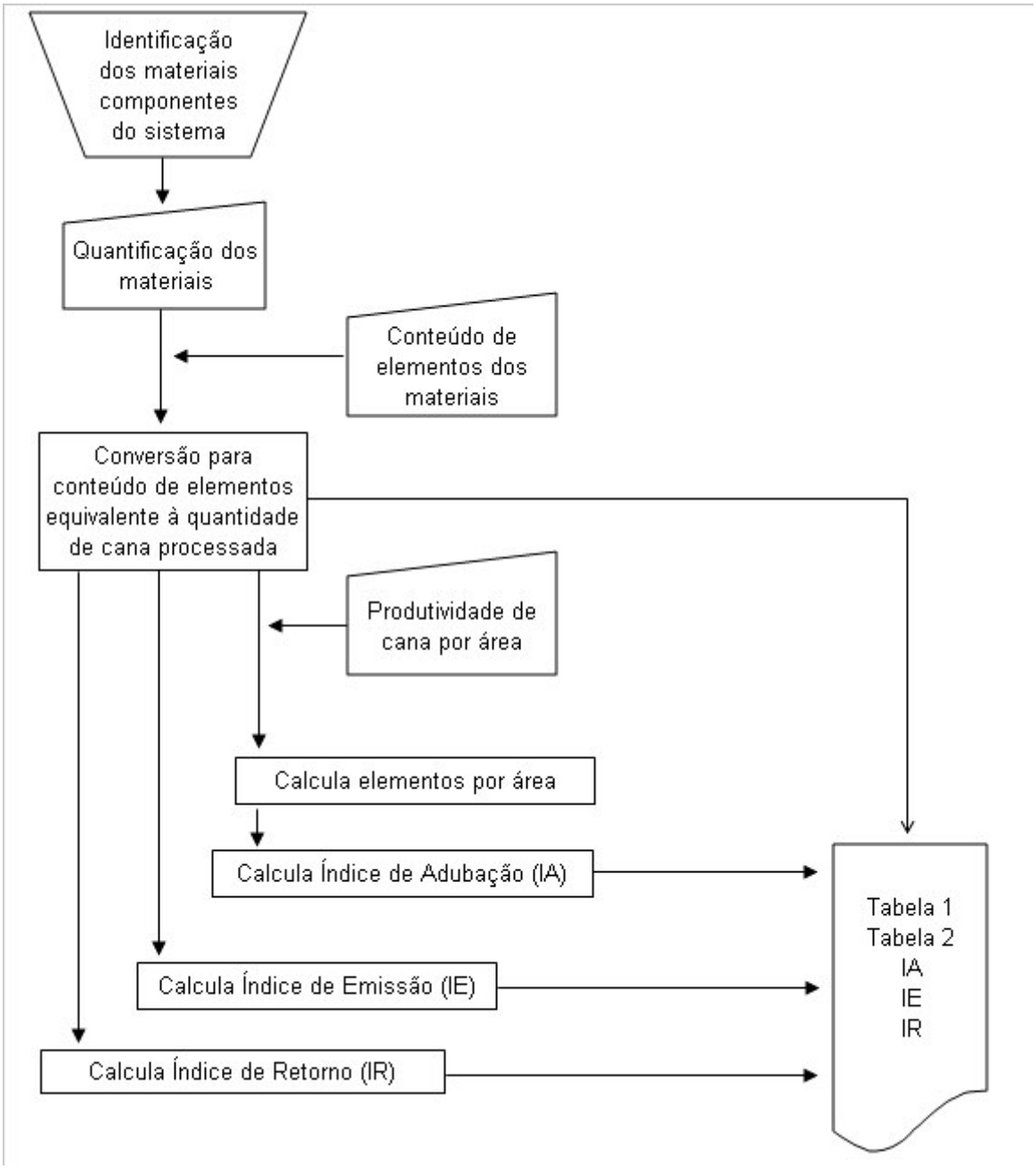


Figura 14. Fluxograma de cálculo da planilha do modelo quantitativo

resíduos e efluentes, trabalham para dar ao sistema agroindustrial uma configuração de baixa dispersão da área agrícola. Configuração que proporcione uma verticalização

da produção, com alta eficiência de uso de terras e baixa dispersão de área permite que as vias biogeoquímicas alcancem toda a área de produção agrícola, viabilizando modelos que busque a sustentabilidade considerando a quantidade total de materiais, de macronutrientes e de área.

Tabela 11. Configuração do canavial, projetado a partir da produção pretendida, produtividade, longevidade e área de cana-de-ano, e aplicando as equações da configuração. do canavial

Produtividade de área colhida	100,8	t ha^{-1}
Coeficiente de uso cultural	0,50	ha ha^{-1}
Distância geográfica	12	km
Taxa de viveiros	7	ha ha^{-1}
Longevidade	6	cortes
Área de cana-de-ano	1.500	ha
Área cultivada	22.619	ha
Área total de influência direta	45.238	ha
Produção	2.036.859	t
Produtividade total	90,1	t ha^{-1} ano^{-1}

Devido à multidisciplinaridade do estudo, os valores quantitativos são expressos em massa de elemento simples e não em suas formas de óxidos. Na Tabela 12 são apresentados os conteúdos dos macronutrientes em cada material, na Tabela 13 são apresentados os mesmos macronutrientes expressos em massa por unidade de cana processada e, na Tabela 14, são expressos em massa por área total cultivada. A partir desses valores, foram estimadas quantidades totais de elementos em fluxo para cada tonelada de cana processada (Tabela 15) e calculados indicadores relativos (IA, IE e IR) demonstrados a seguir.

Índice de adubação (IA) significa a proporção da quantidade de nutriente retornado ao campo em relação à quantidade requisitada pela cana como adubação.

Esta quantidade requisitada é aquela recomendada como adubação, geralmente obtida por experimentos de calibração e representa a demanda do sistema solo-planta para resultar na produção “ótima”.

O índice de emissão (IE) significa a quantidade total do nutriente emitido pela indústria, incluindo as quantidades inseridas na forma de insumos industriais, como cal, enxofre, ácido fosfórico e melaço.

O Índice de retorno (IR) significa a proporção da quantidade de nutriente retornado ao campo em relação à quantidade exportada do campo para a indústria, subtraindo as quantidades adicionadas ao sistema na forma de insumos industriais.

$$IA = \frac{E}{A} \qquad \left[\frac{kg}{kg}\right]$$

$$IE = \frac{E}{C} \qquad \left[\frac{kg}{kg}\right]$$

$$IR = \frac{E - I}{C} \qquad \left[\frac{kg}{kg}\right]$$

E = Soma das quantidades do elemento emitidas e utilizadas ($kg.ha^{-1}$)

A = Demanda pela cultura como adubo ($kg\ ha^{-1}$)

C = Quantidade transportada pela cana do campo para a indústria ($kg\ ha^{-1}$)

I = Entrada como insumos industriais ($kg\ ha^{-1}$)

Pode ser referenciado que a sustentabilidade do sistema será maior tanto quanto esses indicadores forem próximos de 1, enquanto valores maiores que 1 indicam que existe entrada do elemento no sistema. Para um exercício da análise do modelo, pode-se observar no cenário utilizado, (Tabela 15), que para o nitrogênio, o índice de adubação (IA) de 0,68 indica que o nitrogênio emitido pela indústria é bastante insuficiente para a adubação pretendida, satisfaz em apenas 0,68 kg por kg de nitrogênio adubo; enquanto os índices de emissão e de retorno (IE e IR) indicam que a indústria está emitindo quantidade de nitrogênio menor que a entrada. Estes dois índices são iguais porque não houve outra entrada senão pela cana.

O fósforo apresentou um IA de apenas 0,42, indicando que, mesmo com a adição de ácido fosfórico na fábrica, a quantidade de fósforo emitida é insuficiente para a adubação pretendida. Isto pode ser explicado pela intensa fixação do fósforo no solo, que faz exigir adubação muito superior à efetiva demanda pela planta. Considerando a estabilidade do elemento fósforo no sistema, não tendo fase gasosa, ou outra perda significativa, isto sugere que o equilíbrio do manejo e a sustentabilidade dependem de um manejo de solo que favoreça a disponibilidade.

O potássio, por não ter fase gasosa e ser altamente solúvel, é fortemente estável no processo industrial, tem preferência pelas vias líquidas, de forma que maiores quantidades são cicladas pela via da vinhaça e das águas residuárias. A entrada de potássio no processo industrial ocorre exclusivamente pela cana e, eventualmente, pela aquisição de melaço. Enquanto perdas de potássio podem ocorrer em pequenas quantidades pela emissão de material particulado pelas chaminés, na indústria, e no campo pode ocorrer pela erosão do solo, solubilizado em água de deflúvio (enxurrada) e por lixiviação no solo. Essas perdas podem ser consideradas como rupturas do ciclo biogeoquímico que, do ponto de vista antrópico, do agricultor, é indesejável quando reduz o potencial de produção da cultura, ou exige intensa reposição. Essa ruptura pode afetar os dois ecossistemas envolvidos, aquele que perdeu elemento ficando deficitário, e aquele que recebeu elementos ficando melhorado ou “poluído” pela alta concentração deste elemento.

À primeira vista, no cenário trabalhado, considerando a estabilidade do potássio no sistema, os valores de IE > 1 e IR >1, indicam que a quantidade emitida pela indústria é maior que a entrada, reconhecendo que está afirmativa é falsa, infere-se que existe um erro na quantificação, possivelmente por subestimativa do teor de potássio na cana transportada. Valores maiores de potássio na cana podem ser explicados, em hipótese pela absorção de luxo, resultante de incrementos do teor no solo devido às sucessivas entradas de potássio na forma de adubos e reciclagens pelo uso da vinhaça, resultando em incremento da quantidade total deste elemento no ciclo biogeoquímico do ecossistema agroindustrial. Pode-se inferir que o sistema atual carece de melhoria no monitoramento e rastreabilidade do nutriente ao longo de seu ciclo. Tal hipótese associada ao IA>1, indicaria que a quantidade de potássio em circulação é suficiente para a adubação da área cultivada.

Os índices de adubação para o cálcio e magnésio, indicam que as quantidades desses elementos emitidas são mais que suficientes para a adubação. Isto deve-se à adição de cal no processo industrial. O índice de emissão de cálcio de 1,125 significa que o processo industrial está acrescentando cálcio equivalente a 12,5% da quantidade de cálcio importada pela cana. O índice de retorno indica que está retornando para o campo 0,651 kg de cálcio para cada quilograma entrado pela cana processada. Portanto, para cálcio e magnésio existem incoerências entre o IE e o IR, que precisa ser verificada e corrigida. Considerando que essa abordagem não se refere ao cálcio e magnésio como corretivos, mas sim como nutrientes.

O enxofre apresenta um IA de apenas 0,44 kg por kg recomendado, isto pode indicar uma deficiência, perda no ciclo ou excessiva recomendação. Considerando que é realizada adição de enxofre, utilizado na indústria para clarificação do caldo, o índice de emissão está bastante baixo e o índice de retorno ainda mais baixo. Mesmo que haja erro de quantificação, estes valores baixos podem dever-se à perda por elevada volatilização desse elemento no processo industrial. É recomendável a verificação local desses valores e a acuridade das quantificações.

Quanto à necessidade de aquisição de elementos, na forma de adubos, este balanço indica necessidade de aquisição de nitrogênio, fósforo e enxofre, Sendo que a indicação para nitrogênio e fósforo é coerente com o conhecimento da dinâmica desses elementos, enquanto a indicação para enxofre é estranha e precisa melhor averiguação.

Outras discussões poderiam ser desdobradas, por exemplo, abordar as produtividades por unidade de quantidade de nutriente, equivalentes à produtividade por unidade do recurso natural em questão, na medida em que esse for absolutamente limitante.

Tabela 12. Conteúdo de macronutrientes detectados nas vias biogeoquímicas do sistema agroindustrial de cana-de-açúcar, dispostos em planilha de cálculo, com base em dados da Cia Energética Santa Elisa e PLANALSUCAR (1975 e 1976), citado por CASAGRANDE (1991)[(1)].

Material	unidade do nutriente no material	N Kejdhal	P	K	Ca	Mg	S
Cana (1)	kg t^{-1}	0,828	0,120	1,170	0,575	0,414	0,281
Palha	kg t^{-1}	-	-	-	-	-	-
Insumos industriais							
Melaço importado	kg t^{-1}	-	-	31,800	-	-	-
Ácido fosfórico	kg t^{-1}	-	257,000	-	-	-	-
Cal	kg t^{-1}	-	-	-	392,860	204,000	-
Enxofre	kg t^{-1}	-	-	-	-	-	987,000
Produtos							
Açúcar	kg t^{-1}	0,070	0,000	0,077	0,099	0,052	0,035
Álcool	kg m^{-3}	0,000	0,000	0,007	0,002	0,001	0,000
Resíduos							
Águas residuárias	kg m^{-3}	0,028	0,006	0,336	0,300	0,189	0,048
Torta de filtro	kg t^{-1}	5,170	1,993	1,230	3,857	0,840	0,228
Vinhaça	kg m^{-3}	0,632	0,047	3,132	0,424	0,240	0,266
Fuligem	kg t^{-1}	0,222	0,212	0,600	0,302	0,171	0,319
Barros	kg t^{-1}	0,478	0,050	2,839	0,412	0,248	0,265

Tabela 13. Quantidades de macronutrientes estimadas nas vias biogeoquímicas do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar, expressos em unidades por unidade de cana processada, com base na Tabela 2.

Material	Quantidade do material por t de cana	N Kejdhal	P	K	Ca	Mg	S
		kg t cana^{-1}					
Cana	1.000,000 kg t^{-1}	0,828	0,120	1,170	0,575	0,414	0,281
Palha	277,778 kg t^{-1}	-	-	-	-	-	-
Insumos							
Melaço	2,955 kg t^{-1}	-	-	0,094	-	-	-
Ácido fosfórico	0,149 kg t^{-1}	-	0,038	-	-	-	-
Cal	0,693 kg t^{-1}	-	-	-	0,272	0,141	-
Enxofre	0,229 kg t^{-1}	-	-	-	-	-	0,226
Produtos							
Açúcar	70,000 kg t^{-1}	0,005	0,034	5,420	6,937	3,666	2,481
Álcool	70,000 dm^3 t^{-1}	0,000	0,000	0,517	0,171	0,096	0,001
Resíduos							
Águas residuárias	900,000 dm^3 t^{-1}	0,025	0,006	0,302	0,270	0,170	0,043
Torta de filtro	32,000 kg t^{-1}	0,165	0,064	0,039	0,123	0,027	0,007
Vinhaça	590,000 dm^3 t^{-1}	0,373	0,027	1,848	0,250	0,142	0,157
Fuligem	5,000 kg t^{-1}	0,001	0,001	0,003	0,002	0,001	0,002
Barros	4,000 kg t^{-1}	0,002	0,000	0,011	0,002	0,001	0,001

Tabela 14. Quantidades estimadas de materiais nas vias biogeoquímicas e respectivas quantidades de macronutrientes retornadas da indústria para o campo do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar, expressos em unidade de área cultivada conforme a configuração do canavial da tabela 1.

Material	Quantidade do material por hectare	N	P	K	Ca	Mg	S
		kg ha^{-1}					
Cana	90.051 t ha^{-1}	74,6	10,8	105,4	51,8	37,3	25,3
Palha	25.014 t ha^{-1}	-	-	-	-	-	-
Emissões e usos							
Águas residuárias	135,077 m^3 ha^{-1}	2,3	0,5	27,2	24,3	15,3	3,9
Torta de filtro	2,882 t ha^{-1}	14,9	5,7	3,5	11,1	2,4	0,7
Vinhaça	63,130 m^3 ha^{-1}	33,6	2,5	166,4	22,5	12,8	14,1
Fuligem	0,450 t ha^{-1}	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1
Barros	0,360 t ha^{-1}	0,2	0,0	1,0	0,1	0,1	0,1
Soma		51,0	8,8	198,5	58,2	30,7	18,9
Demanda em adubação total		**75,0**	**20,0**	**144,0**	**45,0**	**30,0**	**35,0**
Adubação complementar		24,0	11,2	-	-	-	16,1

Tabela 15. Alguns indicadores extraídos do balanço de macronutrientes dos seus ciclos biogeoquímicos no sistema agroindustrial da cana de açúcar. Onde demanda, exportação, retorno e necessidade são as quantidades de nutrientes em circulação por tonelada de cana processada. O índice de adubação (IA) significa o quanto da adubação pode ser suprida pela reciclagem; o índice de retorno (IR) significa o quanto do nutriente "transportado" pela cana esta sendo retornado ao campo; e o índice de emissão (IE) significa o total de nutriente emitido pela indústria para o campo,.

Indicador	N	P	K	Ca	Mg	S
Demanda em adubação (kg K ton de cana^{-1})	0,833	0,222	1,599	0,500	0,333	0,389
Exportação pela cana colhida (kg K ton de cana^{-1})	0,828	0,120	1,170	0,575	0,414	0,281
Retorno pelo uso de efluentes e resídus (kg K ton de cana^{-1}	0,567	0,098	2,204	0,647	0,340	0,210
Necessidade de adubação complementar (kg K ton de cana^{-}	0,266	0,124	-	-	-	0,179
Índice de adubação pela ciclagem (IA)	0,68	0,44	1,38	1,29	1,02	0,54
Índice de emissão (IE)	0,68	0,82	1,88	1,12	0,82	0,75
Índice de retorno (IR)	0,68	0,50	1,80	0,65	0,48	(0,06)

Onde:

$$IA = \frac{\text{Soma de emissões e usos}}{\text{Demanda em adubação}} \left[\frac{kg}{kg}\right]$$

$$IE = \frac{\text{Soma de emissões e usos}}{\text{Transportado pela cana}} \left[\frac{kg}{kg}\right]$$

$$IR = \frac{\text{Soma de emissões e usos - Entrada como insumo industrial}}{\text{Transportado pela cana}} \left[\frac{kg}{kg}\right]$$

De modo geral a discussão dos resultados desse cenário permite constatar que os valores analíticos das quantidades de materiais e seus teores de elementos parecem carecer de consistência, sugerindo a necessidade de implantação de modelo de monitoramento e rastreabilidade dos nutrientes ao longo dos compartimentos e vias do ciclo.

Por fim, esses valores e essa breve discussão têm a finalidade de ensaiar e validar a aplicação da modelagem e dos diagnósticos possíveis em uma análise sistêmica dos ciclos biogeoquimicos em uma dada situação.

Quanto à modelagem, pode ser percebido que a elaboração de um modelo que propicie uma análise sistêmica do processo agroindustrial, muito pode contribuir para o entendimento e desenvolvimento do sistema de produção.

.

5. CONCLUSÃO

1. Diante da perspectiva de expansão da cultura da cana de açúcar e da responsabilidade de dar sustentabilidade à sua produção, a moderna agroindústria da cana-de-açúcar apresenta-se conceitualmente muito favorável à sustentabilidade, e ainda exige melhorias para a efetividade desses conceitos.

2. A modelagem apresentada permite uma visão sistêmica dos ciclos biogeoquímicos, podendo subsidiar o gerenciamento do processo de produção.

3. Os indicadores desenvolvidos – índice de adubação (IA), índice de emissão (IE) e índice de retorno (IR) – permitem uma análise e diagnóstico da circulação do nutriente, bem como quantificar o nível de sustentabilidade do ecossistema agroindustrial.

4. No cenário analisado para validação do modelo, conclui-se que as quantidades de potássio, cálcio e magnésio em circulação são suficientes para a adubação da cultura. Enquanto o nitrogênio, fósforo e enxofre emitidos são insuficientes, exigindo adubações complementares. Considerando que o cenário e os valores adotados são usuais para as empresas, é recomendável o desenvolvimento de melhorias no monitoramento e rastreabilidade desses nutrientes em seus ciclos.

6. IMPLICAÇÕES

1. Uma visão sistêmica dos processos pode orientar e dar maior eficácia ao desenvolvimento de tecnologias de produção, de controle e monitoramento ambiental.
2. A integração agrícola industrial viabilizando a circulação de nutrientes, mesmo em monocultivo com a verticalização da produção ao redor das indústrias, pode contribuir para a redução da demanda por recursos (água, fertilizantes, corretivos e espaço) e para o estabelecimento de um equilíbrio de manejo favorável à sustentabilidade.
3. O gerenciamento com regeneração e construção de ciclos biogeoquímicos pode constituir uma nova abordagem da adubação das culturas.

7. REFERÊNCIAS

AYALA, I.A.C.; ORTIZ, M.E de L.; RUIZ, A.G.; GOMEZ, D.P.; DELGADO, R.V.; AGUILAR, I.S. **Caña de azúcar – paradigma de sostenibilidad**. INICA- Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar. Havana, 2003. 173 p.

ALTIERI, M.A. **Agroecologia:** as bases científicas para a agricultura alternativa. Rio de Janeiro: Projeto e Tecnologias/FASE, 1989. 240 p.

ALVAREZ, I.A. **Comparação entre o desenvolvimento de cana crua e cana queimada em dois ciclos de crescimento**., Tese (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba. 1998. 120 p.

ANEEL.- Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica no Brasil**, Brasília: ANEEL, 2002. 153p. .
Disponível em: www3.aneel.gov.br/atlas/atlas_2edicao.htm.

ASSUMPÇÂO-ALVES, M.R.P. A **Liga do Açúcar – Integração da cadeia produtiva do açúcar à rede de suprimentos da indústria alimentícia**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade de São Paulo, São Carlos. 2001. 288 p.

AUKLAND, L.; MOURA COSTA, P.; BASS, S.; HUQ, S.; LANDELL-MILLS, N.; TIPPER, R. and CARR, R. **Laying the Foundations for Clean Development: Preparing the Land Use Sector. A quick guide to the Clean Development Mechanism.** IIED, London, 2002. 39 p.

BARBIERI, C. **Modelagem de dados. Rio de Janeiro**: IBPI Press. 1994. 350 p.

BARBOSA, V. Cultivo de soqueira, adubação e reforma de canaviais sob sistema de cana crua. In: **Semana da Cana-de-açúcar de Piracicaba**, 2, 1997, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: IAC/ESALQ/AFOCAPI/ALIA. 1997. p52-54.

BARBOSA, V. **Gestão Ambiental no Agro-negócio da Cana-de-açúcar**. Faculdade Barão de Mauá, Gestão de Agro-negócios, 3ª Turma, Sertãozinho, 2002.

BARBOSA, V. Aplicação de Vinhaça Concentrada. In: **III Simpósio Internacional da STAB**, Águas de São Pedro–SP: **CD**, 2005.

BARBOSA, V.; SICCHIERI, A. J.: CAMPOS, M. S. Controle da Matocompetição no Agroecossistema da Cana-de-açúcar. In: SEGATTO, S. V. et al. (Org.) **Atualização em Produção de Cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. p225-238.

BARBOSA, V. Novas tecnologias no uso da vinhaça e aspectos legais. In: **Tópicos em tecnologia sucroalcooleira**. Editores: MARQUES, M.O. et al. Jaboticabal. 2006. 191 p.

BARBOSA, V; DURIGAN, A.M.P.R.; GLÓRIA, N.A. da; MUTTON, M.A.. Uso de Vinhaça Concentrada na Adubação de Soqueira de Cana-de-Açúcar. **STAB**, julho-agosto-2006, vol.24, nº 6, 2006.

BARBIERI, C. **Modelagem de Dados**. Rio de Janeiro: IBPI Press. 1994. 350 p.

BARICKMAN, B. J**. Um contraponto Baiano – Açúcar, fumo, mandioca e escravidão no Recôncavo, 1760-1860.** Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 2003. 445 p.

BASSOI, L. J. Utilização Agrícola de Efluentes de Lagoas de Estabilização – A Visão da CETESB. In: **II Seminário Técnico Utilização agrícola de efluentes de lagoas de estabilização.** São Paulo: SABESP. 2006.

BERGAMASCO, A. F.; RODRIGUES, L.H.A.; SILVA, F.C.; TRIVELIN, P.C.O. Estudo da dinâmica do nitrogênio no sistema solo-cana-de-açúcar através da modelagem matemática. . In: **8º Congresso Nacional da STAB,** Recife: **Anais..** .2002. p. 225-233.

BERNARDES, M. S.; TERUEL, D. A.; SPAROVEK, G.; DOURADO-NETO, D., **Modelos ambientais e sustentabilidade**. Piracicaba: Departamento de Agricultura, ESALQ – Universidade de São Paulo, 2002. 3 p.

BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S.; DOBEREINER, J.; REIS, V. M. Fixação Biológica do Nitrogênio em Cana-de-açúcar. **Álcool & Açúcar**. nº 53, mar/abr/mai/jun-1990. p.12-19.

BRASIL SOBRINHO, M.O.C. **Estudos sobre o aproveitamento da torta de filtro de usina de açúcar como fertilizante**. 1958. 109f. Tese (Doutoramento). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1958..

BRESSAN, E. de A. & GERALD, L. T. S. **Inoculação de bactéria fixadora de nitrogênio (BFN) em cana-de-açúcar – teste de produção sem adubação química de nitrogênio.** Araras: DBV, Universidade Federal de São Carlos. 2006. Disponível em: http://www.ufscar.br/publica/4jc/ixcic/PIBIC/155. Acessado em: 21-06-2003.

BSCS – Biological Sciences Curriculum Study. **Biologia das moléculas ao homem**. Vol. I. Ed. São Paulo: EDART, 1972. 278p.

BURNQUIST, W. L. & LANDELL, M. G. de A. Variedades e proteção contra doenças e pragas. In: MACEDO, I. de C. (Coord.) **A Energia da Cana –de-Açúcar – Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade.** São Paulo: UNICA – União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo, 2005. p175-181.

CAMARGO, G. A. de; VALADARES, J. M. A. da S.; BERTON, R. S.; TEÓFILO SOBRINHO, J. **Aplicação de vinhaça no solo e efeito no teor de nitrogênio, fósforo, enxofre inorgânico e alguns metais pesados.** Campinas: Instituto Agronômico, Boletim científico nº 8. 1987. 15p.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: Campus "Luiz de Queiroz" /USP. 1997. 131 p.

CARNEIRO, C.; SOTTOMAIOR, A.P.; ANDREOLI, C.V. Dinâmica de nitrogênio em lodo de esgoto sob condição de estocagem. **Rev. Bras. Ciênc. Solo v.29 n.6** Viçosa nov./dez. 2005.

CARVALHO, P.C.T. & CARVALHO, F.J.P.C. Legislação sobre biosólidos. In: **Biosólidos na Agricultura**. 1ª ed. São Paulo: SABESP, 2001.

CASE-IH**.** Agricluster, um novo caminho para o sucesso agrícola. **Revista Case-IH**, Ano II- n. 6, p. 12. 2002.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Norma Técnica P4.231 – Vinhaça – Critérios e Procedimentos para Aplicação em Solo Agrícola – jan/2005.**
Disponível em: www.udop.com.br/download/legislacao/portaria_4231_vinhaca.PDF. Acessado em: 06 de abril de 2007.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Norma Técnica P4.230 – Aplicação de lodos de sistemas de tratamentos biológico em áreas agrícolas – Critérios para projeto e operação (Manual Técnico).** São Paulo: CETESB, 1999. 33p.

CNUMAD – Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (1992: Rio de Janeiro). **Agenda 21 - Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento**. 3ª ed. Brasília: Senado Federal, 2001, 598 p.

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução nº 357/2005**. Disponível em: http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res357.pdf, acessado em 26 de dezembro de 2006.

CORDANI, U. G.; MARCOVITCH, J.; SALATI, E. Avaliação das ações brasileiras em direção ao desenvolvimento sustentável após a Rio-92. **Estud. av**. v.11 n.29 São Paulo jan/abr. 1997. p.399-408.

DESCARTES, RENÈ, 1596-1650. **Discurso do método; As paixões da alma**. tradução de J. Guinsburg e Bento Prado Junior. – 4ª ed. - São Paulo: Nova Cultural, 1987. 154p.

DOURADO-NETO, D.; TERUEL, D. A.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D. R.; FRIZZONE, J. A.; BACCHI, O. O. S. " Principles of crop modelling and simulation: I. uses of mathematical models in agriculture science." **Sci. agric**. v. 55 n. especial Piracicaba 1998a.

DOURADO-NETO, D.; TERUEL, D. A.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D. R.; FRIZZONE, J. A.; BACCHI, O. O. S. " Principles of crop modelling and simulation: II. the

implications of the objective in model development." **Sci. agric**. v.55 n. especial Piracicaba 1998b.

DOURADO-NETO, D.; TERUEL, D. A.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D. R.; FRIZZONE, J. A.; BACCHI, O. O. S. " Principles of crop modelling and simulation: III. modeling of root growth and other belowground processes, limitations of the models, and the future of modeling in agriculture." **Sci. agric**. v. 55 n. especial Piracicaba 1998c.

DINARDO-MIRANDA, L. L. Cigarrinha-das-raízes em cana-de-açúcar. In: Salvadori, J. R. (Coord.) **Pragas do Solo no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa, 2006. p.495-516.

DYNIA, J. F. Nitrate retencion and leaching in variable change soils of a watershed in São Paulo State, Brasil. Embrapa Meio Ambiente, **Commun. Soil SCI, Plant Anal,** 31(5&6), 777-791. 2000.

FREIRE, W. J.; CORTEZ, L. A. B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 203p.

FREYRE, G. **Casa-grande & senzala**. São Paulo: Livraria José Olimpio Editora S.A., 1933. 587 p.

GALLO, L.A. **O nitrogênio e o ciclo do nitrogênio**. Piracicaba: CIAGRI/Universidade de São Paulo, 2006. 8p. Disponível em: http://www.ciagri.usp.br/~luagallo, acessado em: 17 de abril de 2006.

GATTO, R. H**. Lodo de Esgoto e Vinhaça como fonte de nutrientes para a cultura da cana-de-açúcar, em substituição a fertilização mineral.** Tese (Mestrado em Produção Vegetal), Jaboticabal: UNESP, 2003. 106 p.

GAVA, G. J. de C.; TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, M. W.; PENATTI, C. P. Crescimento e acúmulo de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com palhada. **Pesq. agropec. bras**. vol.36 nº.11 Brasília nov., 2001. p.1347-1354.

GERALDI FILHO, L. ; CORRÊA, W. J.; HENRIQUE, J.L.P.; MIKLÒS, J.E.W. Aplicação de vinhaça através de caminhão-extensão. **STAB,** v.6, n.93, p.28-33, 1988

GHINI, R. & BETTIOL, W. Proteção de plantas na agricultura sustentável. In: **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 17, n. 1, p. 61-70, jan./abr. 2000.

GLÓRIA, N. A. da Utilização agrícola da vinhaça. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v.86, n.5, p.11-17, nov 1975.

GLÓRIA, N. A.; ORLANDO FILHO, J. Aplicação de vinhaça: um resumo e discussão sobre o que foi pesquisado. **Álcool e Açúcar**, v. 4, n. 15, p. 22-31, 1984.

GLÓRIA, N. A.; MATIAZZO, M. E.; MORAES, C. J. Avaliação da fuligem como fonte de potássio para vegetais. In: **5º Congresso Nacional da STAB** (**Anais**). Águas de São Pedro, SP: STAB, 1993. p.56-60.

GOLDEMBERG, J. A expansão da indústria alcooleira e sua relação com o meio ambiente. In: **Opiniões**, jul-set 2006, p.14.

GOMES, M. A. F. ; SOUZA, M. D. de; BOEIRA, R. C.; TOLEDO, L. G de. **Nutrientes Vegetais no Meio Ambiente: ciclos bioquímicos, fertilizantes e corretivos**. Jaquariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. 50 p.

GONÇALVES, D. B. **A regulamentação das queimadas e as mudanças nos canaviais paulistas**. Tese (Mestrado em Desenvolvimento, Espaço e Meio Ambiente)

- Instituto de Economia, UNICAMP, Campinas, 2001. São Carlos: FAPESP/RiMa, 2002. 127 p.

GONÇALVES, D. B. **Mar de cana, deserto verde? Dilemas do desenvolvimento sustentável na produção canavieira paulista**. Tese (Doutorado e Desenvolvimento, Espaço e Meio Ambiente). São Carlos: UFSCar, 2005. 256 p.

GOODLAND, R. J. A. & FERRI, M.G. **Ecologia do Cerrado**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo. 1979. 193 p.

HARDOIM, P.C. **Manejo de Resíduos da Agricultura**. Lavras: AEPE – Universidade Federal de Lavras. 2001. 70 p.

HENRICHS, R.; GAVA, G.J.C.; MONTEIRO, M.R. Produção de adubos verdes cultivados em solo podzolico durante o período de entressafra no Estado de São Paulo. In: **Científica Revista de Agronomia**, v. 28 (1/2). 2000. p.115-124.

HIRATA, R. A vulnerabilidade da contaminação de aquíferos pela disposição de resíduos no solo. In: **II Seminário Técnico Utilização agrícola de efluentes de lagoas de estabilização.** São Paulo: SABESP. 2006.

HASSUDA, S. Impactos da infiltração da vinhaça de cana no aquífero Bauru. Tese (Mestrado) Universidade de São Paulo- Instituto de Geociências. São Paulo. 1989. 92p.

LAL, R. **Métodos para avaliação de uso sustentável dos recursos solo e água nos trópicos**; tradução e adaptação de Cláudia Conti Medugno e José Flávio Dynia.

Jaquariuna: Embrapa Meio Ambiente, 1999. 97 p.

LEME, E. J.; ROSENFELD, U.; BAPTISTELLA, J. R. Uso de vinhaça por aspersão com canhão hidráulico. In: **Simpósio Internacional sobre tecnologia dos álcoois como combustível** – 4 – Guarujá. IPT. São Paulo: **Anais...** v.2, 1980. p. 815-821.

LÓPEZ, A; JESUS, H.S. de; ROCHA M. de M.; FRIAS M.; URQUIAGA, S.; ALVES B.J.R. **Diagnóstico de potencial de nitrificação e desnitrificação em solo sob pastagem de Brachiaria sp e solo sob plantio direto e convencional**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, nov. 1998. 24p.

LYNCH, J. M. **Biotecnologia do Solo – Fatores microbiológicos na produtividade agrícola.** São Paulo: Editora Manole Ltda. 1986. 209p.

MALAVOLTA, E. ; HAAG, H.P.; MELLO, F.A.F.de; BRASIL SOBRINHO, M.O.C. **Nutrição mineral e adubação de plantas cultivadas**. São Paulo, Ed. Pioneira. 1974. 752p.

MATIOLI, C. S. **Aspectos Técnicos-econômicos e Critérios Básicos para a otimização de Sistemas de Fertirrigação de Lavouras Canavieiras com Vinhaça.** Tese (Mestrado). Piracicaba: ESALQ – Universidade de São Paulo. 1989.

MELFI, A.J.; MONTES, C.R.; Impacto dos biossólidos sobre o solo. In: **Biossólidos na Agricultura**. 1ª edição. São Paulo: SABESP, 2001. p 243-272.

MENESES, J. A.; PAIXÃO, A. C. S.; SIRIO, K. J. Transporte dutoviário de vinhaça. Piracicaba: **Boletim Técnico COPERSUCAR** 25-84. 1984. p.21-23.

M.M.A.- Ministério do Meio Ambiente; PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. **Agenda 21 Brasileira - Agricultura Sustentável, Versão Final**. São Paulo: Consórcio Museu Paraense Emílio Goeldi, 1999. 125 p.

M.M.A. - Ministério do Meio Ambiente. **Programa de Zoneamento Ecológico Econômico.** Brasília. 2002. Disponível em: http://www.mma.gov.br/port/sds/zee Acesso em: 25-10-2003.

M.M.E. – Ministério das Minas e Energia. **Balanço Energético Nacional 2006: Ano base 2005, Relatório Final.** Rio de Janeiro: EPE – Empresa de Pesquisa Energética, 2006. 188p.

MELO, W.J.; MARQUES, M.O.; MELO, V.P. O uso agrícola do Biossólido e as propriedades do solo. In: **Biossólidos na Agricultura**. 1ª ed. São Paulo: SABESP, 2001. 468p.

MUZILLI, O. Efeitos dos métodos de cultivo do solo na utilização de produtos fitossanitários e fertilizantes. . In: **Revista Brasileira de Toxicologia**. Vol. 12 n. 1. Ribeirão Preto, 1999. p.C20.

NAHAS, E. **Ciclo do fósforo: transformações microbianas**. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 67 p.

OLIVEIRA, M. W. de; TRIVELIN, P. C. O.; GAVA, G. J. de C. Degradação da palhada da cana-de-açúcar. **Sci. Agric**., oct./dec. 1999, vol.56, nº 4, p.803-809.

ORLANDO FILHO, J.; ZAMBELLO JR, E.; AGUJARO, R. e ROSSETTO, A. J. Efeito da Aplicação Prolongada da Vinhaça nas Propriedades Químicas dos Solos com Cana-de-Açúcar – Estudo Exploratório. **STAB**, julho-agosto/1983.

ORLANDO FILHO, J.; SILVA, G. M. de A; LEME, E. J. de A. Utilização Agrícola de Resíduos da Agroindustria Canavieira. In: ORLANDO FILHO, J (Coord.) **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil.** Piracicaba: IAA/Planalsucar, 1983b, 369p.

ORLANDO FILHO, J.; BITTENCOURT, V.C.; ALVES, M.C. Aplicação de Vinhaça em solo arenoso do Brasil e Poluição do Lençol Freático com nitrogênio. In: **XXII ISSCT Congress. STAB** – Julho-Agosto/95 – Vol.13 n.6.

PADOVESI, P.P. **Movimento e perdas de nitrogênio e potássio num solo com cana-de-açúcar.** 1988. 106f. Tese (Mestrado) – ESALQ - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.

PAES, L.A.D. Áreas de expansão do cultivo da cana. In: **A Energia da Cana-de-Açúcar – Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade.** São Paulo: UNICA – União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo, 2005. p125-133.

PASQUALETO, A. & ZITO, R. K. **Impactos Ambientais da monocultura da cana-de-açúcar**. Goiânia: Ed. da UFG, 2000. 82 p.

PESSOA, M.C.P.V; GOMES, M.A.F.; SOUZA, M.D. DE.; CERDEIRA, A.L.; NEVES, M.C.: NICOLELLA, G. **Estudos da simulação de movimentação vertical de herbicidas em solos com cana-de-açúcar na microbacia do córrego espraiado Ribeirão Preto (SP)**. Jaquariuna: Embrapa Meio Ambiente, 1999. 44p.

PINAZZA, L.A.; ALIMANDRO, R. Cana-de-açúcar – Alimento bom e doce. **Agroanalysis Revista de Agronegócios da FGV**, vol. 23, n. 3, abr. 2003.

PINAZZA A. H.; MACEDO, N. Monocultura Canavieira e a Agricultura Sustentável. In: **STAB** – Setembro-Outubro/93 – vol.12 n. 1. 1993. p. 19-21.

PINTO, L.F.G.; BERNARDES, M.S.; NOORDWIJK, M.V.; PEREIRA, A.R.; SPAROVEK, G. Avaliação do cultivo de cana-de-açúcar em sistemas agroflorestais na região de Piracicaba, SP. In: **8º Congresso Nacional da STAB**, Recife, 2002. Anais. p.506-512.

PHAN GIA TAN. Effect on production of sugar cane and soil fertility of leaving the dead leaves on the soil or removing them. **Livestock Research for Rural Development**, Volume 7, Number 2, December 1995.

PIMENTEL GOMES, F. & CARDOSO, E. de M. **A Adubação da Cana-de-açúcar**. Piracicaba: Edições Agronômicas Ceres, 1958. 118p.

POLITANO, W. et al. Caracterização por fotointerpretação de ocupação do solo no município de Monte Alto-SP. **Revista Engenharia Agrícola** (Botucatu), v. 7, n. 1, p. 17-25, 1983.

RAMOS-DURIGAN, A. M. P., BARBOSA, V.; GLÓRIA, N. A. Adubação de soqueira em cana crua. In: **Relatório de Experimentação Agrícola – Santa Elisa - Safra 01/02**. Sertãozinho/SP: Cia Energética Santa Elisa. 2001. 58p.

RAVEN, P.H.; JOHNSON, G.B. **Biology**. 3th ed. St.louis, Missouri, EUA: Mosley Year Book. 1992. 1217p.

RIPOLI, T.C.C.; MOLINA Jr, W.F.; RÍPOLI, M.L.C. Energy Potential of Sugar Cane Biomass in Brazil. **Sci. agric**. Vol. 57 n. 4 Piracicaba Oct/Dec. 2000.

RÍPOLI, T.C.C.; RÍPOLI, M.L.C. **Biomassa de cana-de-açúcar**: Colheita, energia e ambiente. Piracicaba: T.C.C. RÍPOLI, 2004. 302 p.

ROCHA, M.T. Mudanças climáticas e mercado de carbono. In: **1º Encontro Cana-de-açúcar e seus produtos no centro-sul brasileiro: produção, mercado e tendências.** Piracicaba: Canaplan/ESALQ. (digital) 2002.

RODRIGUES, S. A. Análise comparativa entre diversos sistemas de tratamento para clarificação de caldo. In: **8º Congresso Nacional da STAB**, Recife: **Anais.**.., 2002. p. 732-736.

RODRIGUES, G.S. Resultados obtidos na monitorização de produtos fitossanitários em águas. Embrapa Meio Ambiente. In: **Revista Brasileira de Toxicologia**. Vol. 12 n. 1. Ribeirão Preto, 1999. p. C9.

RODRIGUES, G.S.; BUSCHINELLI, C.C. de A.; IRIAS, L.J.M. e LIGO, M.A.V. **Avaliação de impactos ambientais em projetos de desenvolvimento tecnológico agropecuário II**. Jaquariuna; Embrapa Meio Ambiente, 2000. 28p**.**

SABESP- Cia de Tecnologia e Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo. www.sabesp.com.br/sabesp ensina/avancado/poluicao das aguas. 2006, acessado em 11/06/2006.

SALIBE, A.C. **O usineiro e senhor de engenho: a influência das mídias na formação da imagem do empresário de açúcar e de álcool na região de Araçatuba/SP**. 2002. 146f. Tese (Mestrado-UNIP). São Paulo: UNIP-Universidade Paulista, Piracicaba, 2002.

SANTA ELISA, Cia Energética. **Análise de viabilidade da colheita de cana crua**. Relatório interno. Sertãozinho-SP. 2002.

SHARPLEY, A.N., SMITH, S.J. Effects of cover crops on surface water quality. In: HARGROVE, W.L. (Ed**) International Conference on Cover Crops for Clean Water.** Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1991. p. 41-49.

SIQUEIRA, J. O.; FRANCO, A. A. **Biotecnologia do solo: Fundamentos e Perspectivas**. Brasília: MEC, Lavras: ESAL, 1988. 236 p.

SOBRINHO, P. A. Tratamento de esgoto e geração de lodo. In: **Biossólidos na Agricultura.** 1ª ed. São Paulo: SABESP, 2001. 468p.

SOUSA, S.A.V. Vinhaça: o avanço da tecnologia de uso. In: **A Energia da Cana-de-Açúcar, Dose estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade**. São Paulo: UNICA, 2005. p.165-171.

SPAROVEK, G. **Indicadores para o planejamento conservacionista**. 1998. 70 f. Tese (Livre-Docência) – ESALQ/ Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

TOMMASI, L. R. A monitorização do meio-ambiente. In: **Folha de São Paulo** - 21 de julho de 1974. São Paulo. 1974. p. 52.

TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, M.W.; VITTI, A.C.;GAVA, G.J. de C.; BENDASSOLLI, J.A. Perdas de nitrogênio da uréia no sistema solo-planta em dois ciclos de cana-de-açúcar. **Pesq. agropec. bras**. Brasília, v. 37, n. 2, p.193-201, fev.2002.

UNICA. **Information from the producers of sugar and ethanol in the State of São Paulo** – Brasil. São Paulo. Mar. 2002. 28 p.

UNICA. **O compromisso da Unica com o desenvolvimento sustentável**. São Paulo, 2003. Disponível em: http://www.unica.com.br/pages/sociedade_desenvolv1.asp Acesso em: 28-07-2003.

VALSECHI, O; PIMENTEL GOMES, F. Solos incorporados de vinhaça e seu teor de bases. **Anais de E.S.A. Luiz de Queiroz** 11: 135-158. 1954.

VAN RAIJ, B. A agricultura da revolução verde á sustentável? . In: **Revista Brasileira de Toxicologia**. Vol. 12, n. 1. Ribeirão Preto, 1999. p. C12.

VANZO, J.E.; MACEDO, L.S. & TSUTIYA, M.T. Registro da produção de biossólidos. O caso da ETE Franca. In: **Biossólidos na Agricultura**. 1ª edição. São Paulo: SABESP, 2001. p. 227-242.

VITTI, G.C. & LUZ, P.H.C. **Utilização agronômica de corretivos agrícolas**. Piracicaba: FEALQ/GAPE, 2001. 96 p.