

XXI SIMPÓSIO DE GESTÃO DA INOVAÇÃO TECNOLÓGICA

7 a 10 de Novembro de 2000 – São Paulo - SP



Opções produtivas mais limpas: uma perspectiva evolucionista a partir de um estudo de trajetória tecnológica na agroindústria canavieira

Corazza, Rosana I.

Departamento de Política Científica e Tecnológica - DPCT

Instituto de Geociências - IG

Universidade Estadual de Campinas - Unicamp

Cidade Universitária Zeferino Vaz - Caixa Postal 6152

Campinas - SP - Brasil

Tel: (19) 788-4597 / 788-4555

Fax: (19) 289-1562 / 289-1097

E-mail: corazza@ige.unicamp.br

Salles-Filho, Sergio L. M.

Departamento de Política Científica e Tecnológica - DPCT

Instituto de Geociências - IG

Universidade Estadual de Campinas - Unicamp

Cidade Universitária Zeferino Vaz - Caixa Postal 6152

Campinas - SP - Brasil

Tel: (19) 788-4597 / 788-4555

Fax: (19) 289-1562 / 289-1097

E-mail: sallesfi@ige.unicamp.br

Palavras-chave: Política científica e tecnológica; política ambiental; tecnologias limpas; trajetória tecnológica; vinhaça.

Resumo: O estímulo que os diferentes instrumentos de política ambiental podem oferecer à mudança tecnológica tem sido objeto de particular atenção por parte da análise econômica ao longo dos últimos trinta anos. Trabalhos recentes sobre a natureza dos problemas ambientais têm evidenciado, entretanto, que os resultados deste tipo de análise deve ser circunstanciados, sendo sua validade provavelmente restrita aos casos onde certas hipóteses são observadas. Também serão limitadas, consequentemente, as derivações de política dessas análises. Estudos desenvolvidos sob a perspectiva teórica evolucionista, adotada neste artigo, apontam para a existência de padrões tecnológicos, que explicam a permanência de algumas tecnologias organizadas de forma sinérgica em sistemas ou paradigmas e a dificuldade de ruptura e de introdução de novas alternativas. Estes estudos contribuem ainda para a compreensão dos fatores envolvidos no surgimento de novas trajetórias tecnológicas. Considera-se, por isso, que esta é uma perspectiva teórica frutífera, oferecendo ferramentas conceituais que podem ser de grande auxílio no estudo das possibilidades de construção de padrões tecnológicos que favoreçam a proteção e o uso sustentável do meio ambiente. Partindo de uma perspectiva evolucionista da mudança tecnológica, este artigo tece reflexões sobre os papéis das políticas Ambiental e de Ciência e Tecnologia (C&T) na modelagem de opções produtivas ‘mais limpas’. Para desenvolver e ilustrar a argumentação proposta neste artigo, foi escolhido um estudo de trajetória tecnológica no setor da agroindústria canavieira, em que é investigado o feixe de possibilidades tecnológicas em desenvolvimento nos anos 80 para a solução do problema da disposição da vinhaça.

Opções produtivas mais limpas: uma perspectiva evolucionista a partir de um estudo de trajetória tecnológica na agroindústria canavieira

Introdução

O problema da vinhaça, resíduo da produção da indústria canavieira, tornou-se agudo com o crescimento do setor, ocorrido após a instituição do Programa Nacional do Álcool. Neste artigo, propomos um estudo de trajetória tecnológica no setor da agroindústria canavieira, em que é investigado o feixe de possibilidades tecnológicas em desenvolvimento nos anos 80 (apresentadas no item 3) para a solução do problema da disposição da vinhaça (cujos contornos e recrudescimento são objeto do item 1).

Dentre essas possibilidades, particular atenção é voltada aos avanços alcançados pela digestão anaeróbia (item 4). De acordo com a análise aqui desenvolvida, os esforços voltados para viabilizar estes avanços se baseavam na crença dos diferentes agentes envolvidos, dos executores da pesquisa às agências financeiras, passando inclusive pelos usuários finais (a indústria), no advento de um novo paradigma tecnológico, a biotecnologia, sob os auspícios do qual se entreviam resultados econômicos promissores. Esse fato, segundo nosso ponto de vista, pode ser encarado como um fator determinante dos processos de busca ou de exploração da alternativa tecnológica representada pela digestão anaeróbia da vinhaça.

Uma análise *ex-post* demonstra que, a despeito dos esforços envidados e dos avanços alcançados, a digestão anaeróbia não conquistou seu espaço como alternativa para destinação da vinhaça. De acordo com a interpretação do presente estudo, a explicação para este fracasso reside no fortalecimento da trajetória representada pela fertirrigação (comentada no item 5). Este fortalecimento foi conquistado fundamentalmente graças a seu baixo custo e a sua simplicidade tecnológica. Argumentamos que diversos aperfeiçoamentos menores ou incrementais, principalmente quanto aos sistemas de aplicação da vinhaça no solo, reforçaram a consolidação e a continuidade da trajetória da fertirrigação. Hoje, aparentemente, a destinação da vinhaça não é mais colocada como uma grande preocupação. Apesar disso, há aqueles que se questionam sobre os possíveis impactos ambientais da fertirrigação, colocando suspeitas quanto a uma possível contaminação dos aquíferos subterrâneos.

Partindo de reflexões sobre este estudo de trajetória tecnológica, defendemos que a compreensão dos motivos que levam os sistemas produtivos a se tornarem "prisioneiros" de certas formas tecnológicas (o chamado fenômeno de "*lock-in*") são de especial interesse quando se trata de incentivar a criação ou a adoção das chamadas tecnologias "mais limpas".

Consideramos, ainda, que a perspectiva teórica evolucionista - adotada neste artigo e cujos conceitos aqui empregados são abordados no item 2 - é de grande utilidade para o estudo das possíveis interferências cruzadas entre a mudança tecnológica e a problemática ambiental. Ao revelar padrões tecnológicos que explicam a permanência de algumas tecnologias organizadas de forma sinérgica em sistemas ou paradigmas e as dificuldades de ruptura e de introdução de novas alternativas, estudos formulados a partir desta perspectiva podem contribuir, segundo entendemos, para uma melhor compreensão dos fatores envolvidos no surgimento de novas trajetórias tecnológicas. Assim, partindo de uma perspectiva evolucionista da mudança tecnológica, pretende-se com este artigo contribuir para a identificação de questões pertinentes aos papéis das Políticas Ambientais e de Ciência e Tecnologia (C&T) na modelagem de opções produtivas "mais limpas".

1. O problema da destinação da vinhaça

A vinhaça é um subproduto do processo de fabricação de etanol a partir da destilação do caldo fermentado da cana-de-açúcar. Durante décadas, mesmo quando ainda não era gerada nos grandes volumes atuais, a vinhaça já provocava nos órgãos de controle ambiental e particularmente na comunidade científica alguma preocupação quanto a seus impactos sobre a qualidade dos recursos naturais.¹ O trabalho de Almeida (1952, *apud* Szmrecsányi, 1994), já mostrava que o tema despertava a atenção de cientistas e era objeto de estudos nas décadas de 40 e 50, época em que o

¹ Para uma discussão sobre a qualidade ambiental na indústria canavieira, consultar, por exemplo, o trabalho de Chen & Green (1993). Exposições sobre os problemas ambientais associados ao ProAlcool podem ser encontradas em La Rovere (1981), Guarnieri & Januzzi (1992) e Cortez *et alii* (1998b).

resíduos era despejado nos mananciais de superfície - prática que à qual se recorreu ainda por muito tempo.

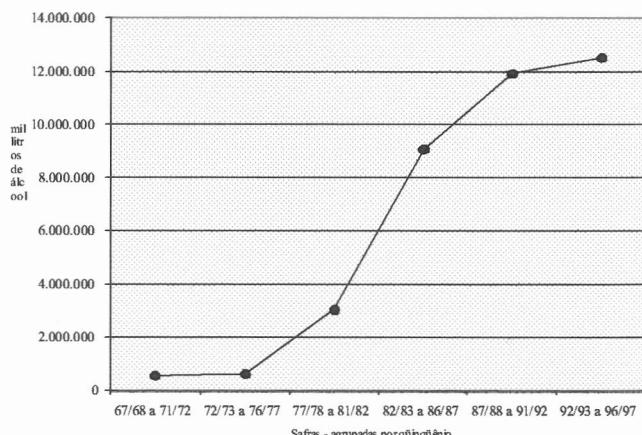
Com a implementação do Programa Nacional do Álcool (ProAlcool), contudo, os danos ambientais causados à flora e à fauna desses mananciais, principalmente devido à carga orgânica da vinhaça, adquiriram uma dimensão preocupante.

A relevância do problema ambiental da destinação da vinhaça se associa à importância econômica histórica da própria agroindústria canavieira em nosso país. O Estado de São Paulo, em particular, já ocupava o lugar de maior produtor nacional de cana-de-açúcar mesmo antes da institucionalização do ProAlcool em 1975.²

O Programa Nacional do Álcool foi criado, como se sabe, com o objetivo de promover a substituição de parte da gasolina utilizada em veículos leves por álcool hidratado, como parte de um conjunto de providências adotado pelo Governo Federal para reduzir o impacto da elevação dos preços do petróleo nas décadas de 1970 e 1980.

Desde meados da década de 70 até o final dos anos 80, esse estímulo à produção de álcool como combustível alternativo à gasolina deu novo impulso à agroindústria canavieira no país. O Gráfico 1 mostra que, com a implementação do ProAlcool, a produção nacional de etanol mudou de patamar. Dos 638 milhões de litros anuais, que se produzia em média na primeira metade da década de 70, a produção aumentou a taxas crescentes até meados da década de 80 (quando a curva do crescimento da produção apresenta uma inflexão, apresentando a partir de então um crescimento a taxas decrescentes), atingindo, atualmente, o volume aproximado de 16 bilhões de litros anuais. Deste volume total, observa Scheleider (1998), cerca de 15 bilhões são álcool combustível.

Gráfico 1 - Evolução da Produção Nacional de Álcool
- volumes anuais médios produzidos agrupados por quinquênios -



Fonte: Dados do Workshop “Agroindústria Canavieira e o Novo Ambiente Institucional” (1998).

A evolução da produção de álcool permitiu que a produção nacional de carros funcionando exclusivamente a álcool atingisse 96% em 1985. Entretanto, a crescente produção de etanol no Brasil levou, inevitavelmente, ao aumento da produção da vinhaça, agravando, portanto, o problema do destino do resíduo. Como cada litro de álcool origina cerca de 12 litros de vinhaça, o crescimento da produção deste resíduo foi vertiginoso. O volume de vinhaça gerado anualmente no país pode ser estimado, de acordo com dados apresentados por Hassuda (1989) tendo em vista a produção atual de álcool, em algo em torno de 192 bilhões de litros. Os dados sobre a evolução da geração de vinhaça são apresentados no Gráfico 2.

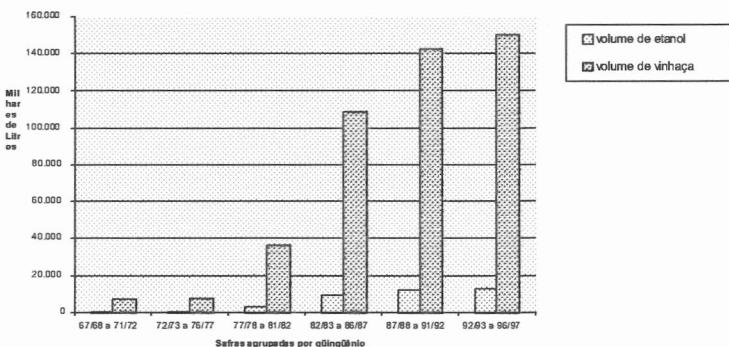
Até o final dos anos 70, quando a prática foi proibida, volumes crescentes de vinhaça eram lançados nos mananciais superficiais, principalmente os cursos d’água como rios e ribeirões das

² O Programa Nacional do Álcool foi instituído pelo decreto nº 76.593, de 14/11/1975.

proximidades das usinas de açúcar e álcool ou, alternativamente, nas chamadas "áreas de sacrifício".³

Os efeitos decorrentes desta prática são conhecidos há muito tempo. A carga orgânica da vinhaça causa a proliferação de microorganismos que esgotam o oxigênio dissolvido na água, destruindo a flora e a fauna aquáticas e dificultando o aproveitamento dos mananciais contaminados como fonte de abastecimento de água potável. Ademais, de acordo com Almeida (1952, *apud* Szemrecsányi, 1994), o despejo da vinhaça nos cursos d'água, além de provocar mau cheiro, contribui para o agravamento de endemias como a malária, a amebíase e a esquistossomose.

Gráfico 2 - Evolução da produção anual de etanol e da geração de vinhaça pela agroindústria canavieira no Brasil de 1967 a 1997. Médias calculadas em milhares de litros para as safras agrupadas por quinquênios.



Fonte: Construído a partir de dados apresentados no Workshop “Agroindústria Canavieira e o Novo Ambiente Institucional” (1998), em Hassuda (1989) e Gloeden *et alii* (1992).

Como é possível constatar no Quadro 1, a partir da safra de 78/79 ficou interditado o despejo da vinhaça nos mananciais superficiais, incorrendo em multa a Usina que violasse a proibição.

Quadro 1 - Evolução da regulamentação da disposição da vinhaça

Legislação	Descrição
Portaria MINTER nº 323, de 29/11/1978	Proíbe o lançamento da vinhaça nos mananciais superficiais.
Resolução CONAMA nº 0002, de 05/06/1984	Determinação da realização de estudos e apresentação de projeto de resolução contendo normas para controle da poluição causada pelos efluentes das destilarias de álcool e pelas águas de lavagem da cana.
Resolução CONAMA nº 0001, de 23/01/1986	Obrigatoriedade da Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) e do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) para novas indústrias instaladas ou qualquer ampliação efetuadas nas já existentes.
Lei nº 6.134, de 02/06/1988, art. 5º, do Estado de São Paulo.	“Os resíduos líquidos, sólidos ou gasosos, provenientes de atividades agropecuárias, industriais, comerciais ou de qualquer outra natureza, só poderão ser conduzidos ou lançados de forma a não poluírem as águas subterrâneas”.

Fonte: Hassuda (1989).

Hassuda (1989) ressalta que o Estado de São Paulo conta com legislação sobre a contaminação de aquíferos subterrâneos desde 1988 (ver Quadro 1, acima) e que, até então, não havia na esfera

³ Em entrevista concedida à autora, o Prof. Dr. Aldo Reboças esclarece que a vinhaça despejada em "áreas de superfície" também pode atingir os mananciais de superfície que drenam a área.

federal nenhuma legislação a esse respeito. De fato, somente em 1999 foram concebidas medidas de proteção dos aquíferos subterrâneos (MMA, 1999).

Veremos que, com a perspectiva do aumento substancial da produção de vinhaça e tendo em vista o aumento do controle sobre a disposição do resíduo, surgiram diversas iniciativas de "busca" de tecnologias para solucionar o problema. Neste sentido, percebe-se que a política ambiental (neste caso via legislação ambiental) pode ter um papel ativo na "seleção" de possibilidades tecnológicas. "Busca" e "seleção" são dois dos conceitos evolucionistas que empregamos neste estudo, conforme esclarecemos no próximo item.

2. Conceitos evolucionistas empregados neste estudo

A representação da tecnologia no conjunto das análises econômicas mais convencionais é formulada como uma combinação de fatores, definida tanto quantitativa como qualitativamente em relação a determinados níveis de produção, enquanto que o progresso técnico é, dentro desse mesmo conjunto, definido como mudanças da posição da curva de possibilidades de produção.

A abordagem evolucionista, que se constituiu teoricamente em grande medida em contraposição a essas representações da tecnologia e do progresso técnico, oferece uma análise tal da tecnologia que coloca, sob inspiração dos trabalhos de Schumpeter, a dinâmica tecnológica em economias capitalistas como motor de seu desenvolvimento.

Uma técnica é, segundo Freeman (1982), um método ou um equipamento tangível de produção, enquanto tecnologia é mais usada para indicar um conjunto de conhecimentos com relação às técnicas, mas pode ser também utilizada para designar essas últimas diretamente.

Se as análises convencionais se desenvolveram, é possível dizer, emprestando conceitos à mecânica, a visão evolucionista foi influenciada de maneira decisiva pela teoria da evolução, das ciências biológicas. Assim como a Biologia tem na teoria da evolução uma teoria geral da mudança das espécies, a visão evolucionista constitui, como colocaram Nelson & Winter (1982), uma tentativa sistemática de construir uma teoria geral da mudança em economia.

Trata-se de identificar, em referência a uma inspiração biológica, nos comportamentos dos agentes econômicos: a) elementos de permanência ou hereditariedade, b) um princípio de variações ou mutações e c) mecanismos de seleção. Neste item, abordaremos os principais conceitos que emprestamos da abordagem evolucionista para a condução deste trabalho, sempre que possível com referência a essas três noções que representam um papel de articulação da abordagem.

Os **elementos de permanência ou hereditariedade** têm em economia, segundo a perspectiva evolucionista, o mesmo papel que os genes em biologia. Esses genes tomam, então, a forma de rotinas aplicadas pelos agentes econômicos e que fundamentam seus comportamentos.

Estando na base dos comportamentos dos agentes, em particular das organizações, a noção de rotina é central em toda representação evolucionista. Nelson & Winter (1982) empregam o termo de uma maneira bastante flexível, com referência a uma atividade repetitiva que se consubstancia no interior de uma organização como um todo, mas que também é vinculada à expressão de competências individuais. Desse modo, o desempenho das tarefas no cotidiano de uma organização envolve competências múltiplas, que proporcionam à mesma um "repertório" de respostas aos problemas que se colocam a sua atuação. Essas respostas não são pautadas pela "otimalidade" (ou maximização), uma vez que são fruto de conhecimentos tácitos de sujeitos que não são "maximizadores perfeitos". O caráter tácito dos conhecimentos é resultado das características cognitivas dos sujeitos, cujos comportamentos são guiados por rotinas.

Assim, entendemos por rotina uma estrutura de comportamento regular e previsível, que conduz a esquemas repetitivos de atividade, que constituem a memória de uma organização. A repetição e a experimentação, que caracterizam as rotinas, fazem com que as tarefas sejam executadas de maneira progressivamente melhor e mais rápida, fazendo com que novas oportunidades de operação sejam incessantemente experimentadas. A repetição e a experimentação estão na base da aprendizagem, processo fundamental na perspectiva evolucionista: é por meio da aprendizagem que são construídos os comportamentos. É por esta razão que as rotinas podem ser consideradas, como enfatiza Ménard (1997), como procedimentos eficientes estocagem de informação e de interpretação de sinais provenientes de fora da organização. As rotinas são uma espécie de memória organizacional.

Assim, tendo suas características moldadas pela aprendizagem que toma lugar no desenrolar das rotinas, os micro-comportamentos dificilmente podem ser reduzidos a um princípio de racionalidade invariante. A proposta evolucionista de interpretação dos comportamentos dos agentes se caracteriza, portanto, pela recusa das hipóteses de maximização e da racionalidade substantiva, que são fundamentos da interpretação convencional (ou neoclássica).

Entretanto, as rotinas não são todas equivalentes.

Já dissemos que a abordagem evolucionista identifica um princípio de **variações e de mutações**. De fato, o "evolucionismo" se concentra nas propriedades dos sistemas econômicos cuja dinâmica é movida de modo interno pela emergência persistente de inovações em produtos, processos, formas de organização, mercados e fontes de matérias primas. Existe, pois, segundo essa perspectiva teórica, um princípio dinâmico que leva a evoluções, princípio pode ser encontrado nos comportamentos de busca (*search*), que estão na base das inovações. Em outras palavras, são comportamentos que asseguram as transformações.

Para compreender o princípio da variação é útil distinguir, como sugere Dosi (*apud* Kemp, 1997), entre rotinas "estáticas" (consistentes na simples repetição de práticas anteriores) e "rotinas dinâmicas" (aqueelas direcionadas a novas aprendizagens, isto é, rotinas que são capazes de criar novas rotinas).

A noção de "rotina dinâmica", de Dosi, equivale ao conceito de comportamento de busca, proposto por Nelson & Winter (1982), que designa processos genuinamente associados a risco, feitos de "tentativas e erros".

A justificativa dos comportamentos de busca, imersos que são em um ambiente de profunda e ubíqua (*pervasive*) incerteza, pode aparecer apenas ulteriormente - ou pode simplesmente não aparecer. São as práticas de busca que permitem a inovação e, portanto, a mutação de firmas, indústrias e do próprio sistema econômico como um todo.

Ao cunhar o conceito de busca, Nelson & Winter (1982) rejeitam que a inovação seja simples resultado de análises do tipo custo-benefício. Se as rotinas de busca, materializadas nas atividades de pesquisa e desenvolvimento, são permeadas por um tipo muito especial de incerteza (de natureza não-Bayesiana ou não-probabilística), a inovação passa a ser um processo guiado por uma heurística de busca, com base em experiências prévias, tentativas, sucessos e fracassos. Trata-se de uma visão de "processo" em que a inovação não é fruto de um cálculo de otimização, mas sim do recurso a uma heurística, isto é, a regras e procedimentos que são expressão de uma racionalidade confinada aos limites cognitivos dos agentes envolvidos (em contraposição à visão convencional de indivíduos "maximizadores"), lidando com informações apenas imperfeitamente disponíveis (em oposição à hipótese de plena informação que subjaz às análises convencionais). Dessa forma, segundo nos permitem afirmar Nelson & Winter (1982), a heurística que caracteriza o processo de busca é fundamentada em conhecimentos humanos limitados e acumulados ao longo do tempo que, embora não estejam voltados à obtenção de soluções "ótimas" ou "maximizadoras", permitem a geração de inovações.

É importante ressaltar, ainda, que a inovação possui um caráter de processo voltado à "solução de problemas" técnico-econômicos - *problem-solving*, na terminologia empregada por Dosi (1988).

Não se deve assumir que a busca da solução de problemas, de novos produtos e/ou processos tome a forma de um fenômeno aleatório. A abordagem evolucionista avança diversas razões que fundamentam o caráter não randômico da inovação, como é possível verificar nos parágrafos abaixo.

O caráter de "solução de problemas" da inovação já define, per se, certas questões ou "áreas-problemas" como relevantes para investigação. Assim é que Rosenberg (1976) ilustra a importância de "dispositivos de focalização" (*focusing devices*), que são problemas típicos, oportunidades ou metas que tendem a ajustar o processo de busca a direções particulares. Pode-se falar, de acordo ainda com Rosenberg, em "imperativos tecnológicos" (*technological imperatives*) que guiariam a evolução de certas tecnologias, ou em "gargalos tecnológicos" em certos processos (*technological bottlenecks*), ou ainda em "pontos fracos evidentes" (*evident weak spots*) em produtos, que se constituiriam em alvos claros para aperfeiçoamentos. Existiriam, então, sinais evidentes que poderiam se constituir a meta para os projetos de P&D, delineando o que Nelson & Winter (1977) chamaram de "trajetórias naturais", que expressam, dessa forma, um certo "moto interno" (*momentum*) da mudança tecnológica.

Para evitar mal-entendidos, é preciso dizer que o que chamamos aqui de "moto interno" está mais relacionado, em primeiro lugar, aos limites das capacidades cognitivas dos agentes envolvidos no processo de busca do que propriamente a uma "auto-determinação" tecnológica. Isso fica evidente quando os autores esclarecem que seu conceito de "regime tecnológico" é mais cognitivo, "relacionado às crenças dos técnicos sobre o que é factível ou pelo menos válido de se tentar. Por exemplo, o advento da aeronave DC3 nos anos 1930 definiu um regime tecnológico particular ...Por mais de duas décadas, a inovação em desenho de aeronaves evoluiu essencialmente uma melhor exploração desse potencial..." (Nelson & Winter, 1977:57).

O conceito de regime tecnológico, de Nelson & Winter (1977) é, de certa forma, retomado por Dosi (1982), que propõe, em analogia com as contribuições sobre a estrutura das revoluções científicas proposta por Kuhn, a noção de paradigma tecnológico, que é definido como um modelo ou um padrão de solução de problemas tecnológicos "selecionados", formulados com base em princípios derivados das ciências naturais, por meio do emprego de tecnologias materiais selecionadas. Aqui, novamente, o que temos chamado de moto interno da mudança tecnológica também tem nas limitações cognitivas dos agentes envolvidos no processo de busca um fator determinante:

"Os paradigmas tecnológicos têm um poderoso 'efeito de exclusão': os esforços e a imaginação tecnológica dos engenheiros e das instituições em que eles se inserem estão focalizados em direções bastante precisas, estando eles - por assim dizer - "cegos" com respeito a outras alternativas tecnológicas" (Dosi, 1982: 153).

Podemos dizer que uma característica importante de um paradigma tecnológico é que existe uma "estrutura cognitiva" que envolve a forma de interpretação do problema e os princípios empregados para sua solução a qual é partilhada por toda a comunidade tecnológica e pelos atores econômicos, com base na qual procura-se melhorias em eficiência de processo e desempenho de produto.

A importância da dimensão cognitiva na abordagem evolucionista coloca aprendizagem - que tem lugar, como já mencionamos, no desenrolar das rotinas - como elemento chave na compatibilização da diversidade dos conhecimentos individuais dentro de uma organização, conferindo coerência a suas decisões.

Um paradigma tecnológico, de acordo com Dosi (1988), define as necessidades que devem ser satisfeitas, os princípios científicos utilizados nessa tarefa e a tecnologia material a ser usada. Dentro de um paradigma tecnológico, existe um "padrão de atividade normal de solução de problemas, isto é, de progresso dentro [desse] paradigma tecnológico" (Dosi, 1982:152), a que o autor chama de "trajetória tecnológica".

Assim, a existência de padrões relativamente organizados de inovação é explicada por Dosi (1988) pela busca do aperfeiçoamento de trade-offs técnico-econômicos. Essa busca específica é explicada a partir da própria forma de organização do conhecimento tecnológico segundo paradigmas, o que faz, de acordo com o autor, com que as atividades de inovação tendam a ser seletivas, realizadas em direções bastante precisas e cumulativas no que diz respeito à aquisição de capacitações para solução de problemas.

O aperfeiçoamento desses *trade-offs* pode ser compreendido como o aperfeiçoamento de um "desenho dominante" (*dominant design*). Há, pois, possibilidades de continuidade do desenvolvimento tecnológico que são, em geral, bem percebidas pelos engenheiros e técnicos. Como afirma Rosenberg (1982), o conhecimento tecnológico cresce de forma dependente do conhecimento acumulado anteriormente - trata-se da característica de *path-dependence* da construção desse conhecimento e das próprias trajetórias tecnológicas.

Os efeitos da acumulação do conhecimento no desenvolvimento de tecnologias sobre a conformação de certos padrões de mudança tecnológica pode ser compreendido a partir do conceito de retornos dinâmicos crescentes, de Arthur (1988). Examinando a expansão histórica da adoção do teclado QWERTY para máquinas de escrever, Arthur (1988) observou o auto-reforço ao qual estão sujeitas as escolhas tecnológicas em razão dos retornos dinâmicos crescentes derivados da ampliação da adoção. Embora o teclado QWERTY não represente a melhor possibilidade para o conforto e rapidez da atividade de datilografia, o treinamento e a qualificação de datilógrafo(a)s no uso deste teclado contribuiu para sua padronização nas máquinas de datilografia. Por sua vez, essa padronização fez crescer o interesse pela aquisição de qualificação e treinamento neste tipo de teclado. Este auto-reforço, segundo sugere o autor, é um fenômeno que pode levar ao aprisionamento (fenômeno a que deu nome de *lock-in*) do progresso tecnológico em determinadas

soluções, que não são necessariamente, as mais desejáveis. A "estória" do teclado QWERTY, como é narrada por Arthur (1988), revela como eventos "históricos" podem influenciar os rumos da mudança tecnológica.

Além de estarem relacionadas (e apresentarem interdependências) quanto à evolução da qualificação dos usuários, as tecnologias não se constituem isoladamente. Existem, também, interdependências técnicas. No mais das vezes, as tecnologias se organizam na forma de sistemas tecnológicos, que articulam diversos componentes. Conforme sustenta Rosenberg (1976), uma tecnologia é feita de componentes ou partes inter-relacionadas que definem as características técnicas de um produto e sua produção. A interdependência entre os componentes de uma tecnologia (ou sistema tecnológico) confere a ela certa rigidez: muitas vezes não é possível fazer alterações isoladas em um componente sem comprometer sua compatibilidade com a totalidade do sistema.

Por outro lado, uma vez realizada uma mudança compatível com o sistema, torna-se impossível o retorno à situação anterior. Assim, o conceito de trajetória tecnológica, além *path-dependent*, implica irreversibilidade: a noção de que uma vez alcançada uma nova posição ou um novo patamar no progresso da trajetória, não existe possibilidade de volta à situação anterior.

Uma razão essencial para o fenômeno da irreversibilidade, segundo Willinger & Zuscovitch (1993), está na passagem de um certo "patrimônio tecnológico" - para recorrer mais uma vez à analogia biológica com "patrimônio genético" - de uma a outra geração.⁴

Os conceitos apresentados acima, como *path-dependence*, cumulatividade, irreversibilidade e *lock-in* - são articulados pela abordagem evolucionista para o entendimento da dinâmica tecnológica e são consistentes com a idéia de que existem certos padrões no progresso tecnológico. De fato, vimos salientando até aqui os aspectos da mudança tecnológica que se associam de forma particular à sobrevivência e ao aperfeiçoamento de determinadas soluções. Seria um engano, entretanto, supor que a existência de padrões tenha como consequência a homogeneidade ou que ela pressuponha continuidade.

Quando mencionamos anteriormente que as rotinas não são todas equivalentes, explicitamos que não existe uma homogeneidade nos processos de busca. Ao contrário, as ações envidadas no âmbito desses processos são movidas por uma lógica que é pautada pela criação de diferenças, de diversidade ou de "mutações", para usar mais uma vez a analogia biológica.

Já falamos sobre o elemento de mutação, do princípio da diversidade que se subjaz à lógica da persecução de rotinas de busca. São os processos de busca que tornam, enfim, possível a mudança econômica; daí a idéia de "evolução" dos sistemas econômicos.

Então, o que leva as organizações a empreender os arriscados processos de busca e a engendrar as condições de ruptura com soluções tecnológicas precedentes é, antes de mais nada, a busca pela criação de posições diferenciadas nos mercados. Mais do que a busca pela sobrevivência, trata-se aqui de uma busca por "desequilíbrios", por assimetrias. A competição capitalista é a base da lógica do comportamento inovativo.

A diversidade é, de acordo com a proposta evolucionista, fator necessário para a operação do mecanismo de seleção.

Assim, é possível afirmar, como esclarecem Nelson & Winter (1982), que a inovação não tem apenas determinantes internos. Pelo contrário, a decisão de desenvolver uma inovação depende de características do ambiente seletivo, que por sua vez sofre influência da mudança tecnológica. Existe a percepção, portanto, de uma co-evolução entre a mudança tecnológica e o ambiente seletivo.

A idéia de ambientes seletivos pertence à interpretação evolucionista segundo a qual existem **mecanismos de seleção** que agem sobre os "genes" (rotinas, processos de busca) e sobre as "mutações" (inovações). Estes mecanismos, agindo como "filtro" que seleciona entre diferentes evoluções possíveis, são constituídos por fatores que formam o ambiente seletivo no qual as firmas atuam.

⁴ Patrimônio tecnológico é conceito análogo ao de "base de conhecimento" (*knowledge base*), de Nelson & Winter (1982), que se refere a um conjunto que envolve um código de linguagem, uma gama de conhecimentos técnicos e uma experiência.

O mecanismo de seleção opera sobre as estratégias formuladas a partir dos processos de buscas (de elevado conteúdo firma-específico), determinando não apenas o paradigma tecnológico que irá vigir, mas também influenciando a formação da própria estrutura do mercado. Deste modo, o processo de seleção se constitui, dentro da abordagem evolucionista, como um mecanismo de transmissão entre as estratégias das firmas e a estrutura de mercado.

É sabido que muitas vezes os problemas ambientais têm origem nos efeitos do uso de certas tecnologias já bem estabelecidas. O conhecimento necessário para a identificação das causas desses problemas, seus efeitos sobre os mais diversos componentes do complexo sistema que constitui o meio natural e suas implicações sobre a sociedade são tarefas, está claro desde logo, a ser executadas a partir de perspectivas necessariamente multidisciplinares. O que advogamos aqui é que a solução desses problemas significa, freqüentemente, romper trajetórias tecnológicas existentes. É nesta perspectiva, segundo entendemos, que a abordagem evolucionista das mudanças tecnológicas pode ser frutífera, auxiliando a análise dos elementos que contribuem para a estabilidade das trajetórias tecnológicas já estabelecidas e permitindo a identificação dos fatores que podem dar origem a rupturas dessas trajetórias.

Assim, acreditarmos que o estudo da formação de novas trajetórias tecnológicas sob condições de restrição ou de oportunidade ambiental, numa abordagem evolucionista, pode ser uma primeira aproximação para que se formulem estratégias para operacionalizar ações para favorecer mudanças tecnológicas "mais limpas". É por esta razão que optamos por uma perspectiva evolucionista, como pode ser constatado nas próximas seções, para o estudo do feixe de possibilidades ou alternativas tecnológicas em desenvolvimento principalmente durante os anos 70 e 80 para a destinação da vinhaça e dos determinantes do estabelecimento da fertirrigação como solução "vencedora", amplamente adotada pela agroindústria canavieira do Brasil.

3. Um feixe de possibilidades tecnológicas

Com a interdição do lançamento da vinhaça em rios e aquíferos superficiais, a questão sobre o que fazer da vinhaça a partir de então passou a fazer parte da pauta da pesquisa tecnológica, seja de grupos de cientistas, seja de pesquisadores individuais, tanto em instituições públicas de pesquisa quanto na própria agroindústria canavieira.

As alternativas tecnológicas para o destino da vinhaça estudadas no âmbito deste artigo, em que pese seus variados graus de amadurecimento tecnológico, podem ser divididas segundo seu estado de desenvolvimento nos anos 80.⁵ A aerobiose, a reciclagem na fermentação e a fertirrigação já se encontravam em um tal estágio de desenvolvimento que era possível sua utilização em ampla escala. A combustão, a produção de levedura, o uso na construção civil e na fabricação de ração animal, bem como a digestão anaeróbia encontravam-se em desenvolvimento, cada uma delas em graus diferenciados de amadurecimento e de intensidade de pesquisa. No contexto deste artigo, essas alternativas, seus principais benefícios e dificuldades são apresentados apenas brevemente nos parágrafos abaixo.⁶

A aerobiose consiste no tratamento da vinhaça como esgoto em duas fases, onde a primeira é anaeróbia e a segunda é aeróbia. A principal vantagem é a grande redução de DBO (70 a 90% no primeiro passo) e até 99% no segundo. Os principais problemas derivados dessa opção são associados à necessidade de construção, manutenção e monitoramento de grandes tanques ou lagoas para o tratamento, devido aos grandes volumes do resíduo.

A reciclagem da vinhaça na fermentação é um expediente empregado para substituir a água como diluidor (razão 1:3 entre vinhaça e água). A existência de um limite técnico no aproveitamento da vinhaça para este fim impede que a redução da descarga de vinhaça, embora efetiva, possa ser muito significativa.

A fertirrigação já era uma alternativa conhecida há muito tempo. Despejada *in natura* no solo, a vinhaça irriga e, ao mesmo tempo, fertiliza a lavoura, razão pela qual ela traz o duplo benefício da disposição da vinhaça e da economia de custos em insumos, ao diminuir os gastos com fertilizantes

⁵ Para uma apresentação dos subprodutos do processamento da cana de açúcar, consultar Cortez *et alii* (1992) e Chen (1993).

⁶ Com respeito ao detalhamento de cada uma das tecnologias, cf. PROMON (1979). Para uma exposição sintética, consultar Szemrecsányi (1994) e Margulis (1982).

químicos. No item 5 serão tratados de maneira mais detalhada os benefícios e problemas dessa alternativa.

A combustão da vinhaça é a alternativa em que o resíduo é concentrado e queimado na caldeira. O consumo elevado de energia para evaporar a água da vinhaça, contudo, não compensa ainda a economia de energia na destilaria.⁷ As pesquisas nesta alternativa devem buscar a melhoria do balanço energético.

A produção de levedura a partir da vinhaça também é uma tecnologia alternativa que permite reduzir a descarga de vinhaça. Contudo, dois fatores concorrem para a elevação dos custos desta alternativa. Em primeiro lugar, o fato de que se deve acrescentar à vinhaça sais de amônia e de magnésio para se obter o fermento seco. Em segundo lugar, e talvez o mais importante, o fato de ser elevado o consumo de energia para a evaporação da água da vinhaça, requerida neste processo. Na construção civil, a vinhaça pode ser adicionada à massa de cimento. Também existem estudos sobre a fabricação de materiais de construção, principalmente tijolos, a partir da vinhaça, tendo sido feitos avanços significativos quanto à resistência do material obtido. A possibilidade de redução da descarga de vinhaça é limitada, entretanto, uma vez de que a viabilidade econômica desta alternativa deve se restringir a construções próximas ao local de origem da vinhaça, devido ao problema dos custos de transportes.⁸

A fabricação de ração animal a partir da vinhaça também é uma possibilidade estudada durante os anos 80. O resíduo deve ser tratado para a redução do nível de potássio, podendo ser utilizado como ração de bovinos, suínos e aves. Reporta-se que a ração assim produzida não interfere no sabor ou odor do leite e seus derivados, que tem boa aceitação pelos animais e que a taxa de conversão (ganho de peso com relação ao consumo de ração) é adequada. Há, porém, limitações de dosagem que devem ser obedecidas. Em ruminantes, por exemplo, a ração feita da vinhaça não pode ultrapassar 10% da alimentação diária: em suínos, ela não deve ultrapassar de 2 a 3%. As pesquisas, realizadas desde a década de 70, buscavam a redução de potássio, da DBO e o aumento da aceitabilidade.

A digestão anaeróbia da vinhaça, cujo desenvolvimento será tratado em maior detalhe no próximo item, tem a seu favor o argumento econômico da produção do metano. O desenho e aperfeiçoamento do equipamento (reator ou biodigestor) contou com esforços envolvendo diversas Instituições públicas (o IPT, a Cetesb e a COPPE) e privadas (a PAISA - Penedo Agroindustrial S/A, a Biometano e as Usinas São Martinho e Boa Vista, ambas no Estado de São Paulo). Problemas técnicos, como o longo tempo de retenção e a granulação do lodo de microorganismos, foram superados e a digestão anaeróbia da vinhaça é hoje considerada tecnicamente viável, sendo possível encontrar uma unidade (de escala industrial) em operação na Usina São Martinho (Pradópolis, SP). A eliminação da DBO, embora grande, não dispensa o tratamento posterior, *end-of-pipe*. A viabilidade econômica desta tecnologia, entretanto, é tolhida por três fatores, pelo menos. Em primeiro lugar, a falta de valorização do biogás, como combustível alternativo; em segundo lugar, a difusão bem sucedida da fertirrigação, que não sofreu nenhum controle ambiental mais rigoroso; e, em terceiro lugar, o declínio do ProAlcool, que não permitia investimentos.⁹

4. Desenvolvimento e abandono da digestão anaeróbia como tratamento da vinhaça

O direcionamento de esforços - seja em termos de recursos financeiros, seja na forma do empenho no desenvolvimento de competências técnico-científicas - na busca do tratamento microbiológico da vinhaça no início dos anos 80 deve ser compreendido à luz daquilo que pareciam ser, aos olhos dos observadores da época, sinais da possível emergência de um novo paradigma: o da biotecnologia.

Os esforços de desenvolvimento de competências técnico-científicas em biotecnologia nos anos 80 podem ser observados tanto em universidades e Instituições Públicas de Pesquisa como em laboratórios industriais. Os principais grupos de pesquisa vinculados a universidades que

⁷ Entrevista com o Prof. Dr. Luiz Cortez, FEAGRI/Unicamp.

⁸ Entrevista com o Prof. Dr. Wesley Freire, FEAGRI/Unicamp.

⁹ Entrevista com o Dr. Américo Craveiro, VALÉE. O entrevistado ressalta que não é da opinião de que deveria ter havido um maior controle ambiental da fertirrigação; sustenta, entretanto, que se este controle tivesse ocorrido, haveria existido um estímulo maior à adoção da digestão anaeróbia.

contribuíram de algum modo para o desenvolvimento da digestão anaeróbia da vinhaça pertenciam às três universidades estaduais paulistas (USP, UNICAMP e UNESP) e à Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). As Instituições Públicas que realizavam P&D e que tiveram papel central no desenvolvimento da digestão anaeróbia da vinhaça foram, por sua vez, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e a Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental (Cetesb). Os principais laboratórios industriais envolvidos foram a Biometano (pequena empresa de biotecnologia), a Penedo Agroindustrial S/A (PAISA, que é uma destilaria de Penedo, AL) e a Usina São Martinho (Pradópolis, SP).¹⁰

Em um setor de baixa intensidade tecnológica, como é o caso do setor sucro-alcooleiro, seria surpreendente o envolvimento da destilaria PAISA e da Usina São Martinho nas atividades de P&D da digestão anaeróbia. Se desde logo este envolvimento é explicado por características pessoais dos empresários dirigentes dessas empresas, não se pode deixar de lado suas expectativas quanto ao futuro da biotecnologia e quanto ao retorno financeiro de seus investimentos.

Rosenberg (1982) já observara o modo pelo qual a tecnologia pode modelar a ciência em condições industriais, ou seja, pela determinação da agenda de pesquisas. Neste sentido, pode-se dizer que a perspectiva de desenvolvimento da biotecnologia associada à expectativa de resultados econômicos promissores do uso da via biotecnológica para geração de energia (biogás) certamente atuaram como fatores de peso na determinação da agenda de pesquisa científica e tecnológica das Instituições envolvidas no desenvolvimento da digestão anaeróbia.

A expectativa era de que investimentos neste desenvolvimento poderiam gerar, particularmente no contexto pós primeira crise do petróleo (1973), resultados econômicos extremamente atrativos. Era natural que essa possibilidade fosse vista como um rico veio a ser explorado, pois à biotecnologia atribuía-se a capacidade de poder engendrar oportunidades de negócios excepcionalmente lucrativos.

Assim é que em 1975 o IPT começou a investir em capacitação técnico-científica em biotecnologia. Havia uma percepção de que os combustíveis "biológicos" podiam se tornar complementares aos combustíveis fósseis e de que a energia obtida por via biotecnológica, especificamente o biogás, era particularmente promissora. Os trabalhos se iniciaram com a produção de gás a partir de resíduos urbanos, lixo e lodo de esgoto, na Divisão de Química do IPT. A pesquisa em digestão anaeróbia já era uma área em expansão em meados dos anos 70, com estudos empíricos na China e na Índia para uso rural, com a intenção de se produzir energia a partir de resíduos da agropecuária. O IPT a partir de 1975 e, mais tarde, os grupos da Cetesb e da COPPE (UFRJ) contribuíram para o avanço do conhecimento científico nesta área.

No IPT, o grupo montado inicialmente com dois pesquisadores cresceu e deu origem ao Agrupamento de Biotecnologia da Divisão de Química que incorporou o tratamento de outros resíduos, dentre os quais a vinhaça e os efluentes de cervejaria.¹¹

A incorporação do tratamento da vinhaça como objeto das pesquisas desse grupo do IPT se deu entre os anos de 1980 e 1981. As principais motivações que levaram à pesquisa da digestão anaeróbia da vinhaça advinham da perspectiva de reduzir sua carga poluidora, inclusive diminuindo a maior parte de sua demanda química e bioquímica de oxigênio e produzindo, ao mesmo tempo, grande quantidade de energia.¹²

Nesta época, empresas e pesquisadores holandeses haviam desenvolvido reatores de fluxo ascendente (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket - UASB*), solucionando problemas de projeto e de bioquímica. Os pesquisadores do IPT julgavam que, com o auxílio desse tipo de reator, seria possível diminuir significativamente o tamanho dos equipamentos, viabilizando técnica e economicamente o tratamento da vinhaça e a produção de energia.

As principais áreas-problemas a serem resolvidas para o aperfeiçoamento da tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça consistiam em: reduzir o tempo de retenção (que em princípio chegava a ser de 20 ou mais dias e inviabilizava o uso industrial dos reatores) e dominar a granulação do lodo (as

¹⁰ Uma exposição sobre o uso da biodigestão da vinhaça no Brasil pode ser encontrada em Cortez *et alii* (1998a).

¹¹ Consultar Craveiro (1986) para uma referência aos aspectos técnicos e estimativas de custos para sistemas de tratamento anaeróbio, com base em estudos realizados no âmbito do IPT.

¹² Entrevista com o Dr. Américo Craveiro, VALÉE.

bactérias têm de apresentar um determinado nível de agregação para que a digestão seja eficiente). Para solucionar essas áreas-problemas, colocava-se o desafio de projetar e operar reatores modernos (UASB) alimentados por vinhaça.

O processo estudado, neste momento era o mesofílico, ou seja, um processo em que as reações se davam à temperatura de aproximadamente 35°C. Como a vinhaça sai da destilaria com uma temperatura próxima a 100°C, havia a necessidade de resfriá-la antes de alimentar o reator. Na segunda metade dos anos 80, a Usina São Martinho decidiu investir no processo termofílico, em que a temperatura na qual as reações se processam é de cerca de 55°C. A maior vantagem de se trabalhar a essa temperatura é que, neste caso, a velocidade das reações é maior, o que significa que o tempo de retenção é diminuído, podendo então o reator ser ainda menor e levando a ganhos econômicos.

Havia, porém, algumas novas áreas-problemas a serem superadas: por um lado, o sistema termofílico é mais instável do que o mesofílico, devendo ser, portanto, melhor controlado e, por outro lado, como a usina opera de sete a oito vezes por ano, no período de não operação as bactérias não podem ficar sem alimentação. Como no processo mesofílico a temperatura é próxima da do ambiente, a morte de bactérias não é muito relevante. No termofílico supunha-se pelo que já se conhecia que seria muito maior. O processo tinha, como se pode notar dificuldades técnicas inerentes, que foram enfrentadas na Usina. Esses problemas foram resolvidos, possibilitando a construção de pilotos e de um reator em escala industrial.¹³ Entretanto, a tecnologia não chegou a se difundir e o reator da São Martinho, ainda que continue em operação, trabalha apenas com 25% de sua capacidade.

A Usina Boa Vista, também do interior de São Paulo, que chegou a converter toda a sua frota de caminhões para operar com biogás como combustível, optou pela reconversão (ao diesel) no início dos anos 90, por questão de redução de custos de transporte.

Assim, a despeito dos progressos técnicos alcançados pela digestão anaeróbia da vinhaça, inclusive no que diz respeito ao *design* industrial do reator, o processo permanece inviável do ponto de vista econômico.

A viabilidade econômica da digestão anaeróbia da vinhaça apenas se tornaria possível na eventualidade de alteração de alguns fatores que caracterizam o atual ambiente seletivo em que se insere a tecnologia: a) um maior rigor da regulamentação da fertirrigação, b) a valorização do biogás ou inserção das usinas na matriz energética brasileira e c) superação da crise do ProAlcool. De qualquer maneira, a digestão anaeróbia foi uma linha de pesquisa que se desenvolveu bastante no Brasil, criou uma grande capacitação técnico-científica, angariou reconhecimento dos cientistas nacionais junto aos pares no cenário científico internacional (como se pode constatar pelas publicações em periódicos internacionais e pela hospedagem, no Brasil, de importantes eventos científicos relacionados ao tema).

5. O lock-in da fertirrigação como alternativa para a destinação da vinhaça

A constituição da vinhaça, rica em água e minerais, associadas às dificuldades técnicas e econômicas envolvidas em seu tratamento aparecem como as razões arroladas com maior freqüência para justificar a adoção e a ampla difusão da prática vigente para o destino da vinhaça, a fertirrigação. Este é o nome pelo qual ficou conhecida a técnica amplamente adotada pela agroindústria canavieira nacional, notadamente a partir da década de 80 em substituição ao lançamento do resíduo em cursos d'água, a qual consiste na infiltração da vinhaça *in natura* (ou não tratada) no solo, com objetivo de fertilizá-lo e, ao mesmo tempo, de irrigar a cultura da cana-de-açúcar. A fertirrigação é empregada como expediente substituto ao uso da fertilização química, constituindo uma fonte de nutrientes minerais, principalmente de potássio.

Com o aumento da produção da vinhaça ocasionado pela implementação do ProAlcool e com a proibição da descarga do resíduo nos cursos d'água no final dos anos 70, “os técnicos... [encontraram] uma solução alternativa a sua disposição direta nos rios [...] surgindo então a fertirrigação, uma técnica de aplicação da vinhaça *in natura* em áreas plantadas com cana.” Cortez

¹³ Souza *et alii* (1992) narram os avanços realizados com o reator UASB operando com processo termofílico em escala piloto.

et alii (1992:129).¹⁴ As principais razões da ampla difusão (hoje, quase a totalidade das indústrias utiliza a vinhaça produzida para fertirrigação) desta prática, ainda segundo Cortez *et alii* (1992) são:

- i. O baixo investimento inicial requerido (tanques de decantação, caminhões, e atualmente bombas e dutos).
- ii. O reduzido custo de manutenção (pouco pessoal, diesel e eletricidade gerada localmente).
- iii. A rápida disposição da vinhaça no solo (sem necessidade de grandes reservatórios reguladores).
- iv. Os ganhos compatíveis com o investimento (há lucros com a reciclagem do potássio no solo e o retorno do investimento é bastante rápido).
- v. O "fechamento" do ciclo interno que envolve a parte agrícola e a industrial no mesmo setor, diminuindo a dependência de insumos externos (fertilizante).
- vi. O não envolvimento de tecnologia complexa.
- vii. O aumento da produtividade da safra e da produtividade na fabricação do açúcar.

A difusão da fertirrigação se beneficiou, além disso, de uma série de aperfeiçoamentos menores, principalmente no que diz respeito aos métodos de aplicação da vinhaça ao solo. Além disso, estudos científicos confirmam o aumento da produtividade da safra submetida à fertirrigação deve, sem dúvida, ter fornecido um forte incentivo à difusão da prática.¹⁵

Observamos, então, que a ocorrência de sinergias técnicas (desenvolvimento dos sistemas de aplicação da vinhaça ao solo) e a contribuição de retornos econômicos (aumento da produtividade e redução de custos) representaram condições favoráveis ao fortalecimento da trajetória tecnológica da fertirrigação. À medida em que se fortalecia a trajetória, com um número maior de adesões à tecnologia, tornavam-se maiores os riscos dos investimentos em métodos mais complexos e mais caros para a solução do problema da destinação da vinhaça.

Mesmo diante das vantagens proporcionadas pela adoção da fertirrigação, restam ainda dúvidas quanto à adequação da prática do ponto de vista da proteção dos recursos naturais, principalmente no que diz respeito a seus efeitos de longo prazo.¹⁶

O uso de volumes elevados de vinhaça podem fazer aumentar o nível de potássio no caldo da cana. Além disso, há controvérsias sobre salinização do solo e contaminação de aquíferos subterrâneos. Se os efeitos da descarga da vinhaça sobre os mananciais de superfície são bastante conhecidos a ponto de não mais suscitarem disputas, o mesmo parece não ocorrer com os impactos ambientais de sua disposição no solo.

Hirata *et alii* (1991) identificaram a atividade sucroalcooleira como um dos fatores de vulnerabilidade dos aquíferos subterrâneos paulistas. Neste sentido, Hassuda (1989) e Gloeden *et alii* (1992) desenvolveram metodologia para monitoração do risco da contaminação do lençol freático e realizaram estudos ainda não são conclusivos sobre o tema.

Sabe-se, contudo, que a aplicação sem critérios de dosagem da vinhaça ao solo pode causar um desequilíbrio de nutrientes, gerando resultados diferentes daqueles esperados. Plaza Pinto (1999) explica que a dosagem "ideal" de aplicação de vinhaça varia segundo o tipo de solo e segundo as variedades de cana. Os riscos da aplicação de grandes volumes de vinhaça por hectare incluem o perigo de salinização do solo. Infelizmente, não se dispõe de estudos que ofereçam um mapa da situação atual sobre a fertirrigação, detalhando os volumes de vinhaça aplicados, seja por região, seja por produtor.¹⁷ Apesar disso e do fato da grande difusão da fertirrigação, a Copersucar divulgou em 1986, de acordo com Plaza Pinto (1999), a informação de que cerca de 40% da vinhaça produzida no Estado de São Paulo ainda não é aproveitada, sendo descartada em áreas de despejo ou sacrifício, prática que tem sido autorizada com restrições pela Cetesb.

¹⁴ Em comunicação pessoal, o Prof. Dr. Cortez atribuiu a origem da idéia da fertirrigação à adaptação da prática, adotada em muitos países e em pequena escala no interior do Brasil, de utilizar o esgoto doméstico como fertilizante.

¹⁵ Entrevista com o Prof. Dr. Nadir Glória, ESALQ/USP.

¹⁶ O desconhecimento dos efeitos de longo prazo da fertirrigação é apontado por Cortez *et alii* (1992) como uma das desvantagens da fertirrigação.

¹⁷ Entrevista com o Prof. Dr. Nadir Glória, ESALQ/USP.

6. Discussão Final

O volume de vinhaça gerado como subproduto da atividade canavieira cresceu de maneira impressionante com a implementação do ProAlcool. Os instrumentos de política ambiental mobilizados para a regulamentação da atividade foram, conforme vimos, normas sobre a disposição do resíduo, voltadas essencialmente para a proteção dos mananciais de superfície. Naquele momento, foram mobilizados esforços técnico-científicos no sentido da solução do problema, delineando-se um feixe de possibilidades tecnológicas para a destinação da vinhaça.

A fertirrigação, ou o uso da vinhaça não tratada como fertilizante na lavoura canavieira, se colocou nos anos 90 como a solução bem-sucedida. Simples do ponto de vista técnico e eficiente do ponto de vista dos custos, a prática se difundiu rapidamente.

O empenho de recursos e a focalização de competências técnico-científicas no estudo das tecnologias alternativas não resultaram em opções competitivas frente às vantagens tão evidentes da fertirrigação. O problema da destinação da vinhaça atualmente parece não se colocar como tal. Haja vista a elevada quantidade do resíduo gerada no Brasil, a fertirrigação constituiu, sem dúvida, um progresso quando comparada ao expediente anterior, em que a vinhaça era despejada nos mananciais de superfície. Frente à complexidade das outras alternativas pesquisadas, a simplicidade e o baixo custo da fertirrigação a coloca como uma espécie de "ovo de Colombo" para a solução do problema da destinação da vinhaça.

Entretanto, muitas vezes o descarte ou mesmo a fertirrigação se dá em quantidades excessivamente elevadas e/ou próximo dos mananciais de superfície. Em que se pese que os rios drenam (e não "banham") as regiões, ou seja, sendo os cursos d'água verdadeiros sistemas de drenagem das bacias hidrográficas, não se sabe até que ponto uma prática não controlada da fertirrigação pode deixar de comprometer esses recursos.¹⁸

Se é assim, caberia perguntar então se a fertirrigação não teria sido mais um paliativo ou uma prática que confere ao observador a falsa impressão de estar solucionando de fato e com eficiência o problema da vinhaça. Neste caso, e se as suspeitas de contaminação continuarem a ser levantadas, a decisão social pela continuidade dessa prática no longo prazo deverá requerer um estudo detalhado sobre seus impactos ambientais.

Frente a um cenário como este, propomos que se discutam os papéis cabíveis à Política Científica e Tecnológica em termos da busca da redução do nível de incerteza sobre os impactos ambientais das opções tecnológicas vigentes nos sistemas produtivos (por meio do desenvolvimento de tecnologias e instrumentos de observação dos fenômenos de degradação ambiental provocados por esses sistemas e de métodos de avaliação do impacto dessas tecnologias) e da investigação, proposição e exploração de "caminhos" ou "trajetórias tecnológicas" mais limpas a esses sistemas. As políticas ambientais, por sua vez, caberiam tarefas relacionadas com o favorecimento da adoção ou a "seleção" dessas trajetórias.

Finalmente, importa dizer que a opção por tecnologias mais limpas não pode prescindir da coordenação e da atuação complementar dessas duas esferas de intervenção pública.

Bibliografia

- ARTHUR, W. B. Competing technologies: an overview. In: DOSI *et alii* (eds.) Technical change and economic theory. London: Pinter Publishers, 1988.
- CHEN, J. C. P. Byproducts of cane sugar processing. In: J. C. P. Chen & C. C. Chou (Ed.) Cane sugar handbook: a manual for cane sugar manufactures and their chemists. 12 ed. New York, John Wiley & Sons. (1993) Cap. 10, pp. 375-431.
- CHEN, J. C. P., GREEN, J. Environmental quality assurances. In: J. C. P. Chen & C. C. Chou (Ed.) Cane sugar handbook: a manual for cane sugar manufactures and their chemists. 12 ed. New York, John Wiley & Sons. (1993) Cap. 31, pp. 740-776.
- CORTEZ, L. *et alii* Biodigestion of vinasse in Brazil. Int. Sugar Jnl., v.100, n° 1196, pp. 403-413, 1998a.
- CORTEZ, L. *et alii* Environmental aspects of the alcohol program in Brazil. ASAE Annual International Meeting, Orlando, Florida. July 11-16, 1998b.

¹⁸ Entrevista com o Prof. Dr. Aldo Rebouças, IEA/USP.

- CORTEZ, L. et alii Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização. Revista Brasileira de Energia, v. 2, nº 2, pp. 111-146, 1992.
- CRAVEIRO, A.M. Technical aspects and cost estimation for anaerobic systems treating vinasse and bewery/soft drink wastewaters. Water Science and Technology, v. 18, nº 12, pp. 123-134, 1986.
- DOSI, G. Technological paradigms and technological trajectories: a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. Research Policy, 11, pp. 147-162, 1982.
- DOSI, G. Sources, procedures and microeconomic effects of innovation. Journal of Economic Literature, v. 26, nº 3, pp. 1120-71, 1988.
- FREEMAN, C. The economics of industrial innovation. London: Pinter Publishers, 1982.
- GLOEDEN, E. et alii. The behaviour of vinasse constituents in the unsaturated zones in the Botucatu aquifer recharge area. Water Science and Technology, v. 24, nº 11, pp. 147-157, 1992.
- GUARNIERI, L. C., JANUZZI, G. de M. ProAlcool: impactos ambientais. Revista Brasileira de Energia, v. 2, nº 2, pp. 147-161, 1992.
- HASSUDA, S. Impactos da infiltração da vinhaça de cana no aquífero de Bauru. Dissertação de Mestrado IG/USP, 1989.
- HIRATA, R. C. A. et alii Groundwater pollution risk and vulnerability map of the state of São Paulo, Brazil. Water Science and Technology, v. 24, nº 11, pp. 159-169, 1991.
- KEMP, R. Environmental Policy and Technical Change: a comparison of the technological impact of policy instruments. Cheltenham: Edward Elgar, 1997.
- LA ROVERE, E. L. Les impacts sociaux et écologiques du Plan Alcool Brésilien. Économie et humanisme, Paris, nº 260, 1981.
- MARGULIS, S. Vinhoto: poluição hídrica, perspectivas de aproveitamento e interação com o modelo matemático de biomassa. Texto para discussão de energia n. 10. Rio de Janeiro: IPEA/INPES, 1982.
- MÉNARD, C. L'Économie des organisations. Paris: La Découverte, 1997.
- MICT (Ministério da Indústria, Comércio e Transportes) Programa Nacional do Álcool - PROALCOOL. Site consultado em 15/03/1999, às 15:11: <http://www.mict.gov.br/spb/deaa/deaindex.htm>. (1999)
- MMA (Ministério do Meio Ambiente) Site do consultado em 15/03/99 às 17:47: <http://www.mma.gov.br>. (1999).
- NELSON, R. R., WINTER, S.G. In search of useful theory of innovation. Research Policy, 6, pp. 36-76, 1977.
- NELSON, R. R., WINTER, S.G. An evolutionary Theory of Economic Change. Cambridge: Harvard University Press, 1982.
- PLAZA PINTO, C. Tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça e desenvolvimento sustentável. Dissertação de Mestrado, FEM/Unicamp, 1999.
- PROMON Avaliação técnico-econômica de processos de aproveitamento. Centro de Tecnologia PROMON, 1979.
- ROSENBERG, N. Perspectives on technology. Cambridge: Cambridge University Press, 1976.
- ROSENBERG, N. Exploring the Black Box: Technology, Economics, and History. Cambridge University Press, 1982.
- SCHELEDER, E. M. M. A questão do álcool combustível. Seminário sobre a indústria canavieira, Instituto de Economia, Unicamp, Campinas. Site consultado em 15/03/99, às 16:30: http://www.eco.unicamp.br/pesquisa/frame_inic.html. (1998)
- SOUZA, M.E. et alii. Thermophilic anaerobic digestion of vinasse in pilot plant UASB reactor. Water Science and Technology, v. 25, nº 7, pp. 213-222, 1992.
- SZMRECSÁNYI, T. "Tecnologia e degradação ambiental: o caso da agroindústria canavieira no Estado de São Paulo". Informações Econômicas, SP, v. 24, nº 10, pp. 73-81, 1994.
- WILLINGER, M., ZUSCOVITCH, E. Efficience, irreversibilités et constitution des technologies. Strasbourg: Bureau d'Economie Théorique et Appliquée, mimeo, 1993.
- WORKSHOP "Agroindústria Canavieira e o Novo Ambiente Institucional", realizado no Instituto de Economia IE / Unicamp em 24/08/1998. Site consultado em 15/03/1999, às 16:30 : http://www.eco.unicamp.br/pesquisa/frame_inic.html. (1998)

