

ECONOMIA SUSTENTÁVEL E MODELOS AMPLIADOS DE INSUMO-PRODUTO

Valny Giacomelli Sobrinho

Embora cercada de críticas por causa da grande quantidade de dados que requer e de sua forte associação com a planificação econômica, a análise de insumo-produto, desenvolvida por Wassily Leontief, no final dos anos 1930, tem servido a várias políticas de desenvolvimento, inclusive ao desenvolvimento sustentável. Uma versão ampliada (AIP) dos modelos básicos de insumo-produto (BIP) possibilita tratar de problemas relacionados à depleção de recursos naturais e à poluição ambiental, disseminados pelas atividades econômicas de produção e consumo. Os modelos AIP permitem rastrear não só os danos ambientais mais representativos na economia, mas também as indústrias responsáveis por eles. Além disso, como acrescentam elementos não monetários ao arcabouço monetário original, os modelos AIP conseguem mensurar o *throughput* – o custo biofísico de manutenção dos estoques de pessoas e artefatos envolvidos na obtenção do produto econômico.

Conforme uma versão mais ampla e atualizada de sustentabilidade, as atividades sustentáveis definem-se pela preocupação não só com as fossas de resíduos, mas também com as fontes de recursos naturais. De um lado, a descarga excessiva de resíduos compromete a capacidade de assimilação das fossas ambientais; de outro, a exploração demasiada de recursos naturais acelera a depleção – diminuição das quantidades de seus estoques – e a degradação – diminuição da qualidade de seus serviços – das fontes que os proveem. De um lado e de outro, o resultado é o que genericamente se denomina *poluição*. Para controlá-la, portanto, é preciso, de um só golpe, promover a gestão das fontes de recursos naturais (Economia dos Recursos Naturais) e a política ambiental voltada para os resíduos descartados nas fossas de assimilação (Economia da Poluição).

Como se percebe, fontes e fossas ambientais são duas faces de uma mesma moeda. Logo, se forem tratadas separadamente, corre-se o risco de se preservarem umas à custa das outras. Um exemplo típico é o de uma região que, ao incinerar seus resíduos sólidos e industriais para proteger suas fontes d'água, compromete, no entanto, a qualidade de seu ar, que passa a receber uma descarga excessiva de emissões.¹ Isso mostra por que gestão e política ambientais precisam ser tomadas em conjunto, reunidas num bloco definido como *planejamento ambiental*.

A análise de insumo-produto, desenvolvida por Wasily Leontief nos anos 1930, demonstra-se conveniente aos objetivos do planejamento ambiental. Embora tenha sido originalmente concebido para examinar as interdependências setoriais na economia – fluxos de bens e serviços entre as diversas indústrias –, o modelo básico de insumo-produto (tabela 1) pode ser ampliado (tabela 2) para incluir insumos e produtos ecológicos.²

Quando a ecologia da economia entra em cena, verifica-se que a unidade básica da teoria econômica tradicional – o valor ou a utilidade – é um *serviço*, não um bem.³ Por isso, quase toda a teoria econômica tradicional está, na verdade, preocupada com os serviços prestados pelos estoques materiais. Esses estoques são meros veículos que carregam serviços. Portanto, no fundo, a troca de objetos materiais na economia só ocorre por causa da preferência dos consumidores pelos serviços associados ao uso desses objetos ou pelo valor que eles podem adicionar à atividade manufatureira.

Quer dizer, os serviços é que, afinal, constituem o benefício último da atividade econômica. No entanto, para obter serviços, é preciso produzir estoques, cuja manuten-

¹ AYRES, R. U. & KNEESE, A. V. Production, consumption, and externalities. *The American Economic Review*, June 1969, vol. 59, n. 3, p. 282-297.

² FRANKHAUSER, S. & McCOY, D. Impact analysis of environmental policy. In: FOLMER, H. & GABEL, H. L. (Eds.) *Principles of environmental and resource economics: new horizons in environmental economics*. Cheltenham, UK, Northampton, USA: Edward Elgar: The Association of European Universities, 2000. p. 202-232.

³ Conforme Frank Knight em AYRES, R. U. & KNEESE, A. V. *Op. cit.* p. 284.

⁴ *Throughput* é um neologismo anglo-saxão sem tradução correspondente em português. Semanticamente, contudo, pode-se compreendê-lo como um elemento de ligação entre os *inputs* (insumos), numa ponta, e os *outputs* (produtos), noutra.

⁵ DALY, H. E. The economics of the steady state. *The American Economic Review*, May 1974, vol. 64, n. 2, p. 15-21.

⁶ Entropia é um conceito da Termodinâmica – um campo da Física que estuda as trocas de calor entre os corpos. A “lei da entropia”, conhecida como a 2ª Lei da Termodinâmica, consiste na generalização do fato de que o calor flui do corpo mais quente para o mais frio. Daí por que se conclui que, no universo, existe uma contínua e irrevogável degradação qualitativa de energia livre (baixa entropia) em energia limitada (alta entropia).

ção e reposição implicam custo biofísico conhecido como *throughput*⁴. Então, se os serviços consistem no benefício final da atividade econômica, o *throughput* é o custo final.⁵

Pode-se daí derivar um novo conceito de eficiência econômica, denominado de *eficiência final* (equação 1). Ao invés de assentar-se simplesmente na maximização da *eficiência do serviço* (razão 2 na equação 1), a eficiência econômica deveria perseguir a minimização do *throughput*. Assim, para um mesmo nível de estoques, eleva-se não só a *eficiência da manutenção* (razão 3 na equação 1), mas também a *eficiência final* (razão 1 na equação 1).

$$\text{Eficiência final} = \frac{\overset{(1)}{\text{Serviço}}}{\text{Throughput}} = \frac{\overset{(2)}{\text{Serviço}}}{\text{Estoque}} \times \frac{\overset{(3)}{\text{Estoque}}}{\text{Throughput}} \quad (1)$$

O estoque de riqueza física (última coluna da tabela 1) descreve um fluxo acumulado de *throughput*. Esse fluxo, visto como um custo de manutenção de estoques, começa com a extração (depleção) de recursos de baixa entropia⁶ na ponta dos insumos (última linha da tabela 2) e termina com uma igual quantidade de resíduos de alta entropia (poluição) na ponta dos produtos (última coluna da tabela 2).

Tabela 1: Modelo básico de insumo-produto (BIP)

Insumos <i>i</i>	Produtos <i>j</i>	Setores de atividade econômica	Demanda final	Produto total
Setores de atividade econômica		AY	F	Y
Fatores de produção		V	–	–
Total de insumos econômicos		Y	–	–

Tabela 2: Modelo ampliado de insumo-produto (AIP)

Insumos <i>i</i>	Produtos <i>j</i>	Setores de atividade econômica	Demanda final	Produto total	Descarga no meio ambiente
Setores de atividade econômica		AY	F	Y	W
Fatores de produção		V	–	–	–
Total de insumos econômicos		Y	–	–	–
Insumos ambientais		R	–	–	–

Fonte: Versão adaptada a partir de FRANKHAUSER, S. & McCOY, D. *Op. cit.* p. 209.

Quer dizer, a entropia desse sistema é sempre crescente. Porém, o universo como um todo constitui uma estrutura isolada. Em sistemas abertos ou fechados, que se encontram longe do equilíbrio, tais como os que interessam à economia, o aumento inexorável da entropia não se aplica. Por causa de mal-entendidos como esse, é que a entropia revela-se um conceito difícil para não-especialistas e até mesmo para os físicos. Embora desprezada pelos economistas, a Termodinâmica, segundo Georgescu-Roegen (1999, [1971], p. 276), é a “Física do valor econômico”, e a lei da entropia é a “mais econômica de todas as leis físicas” (p. 280). Tal proposição deriva do objetivo primário da atividade econômica, que consiste na autopreservação da espécie humana. Mas essa autopreservação implica, prioritariamente, o atendimento de necessidades biológicas indispensáveis à sobrevivência. Como a vida biológica alimenta-se da baixa entropia, estabelece-se, assim, uma estreita conexão entre entropia e valor econômico. Ou seja, a baixa entropia é uma condição necessária para que algo seja considerado útil, ainda que a utilidade não seja a causa do valor econômico. Conforme PERMAN, R. *et al.* *Natural resource and environmental economics*. 3. ed. Harlow, England: Pearson Education, 2003. http://rapidlibrary.com/files/perman-natural-resource-and-environmental-economics-3rd-edition-pdf_ulczebmcnci89on.html; GEORGESCU-ROEGEN, N. [1971] *The entropy law and the economic process*. Cambridge, US; London, UK, 1999.

⁷ DALY, H. E. On economics as a life science. *The Journal of Political Economy*, May-June 1968, vol. 76, n. 3, p. 392-406.

Embora, na tabela 1, o produto econômico total (Y) dependa da demanda de bens finais (F) e da demanda (intermediária) de objetos materiais e bens acabados utilizados como insumos (AY), os resíduos da produção (R) e do consumo (W) não desaparecem; pelo contrário, eles permanecem no sistema, gerando mais *desserviços* do que serviços e refluindo para produtores e consumidores, quer eles os queiram, quer não. Na verdade, enquanto a tabela 1 resume-se à célula 2 da tabela 3⁷, o modelo descrito pela tabela 2 inclui as células 1 e 3.

Tabela 3: Modelo completo de insumo-produto

De (insumos)	Para (produtos)	
	Humano (economia)	Não-humano (natureza)
Humano (economia)	(2) Ciência Econômica	(1) Fossas de resíduos
Não-humano (natureza)	(3) Fontes de recursos	(4) Ecologia

Fonte: Versão adaptada a partir de DALY, H. E. *Op. cit.* p. 401.

Metodologia de insumo-produto

O modelo de insumo-produto básico descrito na tabela 1 pode ser matricialmente resumido por:

$$\begin{aligned} AY + F &= Y \\ Y &= (I - A)^{-1}F, \end{aligned} \quad (2)$$

em que **I** é a matriz identidade e **A** é a matriz de coeficientes técnicos de insumo, cujos elementos são definidos por:

$$a_{ij} = y_{ij} / Y_j \quad (3)$$

onde y_{ij} são os elementos da matriz de demanda intermediária, que registra as compras, em unidades monetárias (\$), de insumos i pelas indústrias ou setores j da economia.

Matrizes **B** e **C**, semelhantes à matriz **A**, podem ser construídas para, respectivamente, comportar a quantidade, em unidades físicas de massa ou volume, de q recursos naturais e de g resíduos envolvidos na obtenção do produto econômico **Y** pelos j setores de atividade (indústrias).

$$b_{qj} = r_{qj} / Y_j \quad (4)$$

$$c_{gj} = w_{gj} / Y_j \quad (5)$$

onde r_{qj} e w_{gj} são elementos das matrizes **R** e **W**, na tabela 2. Cada r_{qj} registra a quantidade q de recursos naturais que

cada indústria j utiliza na geração de seu produto, ao passo que as entradas w_{gj} contabilizam a quantidade de resíduo g descartada por indústria j durante a obtenção do produto setorial.

Assim como a equação 3 conduz a AY , as Equações 4 e 5 desdobram-se em:

$$R=BY \quad (6)$$

$$W=CY, \quad (7)$$

em que B e C são matrizes que contêm os *coeficientes de intensidade de poluição* por j setor de atividade.⁸ Essas matrizes correspondem, na verdade, ao *throughput* ou *custo biofísico* da produção econômica (em, por exemplo, toneladas por \$). Podem-se, então, a partir das recíprocas dos elementos que as compõem, obter novas matrizes que informam o *custo monetário* com poluição por j setor de atividade (em \$ por tonelada).

Enfim, combinando-se a tabela 2 e a tabela 3, chega-se à tabela 4:

Tabela 4: Transcrição matricial do modelo aumentado de insumo-produto (AIP)*

Produtos (j) Insumos (i)	Economia	Ecologia	Total
Economia	(2) AY (\$/\$)	(1) CY (t/\$)	Y (\$)
Ecologia	(3) BY (t/\$)	–	W (t)
Total	Y (\$)	R (t)	

(*) \$ = unidades monetárias; t = toneladas. Embora as unidades monetárias sejam indispensáveis, as unidades físicas podem ser outras que não necessariamente toneladas – por exemplo: metros cúbicos, litros, joules etc. Porém, é sempre conveniente exprimir todas as quantidades físicas numa unidade comum.

Efeitos multiplicadores e efeitos de encadeamento

Substituindo-se a equação 2 nas equações 6 e 7, chega-se a:

$$R=B[(I-A)^{-1}F] \quad (8)$$

$$W=C[(I-A)^{-1}F] \quad (9)$$

Como se nota, as equações 8 e 9 são semelhantes à equação 2, porém a carga de poluição que elas exprimem é modulada pelas matrizes de elementos híbridos B e C , que reúnem coeficientes expressos em unidades físicas de massa ou volume por unidade monetária de produto econômico.

⁸ MACHADO, G.; SCHAEFFER, R. & WORRELL, E. Energy and carbon embodied in the international trade of Brazil: an input-output approach. *Ecological Economics*, 2001, vol. 39, p. 409-424.

Derivando-se as equações 2, 8 e 9 em relação a F , obtêm-se os *multiplicadores de insumo* e os de *poluição (depleção e resíduos)*:

$$dY/dF = (I-A)^{-1} = L \quad (2)'$$

$$dR/dF = B(I-A)^{-1} = X \quad (8)'$$

$$dW/dF = C(I-A)^{-1} = Z \quad (9)'$$

Em primeiro lugar, a matriz L , acima, fornece uma estimativa de quanto deve aumentar (diminuir) a demanda intermediária por insumos produtivos em virtude de um aumento (diminuição) da demanda final (F). Da mesma forma, as matrizes X e Z estimam quanto varia a carga de poluição na economia em virtude de variações na demanda final. Menosprezar esses efeitos implica, no caso da matriz L , o surgimento de gargalos intersetoriais que dificultam a obtenção do produto econômico, em razão da falta dos insumos necessários. No caso das matrizes X e Z , essa dificuldade está associada ao esgotamento das fontes e fossas ambientais, cujas taxas de reposição de estoques de matérias-primas e de assimilação de resíduos não conseguem acompanhar o ritmo imposto pela expansão econômica. Portanto, enquanto a matriz L define a *carga de produtos e serviços* que a economia comporta, as matrizes X e Z apontam para a *sobrecarga de subprodutos e desserviços* que ela suporta.

Em segundo lugar, as matrizes L , X e Z permitem medir os chamados efeitos de encadeamento. Esses efeitos se manifestam através do fluxo de produtos e subprodutos da atividade econômica, que pode ser acompanhado em dois sentidos. Indagando-se “de onde ele provém”, rastreiam-se os encadeamentos verticais ou “para trás”; inquirindo-se “para onde ele vai”, seguem-se os encadeamentos horizontais ou “para frente”⁹.

Enquanto os encadeamentos para trás relacionam-se à oferta de insumos para determinada indústria, os encadeamentos para frente denotam a utilização do produto – isto é, quanto o produto de determinada atividade é utilizado como insumo em outras.¹⁰ Os encadeamentos para trás são medidos pelos elementos localizados nas *colunas* das matrizes L , X e Z , cuja soma indica os requerimentos totais de insumos/recursos naturais/resíduos para cada unidade de aumento na demanda final pelo produto do setor j .¹¹ Entretanto, a soma das *linhas* dessas matrizes não corresponde aos encadeamentos para frente.¹²

⁹ TEMURSHOEV, U. Key sectors in the Kyrgyzstan economy. *CERGE-EI Discussion Paper Series*, Prague, Czech Republic, 2004, n. 135, 38 p. https://www.cerge-ei.cz/pdf/dp/DP135_2004.pdf

¹⁰ JONES, L. P. The measurement of Hirschmanian linkages. *The Quarterly Journal of Economics*, May 1976, vol. 90, n. 2, p. 323-333.

¹¹ BOUCHER, M. Some further results on the linkage hypothesis. *The Quarterly Journal of Economics*, May 1976, vol. 90, n. 2, p. 313-318.

¹² JONES, L. P. *Op. cit.*

Embora as matrizes L , X e Z contemplem os encadeamentos para trás, elas não são apropriadas para observar os encadeamentos para frente. Por causa da matriz A , a matriz L consiste numa matriz inversa de *insumos* ou *matriz de compras*. Para que ela se transforme numa matriz inversa de *produtos* ou *matriz de vendas*, é preciso substituir a matriz A por uma matriz A^* , cujos elementos são definidos por:

$$a_{ij}^* = y_{ij}/Y_i \quad (3)'$$

Definições e desdobramentos algébricos idênticos aos demonstrados pelas equações 2, 8 e 9 conduzem a um novo conjunto de multiplicadores. A soma das *linhas* das matrizes L^* , X^* e Z^* informa quanto deve crescer o produto total, o uso de recursos naturais e a quantidade de resíduos na economia, para absorver o crescimento do produto setorial resultante de cada unidade de insumo primário acrescentada à indústria i .¹³

¹³ JONES, L. P. *Op. cit.*

$$dY/dF = (I - A^*)^{-1} = L \quad (2)''$$

$$dR/dF = B(I - A^*)^{-1} = X \quad (8)''$$

$$dW/dF = C(I - A^*)^{-1} = Z \quad (9)''$$

As médias dos somatórios das colunas de L , X e Z e das linhas de L^* , X^* e Z^* servem para construir razões em relação à média total dessas matrizes (equações 10 e 11). Essas razões é que definem os índices de encadeamento vertical ou para trás (equação 10) e horizontal ou para frente (equação 11).

$$U_j = \frac{\frac{1}{N} K_j}{\frac{1}{N \times J} \sum_{j=1}^J K_j} \quad (10)$$

$$U_{i,q,g}^* = \frac{\frac{1}{J} K_{i,q,g}^*}{\frac{1}{N \times J} \sum_{i,q,g=1}^J K_{i,q,g}^*} \quad (11)$$

em que as indústrias são representadas pelas colunas $j = 1, \dots, J$; os produtos ou subprodutos, pelas linhas $i, q, g = 1, \dots, N$; K representa uma matriz genérica para matrizes como L , X ou Z ; K^* é outra matriz genérica para matrizes

como L^* , X^* ou Z^* ; K_j é o somatório das colunas da matriz K ; e $K_{i,q,g}^*$ é o somatório das linhas da matriz K . Além disso, $i = j = 1, \dots, N$, mas $q \geq j$ e $g \geq j$. Noutras palavras, enquanto as matrizes L e L^* são quadradas, as matrizes X , Z , X^* e Z^* podem ser retangulares, refletindo o fato de que pode haver mais sub/produtos q , g e i que setores econômicos j .

Se, para determinada coluna ou linha, esse índice é maior que um, então a indústria, representada pela coluna j , ou o sub/produto, representado pela linha q , g ou i , exercem efeitos de encadeamento acima da média da economia. Quando o índice é o mais elevado para $j = i$, diz-se tratar-se de um *setor-chave*. Mas, quando $j \neq i, q, g$, então j é considerado um setor com fortes encadeamentos para trás, enquanto i, q, g são o produto ou subprodutos *mais básicos* da economia, por apresentarem os mais fortes encadeamentos para frente. Numa palavra, enquanto fortes encadeamentos para trás apontam para o setor *mais dependente* na economia, fortes encadeamentos para frente identificam o sub/produto *mais utilizado* em toda a indústria.

Por último, a identificação de setores-chave e sub/produtos básicos depende da variabilidade das médias de cada coluna (equação 12) ou linha (equação 13) da matriz genérica K . Quando essa variabilidade é alta, a influência do setor ou sub/produto na economia como um todo é pequena, pois concentra-se muito em torno de uma ou outra atividade. Entretanto, quando a variabilidade é baixa, a influência do setor ou sub/produto espalha-se de maneira mais uniforme pela economia, o que aprofunda a extensão de sua interdependência tecnológica e ecológica.¹⁴ Portanto, o setor com mais fortes encadeamentos para trás é aquele que apresenta $U_j > 1$ e V_j *baixo*, ao passo que o sub/produto com mais fortes encadeamentos para frente é aquele que possui $U_{i,q,g}^* > 1$ e $V_{i,q,g}^*$ *baixo*.

¹⁴ BOUCHER, M. *Op. cit.*

$$V_j = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i,q,g=1}^N \left(k_{i,q,gj} - \frac{1}{N} K_j \right)^2}}{\frac{1}{N} K_j} \quad (12)$$

$$V_{i,q,g}^* = \frac{\sqrt{\frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^J \left(K_{i,q,gj}^* - \frac{1}{J} K_{i,q,g}^* \right)^2}}{\frac{1}{J} K_{i,q,g}^*} \quad (13)$$

Economia do crescimento

No passado, a identificação de setores-chave, com fortes encadeamentos para trás e para frente, foi proposta por Albert Hirschman¹⁵ para rebater energicamente a tese do *big push* (grande impulso)¹⁶, dominante em meados do século passado. De acordo com essa vertente principal à época, o crescimento das economias subdesenvolvidas não podia ser impulsionado pelo crescimento de um único setor. Se assim fosse, esse setor logo esbarraria na falta de demanda para seus produtos e na escassez de mão de obra especializada. Portanto, conforme essa “hipótese de crescimento equilibrado”, o estímulo viria a partir da expansão de toda a economia; não da de setores específicos somente.¹⁷

Hirschman retorquia esse argumento alegando que, pelo contrário, “a expansão de um único setor criaria oportunidades para outros setores e promoveria o desenvolvimento de novas atividades”¹⁸. Quer dizer, segundo uma visão schumpeteriana¹⁹ do processo, o desenvolvimento assestavava-se na “hipótese do crescimento desequilibrado”.

Seja como for, o traço comum de ambas as teses era seu pressuposto de que o mecanismo de mercado seria, por si só, insuficiente para garantir o desenvolvimento. Portanto, planejamento e algum tipo de intervenção estatal são necessários para promovê-lo.²⁰

Desafortunadamente, esse traço característico acabou por determinar o rápido declínio dessas teses, já que as aproximou demais da prática e do discurso políticos. As políticas econômicas que elas inspiraram durante a era de ouro do capitalismo deixaram-se impregnar por uma “ideologia desenvolvimentista”, baseada na crença generalizada de que o desenvolvimento econômico (capitalista) podia resolver todos os problemas da sociedade. Tal promessa, contudo, revelou-se insustentável ao longo das décadas de 1960 e 1970, quando a intensidade do crescimento econômico não redundou em melhor distribuição de seus frutos, mas em mais desemprego e mais inflação (estagflação).²¹

Aos poucos, as estratégias de desenvolvimento baseadas no Estado nacional foram substituídas por outras, que passaram a incluir temáticas globais, sobretudo de natureza ecológica. Dentro desse novo paradigma, o planejamento de longo prazo ganha importância crescente, enquanto a noção de desenvolvimento associada à industrialização envelhece prosaicamente. Ao menos em teoria, estratégias contemporâneas de desenvolvimento se voltam para a sustentabilidade física (ecológica), econômica (longo prazo) e social (inclusiva).²²

¹⁵ HIRSCHMAN, A. O. Investment policies and “dualism” in underdeveloped countries. *The American Economic Review*, Sep. 1957, vol. 47, n. 5, p. 550-570.

¹⁶ NURKSE, R. Some international aspects of the problem of economic development. *The American Economic Review*, May 1952, vol. 42, n. 2, p. 571-583.

ROSENSTEIN-RODAN, P. Problems of industrialization of Eastern and Southeastern Europe. *The Economic Journal*, Jun-Sep. 1943, vol. 53, n. 210/211, p. 202-211.

¹⁷ BACKHOUSE, R. E. Os economistas e a política, de 1939 até o presente. In: BACKHOUSE, R. E. *História da economia mundial*. São Paulo: Estação Liberdade, 2007. Cap. 13, p. 339-362.

¹⁸ BACKHOUSE, R. E. *Op. cit.* p. 356.

¹⁹ SCHUMPETER, J. A. *Teoria do desenvolvimento econômico: uma investigação sobre lucros, capital, crédito, juro e o ciclo econômico*. São Paulo: Nova Cultural, 1997. 1ª edição 1964.

²⁰ BACKHOUSE, R. E. *Op. cit.*

²¹ BONENTE, B. I. & ALMEIDA FILHO, N. Há uma Nova Economia do Desenvolvimento? *Revista de Economia*, jan-abr. 2008, vol. 34, n. 1, p. 77-100.

²² BONENTE, B. I. & ALMEIDA FILHO, N. *Op. cit.*

Economia mais sustentável

Nesse contexto, os modelos AIP destacam-se por possibilitarem analisar a duração do desenvolvimento econômico com base na carga de resíduos e na depleção de recursos naturais que sua sustentação requer. Quem sabe a intensidade tecnológica que sustenta a produtividade da economia conduza a uma intensidade ecológica insuportável no longo prazo.

A análise combinada de insumos econômicos, i , e ambientais, q e g , permite avaliar em que medida a interdependência tecnológica dos setores de atividade intensifica os efeitos da poluição através da economia. Nesse sentido, a proposição fundamental que emerge da análise ampliada de insumo-produto é que o “esverdeamento” da economia requer que os investimentos recaiam sobre os setores *menos* dependentes – isto é, com $U_j < 1$ –, visto que sua baixa interdependência tecnológica com os demais contribui para reduzir a dispersão dos impactos da poluição. Como a poluição não é a causa, mas a consequência da atividade econômica, de nada adianta controlar os poluentes sem limitar a expansão dos setores que mais contribuem para espalhá-los.

Embora não seja uma condição suficiente, a interdependência tecnológica é necessária para os efeitos de encadeamento. Na verdade, interdependência elevada sugere encadeamentos potenciais, cuja relação de causalidade deve ser investigada logo depois. No mais, mesmo que os vínculos causais não existam, os encadeamentos podem, ainda assim, reunir algum significado econômico. Por exemplo, o setor de eletricidade costuma apresentar índices relativamente elevados de encadeamento para frente. Todavia, esses vínculos não são causais. Seu valor elevado e a expansão desse setor resultam da demanda de setores usuários com fortes encadeamentos para trás.²³ Da mesma forma, a despeito de relações de causalidade, recursos naturais e resíduos com fortes encadeamentos para frente podem ser associados à atividade de indústrias usuárias com fortes encadeamentos para trás.

Uma aplicação hipotética da análise ecologicamente ampliada de insumo-produto é oferecida a seguir. Embora a tabela 5 restrinja-se aos subprodutos ambientais (resíduos), contidos na matriz de resíduos \mathbf{W} (tabela 2), o arranjo que ela apresenta pode perfeitamente incluir os insumos ambientais (recursos naturais), contidos na matriz \mathbf{R} (tabela 2).

²³ JONES, L. P. *Op. cit.*

Tabela 5: Modelo hipotético de insumo-produto aumentado (AIP) para resíduos poluentes

Produtos j Insumos i, g	Setores econômicos ($j = 1, \dots, 2$)		Vetor F de demanda final	Vetor Y do produto econômico (em \$)
	(1) Agricultura	(2) Indústria		
Matriz Y de fluxos econômicos ²⁴ (em \$) entre $i = 1, \dots, 2$ setores				
1) Agricultura	$y_{11} = 2$	$y_{12} = 1$	$F_1 = 2$	$Y_1 = 5$
2) Indústria	$y_{21} = 0$	$y_{22} = 4$	$F_2 = 6$	$Y_2 = 10$
Vetor V de pagamentos a fatores (\$) ²⁵	$V_1 = 3$	$V_2 = 5$	$V=8=F$	
Total de insumos econômicos (\$)	$Y_1 = 5$	$Y_2 = 10$		$Y = 15$
Matriz W de $g = 1, \dots, 3$ resíduos (em toneladas)	(1) Agricultura	(2) Indústria		Vetor W da descarga total de resíduos (em toneladas)
1) CO ₂	$w_{11} = 4$	$w_{12} = 9$		$W_1 = 13$
2) Resíduos Sólidos Urbanos.	$w_{21} = 3$	$w_{22} = 7$		$W_2 = 10$
3) Resíduos tóxicos	$w_{31} = 2$	$w_{32} = 5$		$W_3 = 7$

²⁴ Valores obtidos de JONES, L. P. *Op. cit.* p. 333.

²⁵ Inclui salários, lucros, importações, juros e aluguéis.

Com base nos dados da tabela 5, nas equações 3, 3' e 5, obtêm-se as matrizes A , A^* e C :

$$A = \begin{pmatrix} 0,40 & 0,10 \\ 0 & 0,40 \end{pmatrix} \quad A^* = \begin{pmatrix} 0,40 & 0,20 \\ 0 & 0,40 \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} 0,80 & 0,90 \\ 0,60 & 0,70 \\ 0,40 & 0,50 \end{pmatrix}$$

A partir dessas matrizes, calculam-se os multiplicadores dispostos na tabela 6. Os resultados dos índices de encadeamento para trás e para frente do modelo BIP mostram que a “indústria” ($j = 2$) é o setor *mais dependente* (índice de encadeamento para trás = 1,08), enquanto o produto da “agricultura” ($i = 1$) é o *mais básico* (índice de encadeamento para frente = 1,14).

Tabela 6: Multiplicadores econômicos e de resíduos, índices de encadeamento e de coeficientes de variação

Multiplicador	Produtos (j) Insumos (i, g)	(1) Agricultura	(2) Indústria	Média	Desvio- padrão	Para frente ^a	Índ. Var. ^b
Insumos $L = (I - A)^{-1}$	1) Agricultura	1,67	0,28				
	2) Indústria	0	1,67				
	Média	0,83	0,97	0,90 ^f			
	Desvio-padrão	1,18	0,98				
	Para trás ^c	0,92	1,08				
	Índ. Variação ^d	1,41	1,01				
Produtos $L^* = (I - A^*)^{-1}$	1) Agricultura	1,67	0,56	1,11	0,79	1,14	0,71
	2) Indústria	0	1,67	0,83	1,18	0,86	1,41
	Média			0,97 ^f			
Poluidor $Z = C(I - A)^{-1}$	1) CO ₂	1,33	1,72				
	2) RSU ^e	1,00	1,33				
	3) Resíduos tóxicos	0,67	0,94				
	Média	1,00	1,33	1,17 ^f			
	Desvio-padrão	0,33	0,39				
	Para trás ^c	0,86	1,14				
Índ. Variação ^d	0,33	0,29					
Poluente $Z^* = C(I - A^*)^{-1}$	1) CO ₂	1,33	1,94	1,64	0,43	1,31	0,26
	2) RSU ^e	1,00	1,50	1,25	0,35	1,00	0,28
	3) Resíduos tóxicos	0,67	1,06	0,86	0,27	0,69	0,32
	Média			1,25 ^f			

(a) Equação 11. (b) Equação 13. (c) Equação 10. (d) Equação 12. (e) Resíduos Sólidos Urbanos. (f) Média total da matriz indicada na primeira coluna.

Quando se avalia a poluição, incluindo-se os resíduos, verifica-se que a “indústria” ($j = 2$) continua, neste caso, sendo o setor com maiores encadeamentos para trás (1,14). Ela é, portanto, o setor *mais dependente* do subproduto (resíduo) *mais básico* dessa economia, qual seja, o CO₂ ($g = 1$), que apresenta o maior índice de encadeamento para frente (1,31). Logo, se se quiser controlar as emissões de CO₂ na economia, é preciso deslocar os investimentos para a “agricultura” ($j = 1$), que, quando se leva em conta a poluição, é o setor que ostenta o menor índice de encadeamento para trás (0,86). Devido à sua fraca dependência dos demais setores, seu poder de dispersão do poluente mais abundante na economia (CO₂) é certamente menor do que no caso da “indústria” ($j = 2$).

Valny Giacomelli Sobrinho é economista, mestre em Planejamento Ambiental, doutor em Manejo Florestal e professor do Departamento de Ciências Econômicas e do Programa de Pós-graduação em Economia e Desenvolvimento da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). giacomelliv@yahoo.com.br