



Ambiente & Sociedade

ISSN: 1414-753X

revista@nepam.unicamp.br

Associação Nacional de Pós-Graduação e

Pesquisa em Ambiente e Sociedade

Brasil

GIACOMELLI SOBRINHO, VALNY

SUSTENTABILIDADE DO “BERÇO AO TÚMULO”: EXTENSÃO DE MODELOS INSUMO-PRODUTO  
PARA RSU E RSA NO VAREJO

Ambiente & Sociedade, vol. XVI, núm. 4, octubre-diciembre, 2013, pp. 21-42

Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade  
Campinas, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=31729904003>

- ▶ Como citar este artigo
- ▶ Número completo
- ▶ Mais artigos
- ▶ Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

# SUSTENTABILIDADE DO “BERÇO AO TÚMULO”: EXTENSÃO DE MODELOS INSUMO-PRODUTO PARA RSU E RSA NO VAREJO<sup>1</sup>

---

VALNY GIACOMELLI SOBRINHO<sup>2</sup>

## Introdução

Depois de vinte e um anos, a Lei de Resíduos Sólidos, sancionada em agosto de 2010 pela Presidência da República Federativa do Brasil, estabelece, para definir estratégias de uma Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS): *a*) responsabilidade pós-consumo da indústria e da cadeia varejista; *b*) metas para reduzir a geração de lixo; *c*) medidas corretivas para danos ambientais; *d*) “responsabilidade compartilhada” entre governos, indústria, comércio e consumidores sobre a geração direta ou indireta de resíduos (ZANATTA, 2010). Conquanto mal definida por ora, essa responsabilidade implicará, sobretudo a indústrias, distribuidores e varejistas, custos logísticos e operacionais cujo financiamento e incentivo econômico a lei não esclarece (BOURSCHEIT, 2010). Diante dessas indefinições, o melhor que esses setores têm a fazer é alinharem seus negócios e suas estratégias de crescimento a uma cultura social e ambientalmente responsável (NAKAMURA; CAMPASSI, 2005).

O primeiro passo nessa direção é vincular os benefícios líquidos (= receitas ou ganhos privados menos custos ou perdas privados) das empresas aos resíduos (custos externos) que sua atividade produz – ou, como se diz no jargão técnico da Ciência Econômica, a “internalização das externalidades”. Na Ecologia Industrial, trata-se de acompanhar o “ciclo de vida do produto” e de garantir a sustentabilidade desde o “berço” até o “túmulo”, por assim dizer.

---

1. Agradecimentos: O autor deste trabalho agradece aos organizadores e à comissão julgadora do 3º Prêmio Varejo Sustentável Walmart-Brasil, que, em 2010, classificaram em 1º lugar, na categoria Pesquisador, uma proposta de metodologia inspirada na que se expôs aqui.

2. MSc em Environmental Management pela Wageningen University, Holanda; Doutor em Engenharia Florestal/Manejo Florestal pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Rio Grande do Sul; professor permanente do Programa de Pós-graduação em Economia e Desenvolvimento (PPGE&D) do Departamento de Ciências Econômicas da UFSM; e Professor Adjunto do Departamento de Ciências Econômicas da UFSM. E-mail: giacomelliv@yahoo.com.br

Seja como for, por razões de eficiência ecológica e econômica, admite-se que as práticas menos poluentes costumam triunfar mais através de instrumentos econômicos (solução fiscal e mercados) do que de regulação (comando-e-controle). Entretanto, na maioria das vezes, as soluções fiscais implicam aumento de custos financeiros (impostos ambientais) para os poluidores, ao passo que os mercados de poluição transferem subsídios indiretos a potenciais causadores de grandes danos ambientais. Na ausência de uma e outra solução, prevalecem a ineficiência econômica e a ineficácia ecológica da legislação ambiental (regulamentações, obrigações, proibições, normas e multas).

“No mercado de serviços de RSU, a mercadoria principal é uma combinação de diversas atividades distintas – coleta, transporte e descarte de resíduos sólidos urbanos” (THOMAS; CALLAN, 2010, p. 440). No lado da oferta, encontram-se empresas privadas que, através de contratos com cidades, distritos ou municipalidades, prestam serviços diretamente à comunidade. Nesse caso, os custos de produção incluem a operação de uma frota de caminhões para a coleta de lixo, a administração de um aterro sanitário ou incinerador e o pagamento da mão de obra. No lado da demanda, inscrevem-se as decisões de compra dos geradores de RSU. Normalmente, a demanda por serviços de RSU aumenta com a elevação da renda na sociedade e diminui com o aprofundamento da responsabilidade ambiental dos geradores de resíduos. O primeiro desses impactos costuma resultar do crescimento econômico; o último é medido pelas compras de produtos com menos embalagem (THOMAS; CALLAN, 2010). Entretanto, a experiência histórica tem demonstrado que, à medida que o crescimento econômico se intensifica, a “sociedade afluente” que dele resulta converte-se numa “sociedade efluente”, em virtude da crescente quantidade de resíduos que gera (DALY, 1968).

Influenciando a demanda por serviços de RSU, o setor varejista destaca-se por sua peculiaridade de, com um só golpe, gerar ou reduzir resíduos nas duas pontas (suprimentos e consumo). De um lado (ponta do consumo ou *output*), quanto maior a renda (medida em unidades monetárias, como, por exemplo, R\$) da sociedade, maiores são as quantidades (medidas em unidades físicas, como, por exemplo, toneladas) compradas e substituídas de produtos. De outro (ponta dos suprimentos ou *input*), quanto mais se reduzirem os resíduos (medidos em unidades físicas, como, por exemplo, toneladas) na fonte – que, para o varejo, é a cadeia de fornecedores –, menores serão os custos (medidos em unidades monetárias, como, por exemplo, R\$) com reciclagem, reaproveitamento e recolhimento de materiais. Pode-se, entretanto, escolher entre gerar a mesma quantidade de resíduos com um custo de maior reciclagem e reutilização, ou então com um custo maior – em virtude do aumento da demanda – de serviços de RSU. A diferença, nesse caso, é que a primeira estratégia é ambientalmente responsável e conforme à Lei de Resíduos Sólidos; a segunda, não.

Os modelos estendidos de insumo-produto permitem determinar quanto de resíduo (poluição) é necessário para gerar uma unidade monetária de produto ou renda econômicos. Assim, é possível determinar qual é o custo (ou benefício) ambiental da atividade econômica. A vantagem desses modelos é que eles permitem realizar essa avaliação não só na cadeia de consumo (resíduos sólidos ou tóxicos), mas também na de suprimentos (resíduos de produção ou rejeitos) – ou, no caso do varejo, na de fornecedores (resíduos

derivados dos estoques de mercadorias a serem vendidas no comércio varejista). Aos varejistas, em particular, oferece-se a possibilidade de programarem seus resultados financeiros (lucros líquidos) com base em metas estabelecidas para a geração de resíduos, quer na cadeia de suprimentos (fornecedores), quer na de consumo.

Na próxima seção, apresentam-se os pressupostos metodológicos que inspiraram os modelos estendidos de insumo-produto. Em seguida, descreve-se o modelo matemático a ser utilizado, e desenvolve-se um algoritmo de cálculo para os multiplicadores de poluição. Embora esses elementos dependam da matriz inversa de insumo, de Leontief, ou da matriz inversa de produto, de Jones (1976), o cálculo proposto aqui não requer que as matrizes intersetoriais de coeficientes técnicos sejam quadradas. Como se trata de uma relação híbrida entre insumos medidos em unidades físicas e produto econômico, medido monetariamente, não seria coerente exigir que o número de insumos biofísicos utilizados igualasse o número de setores de atividade – ou, no caso do varejo, de categorias de consumo – existentes. Isso configuraria uma exigência irrealista, apenas para atender à propriedade algébrica de só se poderem inverter matrizes quadradas. Na terceira seção, aplica-se o método a um setor varejista hipotético, para aferir os impactos monetários do uso reduzido de insumos biofísicos – e vice-versa. Após se discutirem os resultados, apresentam-se as conclusões.

## Metodologia

### Pressupostos

No final dos anos 1960, a análise econômica de insumo-produto começou a ser aplicada aos setores de energia e aos problemas ambientais (MACHADO *et al.*, 2001). Originalmente, o modelo de insumo-produto de Leontief (quadrante (2) da Tabela 1 e Tabela 2; Tabela 3) revelou-se útil para lidar com o fenômeno da interdependência, pois demonstrava como o fluxo anual de renda ou produto econômico (bens e serviços *finais*) era efetivamente sustentado por um fluxo *intermediário* de mercadorias. Em seguida, por analogia, o mesmo raciocínio foi estendido para argumentar que o fluxo de todas as mercadorias econômicas (finais e intermediárias) também era sustentado por fluxos *físicos* (quadrantes (1) e (3) da Tabela 1 e Tabela 2) que, embora não recebessem preço algum, serviam de complemento indispensável aos fluxos monetários (quadrante (2) da Tabela 1 e Tabela 2) de bens e serviços (DALY, 1968).

**Tabela 1 – Modelo ampliado de insumo-produto**

De	Para	
	Humano	Não-humano
Humano	(2) economia – economia Ciéncia Económica	(1) economia – natureza (fossas de resíduos)
Não-humano	(3) natureza – economia (fontes de recursos)	(4) natureza – natureza Ecologia

Fontes: DALY (1968, p. 401); PERMAN et al. (1996, p. 13)

**Tabela 2 – Decomposição do modelo ampliado de insumo-produto (Tabela 1)**

Insumos (de)	Produtos (para)							
	Setores de atividade							
	Transformação		Primário		Transformação		Primário	
	Vivos	Não-vivos	Consumo final	Vivos	Não-vivos	Consumo final	Total	
	Agricult. (1)	Indústria (2)	Famílias (3)	Biosfera (4)	Atmosf. (5)	Hidrosf. (6)	Litosf. (7)	Fossa termo- dinâmica (8)
<b>Quadrante (2)</b>	<b>Quadrante (1)</b>							
1. Agric.	$y_{11}$	$y_{12}$	$y_{13}$	$y_{14}$	$y_{15}$	$y_{16}$	$y_{17}$	$y_{18}$
2. Ind.	$y_{21}$	$y_{22}$	$y_{23}$	$y_{24}$	$y_{25}$	$y_{26}$	$y_{27}$	$y_{28}$
3. Famílias (serviços primários)	$y_{31}$	$y_{32}$	$y_{33}$	$y_{34}$	$y_{35}$	$y_{36}$	$y_{37}$	$y_{38}$
	<b>Quadrante (3)</b>							
4. Biosf.	$y_{41}$	$y_{42}$	$y_{43}$	$y_{44}$	$y_{45}$	$y_{46}$	$y_{47}$	$y_{48}$
5. Atmosf.	$y_{51}$	$y_{52}$	$y_{53}$	$y_{54}$	$y_{55}$	$y_{56}$	$y_{57}$	$y_{58}$
6. Hidrosf.	$y_{61}$	$y_{62}$	$y_{63}$	$y_{64}$	$y_{65}$	$y_{66}$	$y_{67}$	$y_{68}$
7. Litosf.	$y_{71}$	$y_{72}$	$y_{73}$	$y_{74}$	$y_{75}$	$y_{76}$	$y_{77}$	$y_{78}$
8. Sol (serviços primários)	$y_{81}$	$y_{82}$	$y_{83}$	$y_{84}$	$y_{85}$	$y_{86}$	$y_{87}$	$y_{88}$

Fonte: DALY (1968, p. 402)

Esse modelo ampliado (Tabelas 1 e 2) demonstra que o quadrante (1) se conecta com o quadrante (3) através do quadrante (4) e que o quadrante (3) influencia diretamente o bem-estar (nível de renda e consumo) humano. Na Tabela 2, cada elemento ( $y_{ij}$ ) das células no quadrante (2) representa “mercadorias econômicas”, enquanto, nos demais quadrantes (1, 3 e 4), esses elementos denotam “mercadorias ecológicas” e definem os “fundamentos biofísicos da economia” (DALY, 1968).

Tradicionalmente, a Ciéncia Económica tem-se ocupado exclusivamente do quadrante (2) (Tabelas 1 e 2) – reproduzido, com mais detalhes, pela Tabela 3. Por simplicidade e economia de espaço, costuma-se abreviar a descrição do arranjo geométrico disposto na Tabela 3 através da álgebra de matrizes (Eqs. (2) e (3)).

Na Tabela 3, a premissa básica subjacente é que a demanda intermediária  $y_{ij}$  de cada setor de atividade  $A_1, \dots, A_n$  mantém uma proporção relativamente constante com o produto ( $Y_i$ ) ou renda ( $Y_j$ ) total da economia (Eqs. (1), (2) e (4)). Se é assim, pode-se, como na Eq. (1), converter cada gasto intermediário ( $y_{ij}$ ) da atividade econômica

em proporções (percentagens) da renda monetária (pagamentos) total ( $Y_j$ ) ou do valor monetário do produto total ( $Y$ ), já que, contabilmente, os dispêndios com a produção econômica demandada devem ser, em tese, idênticos à capacidade de pagá-la (renda).

**Tabela 3 – Modelo tradicional de insumo-produto (modelo de Leontief)**

Produtos ( $j$ ) Insumos ( $i$ )	Setores de atividade			Demanda final <sup>†</sup>	Total
	Demanda intermediária				
	$A_1$	...	$A_n$	$F_i$	$Y_i$
$A_1$	$y_{11}$	...	$y_{1n}$	$F_1$	$Y_1$
$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$A_n$	$y_{n1}$	...	$y_{nn}$	$F_n$	$Y_n$
$P_j^*$	$P_1$	...	$P_n$	$P = F$	
$Y_j$	$Y_1$	...	$Y_n$		$Y$

(<sup>†</sup>)  $F = C$  (gastos de consumo) +  $I$  (investimento) +  $G$  (gastos públicos) +  $X$  (exportações). (\*)  $P_j$  = pagamentos a fatores ou rendas da economia; normalmente, inclui salários, lucros e importações.

$$a_{ij} = \frac{y_{ij}}{Y_j} \quad (1)$$

Leitura horizontal da Tabela 3:  $\mathbf{A}_{i \times j} \mathbf{Y}_j + \mathbf{F}_i = \mathbf{Y}_i \rightarrow \text{com } \mathbf{Y}_i = \mathbf{Y}_j \quad (2)$

$$\mathbf{Y}_j = \underbrace{(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}}_{j \times i} \mathbf{F}_i \quad (3)$$

Leitura vertical da Tabela 3:  $\mathbf{Y}_i \mathbf{A}_{i \times j} + \mathbf{P}_j = \mathbf{Y}_j \rightarrow \text{com } \mathbf{Y}_i = \mathbf{Y}_j \quad (4)$

$$\mathbf{Y}_j = \mathbf{P}_j \underbrace{(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}}_{j \times i} \quad (5)$$

onde  $\mathbf{I}$  = matriz identidade e  $\mathbf{A}_{i \times j}$  = matriz quadrada, com  $i = j$ .

Essas proporções, definidas pela Eq. (1), são denominadas *coeficientes técnicos* do modelo de insumo-produto de Leontief (Tabela 3). As relações de gastos (renda) e ganhos (produto) monetários que eles exprimem descrevem, até certo ponto, o “estado da arte” (técnica) vigente em determinado sistema produtivo. Todavia, à medida que o modelo de Leontief é ampliado, para incluir as “mercadorias ecológicas” dos quadrantes (1), (3) e (4) nas Tabelas 1 e 2, os coeficientes  $a_{ij}$  representam quantidades biofísicas em vez de monetárias. Por exemplo, se uma libra-peso de alfafa requer 900 libras-peso de água para ser produzida, então  $a_{ij} = 900$ . Nesse caso, os elementos  $a_{ij}$  são denominados *coeficientes técnicos naturais* (DALY, 1968) e normalmente assumem valores superiores à unidade.

Macroeconômica, monetária e contabilmente, a renda despendida não deve superar os ganhos obtidos com a venda da produção. Por isso é que os coeficientes técnicos

tradicionalis são, necessariamente, positivos e menores que a unidade. Biofisicamente, porém, o produto final representa tão-só uma fração de toda a matéria e energia utilizada para obtê-lo. O restante é matéria e energia desperdiçada, que, embora não desapareça, é economicamente inútil, devido ao estado de alta entropia em que termodinamicamente se encontra. Logo, visto que o “custo” biofísico da produção material é termodinamicamente maior que o ganho, os coeficientes técnicos *naturais* costumam ser maiores que a unidade.

A discrepância entre os valores dos coeficientes técnicos naturais e os de Leontief se deve ao tratamento estritamente monetário dispensado pelo modelo de insumo-produto convencional (Tabela 3 e quadrante (2) das Tabelas 1 e 2). Por causa desse reducionismo – que resume “tudo ao seu aspecto monetário” (SÖDERBAUM, 2008, p. 2) –, os benefícios retirados da produção e do consumo de mercadorias econômicas apresentam-se dissociados dos males e desserviços que a atividade econômica acarreta não só para os ecossistemas, mas também para si própria. Os insumos indesejados (poluentes e contaminantes) gerados pelos processos produtivos não têm contrapartida nas transações econômicas, medidas monetariamente (AYRES; KNEESE, 1969).

O pressuposto básico do modelo ampliado de insumo-produto é acrescentar insumos (linhas da Tabela 3) avaliados monetariamente outros medidos em unidades físicas comuns – por exemplo, toneladas-equivalentes de carbono ( $CO_2$  eq), toneladas-equivalentes de petróleo (tep), toneladas métricas (t), metros cúbicos ( $m^3$ ), hectares (ha), quilômetros quadrados ( $km^2$ ), partes por milhão (ppm) etc. (MACHADO *et al.*, 2001; BUTTNAR; LLOP, 2007). Para tanto, acrescentam-se submatrizes acima (matriz **N** das fontes de recursos naturais – matérias-primas e energia) e abaixo (matriz **W** de resíduos de produção e consumo) da Tabela 3 (PERMAN *et al.*, 1996; MILLER; BLAIR, 2009). Ambas registram o *throughput* (DALY, 1974; Eqs. (6) e (7)) – custo ecológico de manutenção e reposição dos estoques de mercadorias econômicas – necessário para sustentar os fluxos periódicos de serviços (benefícios) proporcionados pela atividade econômica (produção e consumo).

$$\underbrace{\text{Eficiência final}}_{(1)} = \underbrace{\text{Eficiência do serviço}}_{(2)} \times \underbrace{\text{Eficiência da manutenção}}_{(3)} \quad (6)$$

$$\frac{\text{Serviço}}{\text{Throughput}} = \frac{\text{Serviço}}{\text{Estoque}} \times \frac{\text{Estoque}}{\text{Throughput}} \quad (7)$$

A submatriz **N** registra o uso de  $i$  recursos naturais, em unidades de peso ou volume (e.g., toneladas), em cada  $j$  setor de atividade – ou, no caso do varejo, em cada  $j$  categoria de consumo (e.g., alimentação, higiene e limpeza, eletroeletrônicos etc.). Similarmente, a submatriz **W** inclui a quantidade, em unidades de peso ou volume, de resíduos  $i$  por  $j$  setor de atividade – ou, no caso do varejo, por  $j$  categoria de consumo. Todavia, as submatrizes **N** e **W** contêm  $i$  insumos que são expressos em unidades físicas (e.g., toneladas), enquanto os  $j$  setores de atividade (ou categorias de consumo) produzem resultados (benefícios) que são medidos monetariamente (em \$, tal como na matriz **Y**, das Eqs. (2) a (5)). Logo, para que se consiga vincular as unidades físicas das matrizes **N** e **W** às unidades monetárias

da matriz  $\mathbf{Y}$ , é preciso, em um caso e em outro, encontrar uma matriz de coeficientes técnicos *híbridos* ( $\mathbf{B}$ , na Eq. (8), e  $\mathbf{V}$ , na Eq. (9)) que comunique, através de uma razão invariável, a relação entre quantidades físicas de insumo (e.g., em toneladas,  $t$ ) e unidades monetárias (em \$) de produto<sup>1</sup>.

$$\underbrace{\mathbf{N}_i}_{\begin{matrix} t \\ \mathbf{t} \end{matrix}} = \underbrace{\mathbf{B}_{i \times j}}_{\begin{matrix} t \\ \mathbf{t} \\ \$ \end{matrix}} \times \underbrace{\mathbf{Y}_j}_{\$} \quad (8)$$

$$\underbrace{\mathbf{W}_i}_{\begin{matrix} t \\ \mathbf{t} \\ \$ \end{matrix}} = \underbrace{\mathbf{V}_{i \times j}}_{\begin{matrix} t \\ \mathbf{t} \\ \$ \end{matrix}} \times \underbrace{\mathbf{Y}_j}_{\$} \quad (9)$$

Substituindo-se a Eq. (3) nas Eqs. (8) e (9), obtém-se:

$$\underbrace{\mathbf{N}_i}_{\begin{matrix} t \\ \mathbf{t} \\ \$ \end{matrix}} = \underbrace{\mathbf{B}_{i \times j}}_{\begin{matrix} t \\ \mathbf{t} \\ \$ \end{matrix}} \times \underbrace{[(\mathbf{I} - \mathbf{A})_{j \times i}^{-1} \mathbf{F}_i]_j}_{\$} \quad (10)$$

$$\underbrace{\mathbf{W}_i}_{\begin{matrix} t \\ \mathbf{t} \\ \$ \end{matrix}} = \underbrace{\mathbf{V}_{i \times j}}_{\begin{matrix} t \\ \mathbf{t} \\ \$ \end{matrix}} \times \underbrace{[(\mathbf{I} - \mathbf{A})_{j \times i}^{-1} \mathbf{F}_i]_j}_{\$} \quad (11)$$

Ao contrário da matriz  $\mathbf{A}$  (Eq. (2)), as matrizes *híbridas*  $\mathbf{B}$  (Eqs. (8) e (10)) e  $\mathbf{V}$  (Eqs. (9) e (11)) não são necessariamente quadradas ( $i \neq j$ ), já que nem os tipos de recursos naturais nem os de resíduos poluentes precisam coincidir com o número de setores ou categorias econômicas que os demandam. Como indica a Tabela 4, abaixo, a matriz híbrida  $\mathbf{B}$  remete ao quadrante (3), nas Tabelas 1 e 2, ao passo que a matriz híbrida  $\mathbf{V}$  corresponde à transposição do arranjo disposto no quadrante (1), naquelas tabelas.

**Tabela 4 – Transcrição matricial do modelo ampliado de insumo-produto (Tabelas 1 e 2)**

Insumos ( $i$ )	Produtos ( $j$ )	Economia	Ecologia	Total
Economia		(2) $\mathbf{A} (\$/\$)$	(1) $\mathbf{V}' (\$/t)^*$	$\mathbf{Y} (\$)$
Ecologia		(3) $\mathbf{B} (t/\$)$	(4) .... ( $t/t$ )	$\mathbf{W} (t)$
Total		$\mathbf{Y} (\$)$	$\mathbf{N} (t)$	

Fonte: Elaboração do autor.

(\*) O sinal diacrítico (‘) indica transposição de matriz. Embora essa operação seja algebricamente desnecessária nas Eqs. (9) e (11), a transposição, no quadrante (1) da Tabela 4, é tão-só um artifício simbólico para tornar coerente a comparação entre as Tabelas 1, 2 e 4.

Tanto na Eq. (10) quanto na Eq. (11), o produto indicado no lado direito de ambas as equações representa o *efeito multiplicador da poluição*, que mede a variação na quantidade do tipo de poluente  $i$  ( $dN$  ou  $dW$ ) gerada pela mudança unitária e exógena na demanda final do setor  $j$  de atividade (BUTNAR; LLOP, 2007) ou da categoria  $j$  de consumo ( $dF$ ) (Eqs. (12)a-b e (13)a-b). Ao contrário das Eqs. (8) e (9), as Eqs. (10) e (11), como se observa, não dependem diretamente de  $Y$  – renda ou produto econômico (faturamento); elas só dependem da demanda final  $F$ . Entretanto, pela Tabela 3 e pela Eq. (3), verifica-se que, indiretamente, variações em  $F$  provocam mudanças em  $Y$ . Isso significa que, embora o crescimento da economia, da renda ou do faturamento ( $\Delta Y$ ) também determine, através dos multiplicadores macroeconômicos<sup>2</sup> convencionais, a expansão de  $F$ , o efeito multiplicador da poluição é causado, acima de tudo, pelas pressões da demanda final. Por exemplo, um aumento ou diminuição dos gastos de consumo ( $C$ ), investimento ( $I$ ) e/ou exportações ( $X$ ) podem afetar a quantidade de resíduos gerada. A sensibilidade da injeção de resíduos na economia em resposta a variações na demanda final ( $F$ ) é dada pelas Eqs. (12)a, (12)b, (13)a e (13)b, que representam os *multiplicadores de poluição* (BUTNAR; LLOP, 2007).

$$dN = [B(I - A)^{-1}]dF \quad (12)a$$

$$\frac{dN}{dF} = B(I - A)^{-1} \quad (12)b$$

$$dW = [V(I - A)^{-1}]dF \quad (13)a$$

$$\frac{dW}{dF} = V(I - A)^{-1} \quad (13)b$$

Através dos multiplicadores de poluição (Eqs. (12)a, (12)b, (13)a e (13)b), o modelo de insumo-produto pode explicar, em profundidade, o processo de geração de resíduos. Em particular, pode-se analisar como as mudanças na demanda final alteram a composição percentual dos RSU (custo ambiental) na renda ou produto econômicos (faturamento) (BUTNAR; LLOP, 2007).

#### *Modelo matemático e metodologia de cálculo*

A seguir, descreve-se o procedimento de cálculo que permite, a partir dos multiplicadores de poluição, chegar à matriz de *coeficientes de intensidade* (MACHADO *et al.*, 2001, p. 413) de resíduos por  $j$  setor de atividade. Essa matriz corresponde, na verdade, ao *throughput* ou *custo biofísico* da produção econômica (em t/\$). Pode-se, então, a partir das recíprocas dos elementos que a compõem, obter uma nova matriz que informa o *custo monetário* com resíduos por  $j$  setor de atividade (em \$/t).

No caso do varejo, convém que os  $j$  setores de atividade do modelo básico sejam substituídos por  $j$  “categorias de consumo” (matrizes (19) e (20)). Em virtude desse ajuste,

a matriz **A**, que descreve as demandas intersetoriais, representa os gastos (monetários) do varejo (colunas) com fornecedores (linhas), em cada categoria de consumo.

Na matriz (19), os elementos situados *na* diagonal principal, onde  $i = j$ , devem ser interpretados, *diretamente*, como os fornecimentos para compor os estoques varejistas da categoria correspondente; os elementos situados *fora* da diagonal principal, onde  $i \neq j$ , devem ser entendidos como os impactos *indiretos* que o aumento do faturamento em dada categoria de consumo causa sobre a demanda (intermediária) por suprimentos de outra (JONES, 1976). Por exemplo, à medida que o faturamento dos varejistas devido ao comércio de alimentos aumenta, é razoável supor que parte desse acréscimo passe a ser utilizada para comprar mais suprimentos de higiene e limpeza<sup>3</sup>, cujo valor agregado por unidade vendida é certamente maior.

Uma maneira simples de estimar essas substituições e incrementos é através da elasticidade-preço (Eq. (14)) e da elasticidade-renda (Eq. (15)) da demanda em cada categoria de consumo. A elasticidade-preço da demanda permite estimar quanto varia o faturamento em virtude de variações de preço ( $P$ ) por categoria  $j$  de consumo ( $Q$ ). Complementarmente, a elasticidade-renda da demanda permite projetar as variações de gasto ( $Q$ ) por categoria  $j$  de consumo, à medida que o faturamento (renda) ( $Y$ ) do varejo se modifique.

$$\epsilon_P = - \frac{dQ_j}{dP_j} \frac{P_j}{Q_j} \quad (14)$$

$$\epsilon_Y = \frac{dQ_j}{dY_j} \frac{Y_j}{Q_j} \quad (15)$$

A versão híbrida da matriz (19) é apresentada na Tabela 5, adaptada ao setor varejista. Para um tratamento completo da sustentabilidade, o hibridismo deve ocorrer tanto na cadeia de suprimentos (ponta dos insumos) quanto na cadeia do consumo (ponta dos produtos). Na cadeia de suprimentos, incluem-se os recursos naturais – linhas  $i$  da matriz **B** ((18)) – que compõem a matriz **N** ((16)) dos produtos fornecidos ao varejo; na cadeia do consumo, inscrevem-se os resíduos – linhas  $i$  da matriz **V** ((23)) – considerados pela matriz **W** ((24)).

Os componentes das categorias de consumo são medidos em unidades monetárias (\$), enquanto os das matrizes **N** e **W**, em unidades físicas de peso (toneladas,  $t$ ). As diferentes ordens das matrizes **N** ( $4 \times 1$ ), **A** ( $3 \times 3$ ) e **W** ( $2 \times 1$ ) ((16), (20) e (24)) são escolhidas propositalmente, para demonstrar que não há necessidade de coincidência entre o número de recursos naturais, setores de atividade econômica ou categorias de consumo e o de resíduos considerados.

**Tabela 5 – Composição híbrida de um modelo hipotético de insumo-produto aplicado ao varejo**

Insumos <i>i</i>	Produtos <i>j</i>			Total (toneladas, <i>t</i> )
	1) Alimentação	2) Higiene e Limpeza	3) Eletro- eletrônicos	
Matriz <b>N</b> de <i>i</i> recursos naturais				
1) Metais	<i>r</i> <sub>11</sub>	<i>r</i> <sub>12</sub>	<i>r</i> <sub>13</sub>	<i>N</i> <sub>1</sub>
2) Água	<i>r</i> <sub>21</sub>	<i>r</i> <sub>22</sub>	<i>r</i> <sub>23</sub>	<i>N</i> <sub>2</sub>
3) Celulose	<i>r</i> <sub>31</sub>	<i>r</i> <sub>32</sub>	<i>r</i> <sub>33</sub>	<i>N</i> <sub>3</sub>
4) Petróleo	<i>r</i> <sub>41</sub>	<i>r</i> <sub>42</sub>	<i>r</i> <sub>43</sub>	<i>N</i> <sub>4</sub>
Total (\$)	<i>Y</i> <sub>1</sub>	<i>Y</i> <sub>2</sub>	<i>Y</i> <sub>3</sub>	
Matriz <b>W</b> de <i>i</i> resíduos				
1) Papel	<i>U</i> <sub>11</sub>	<i>U</i> <sub>12</sub>	<i>U</i> <sub>13</sub>	<i>W</i> <sub>1</sub>
2) Plástico	<i>U</i> <sub>21</sub>	<i>U</i> <sub>22</sub>	<i>U</i> <sub>23</sub>	<i>W</i> <sub>2</sub>
Total (\$)	<i>Y</i> <sub>1</sub>	<i>Y</i> <sub>2</sub>	<i>Y</i> <sub>3</sub>	

Fonte: Elaboração do autor.

$$\underbrace{\mathbf{N}_{4 \times 1}}_{t} = \begin{bmatrix} \text{metais} & N_1 \\ \text{água} & N_2 \\ \text{celulose} & N_3 \\ \text{petróleo} & N_4 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\underbrace{\mathbf{R}_{4 \times 3}}_{t} = \begin{bmatrix} (t) & \text{aliment.} & \text{hig/limp.} & \text{eletr.} \\ \text{metais} & r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ \text{água} & r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ \text{celul.} & r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ \text{petr.} & r_{41} & r_{42} & r_{43} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\underbrace{\mathbf{B}_{4 \times 3}}_{t/\$} = \begin{bmatrix} (t/\$) & \text{aliment.} & \text{hig/limp.} & \text{eletr.} \\ \text{metais} & b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ \text{água} & b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ \text{celul.} & b_{31} & b_{32} & b_{33} \\ \text{petr.} & b_{41} & b_{42} & b_{43} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\underbrace{\mathbf{Dem. Intermed.}_{3 \times 3}}_{\$} = \begin{bmatrix} (\$) & \text{aliment.} & \text{hig/limp.} & \text{eletr.} \\ \text{aliment.} & y_{11} & y_{12} & y_{13} \\ \text{hig/limp.} & y_{21} & y_{22} & y_{23} \\ \text{eletr.} & y_{31} & y_{32} & y_{33} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\underbrace{\mathbf{A}_{3 \times 3}}_{\$/\$} = \begin{bmatrix} (\$/\$) & \text{aliment.} & \text{hig/limp.} & \text{eletr.} \\ \text{aliment.} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ \text{hig/limp.} & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ \text{eletr.} & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\underbrace{\mathbf{Y}_{3 \times 1}}_{\$} = \begin{bmatrix} \text{aliment.} & Y_1 \\ \text{hig/limp.} & Y_2 \\ \text{eletr.} & Y_3 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\underbrace{\mathbf{U}_{2 \times 3}}_{t} = \begin{bmatrix} (t) & \text{aliment.} & \text{hig/limp.} & \text{eletr.} \\ \text{papel} & u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ \text{plást.} & u_{21} & u_{22} & u_{23} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\underbrace{\mathbf{V}_{2 \times 3}}_{t/\$} = \begin{bmatrix} (t/\$) & \text{aliment.} & \text{hig/limp.} & \text{eletr.} \\ \text{papel} & v_{11} & v_{12} & v_{13} \\ \text{plást.} & v_{21} & v_{22} & v_{23} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\underbrace{\mathbf{W}_{2 \times 1}}_{t} = \begin{bmatrix} \text{papel} & W_1 \\ \text{plást.} & W_2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

As matrizes  $\mathbf{R}$  e  $\mathbf{U}$  ((17) e (22)) registram, respectivamente, os  $i$  requerimentos materiais (ou energéticos) e os  $i$  resíduos observados em cada  $j$  categoria de consumo varejista ou setor de atividade econômica (Tabela 5). Tanto a matriz  $\mathbf{R}$  ((17)) quanto a  $\mathbf{U}$  ((22)) contêm elementos que são medidos em unidades físicas de peso (toneladas,  $t$ ) ou volume. Com base em operações elementares indicadas pelas Eqs. (25) e (26), abaixo, chega-se, então, respectivamente, às matrizes híbridas  $\mathbf{B}$  ((18)) e  $\mathbf{V}$  ((23)), cujos elementos são expressos por uma razão entre unidades físicas ( $t$ ) e unidades monetárias ( $\$$ ).

As matrizes híbridas  $\mathbf{B}$  ((18)) e  $\mathbf{V}$  ((23)) contêm os chamados *coeficientes técnicos naturais*, assim como a matriz não-híbrida  $\mathbf{A}$  ((20)) contém os *coeficientes técnicos puros*, calculados através da Eq. (1), a partir das matrizes (19) e (21). À semelhança dos coeficientes técnicos puros, os *coeficientes técnicos naturais*, contidos nas matrizes  $\mathbf{B}$  ((18)) e  $\mathbf{V}$  ((23)), descrevem os padrões ou processos tecnológicos vigentes, determinados, no entanto, desta vez, pelos requerimentos materiais e pela quantidade de resíduos que a atividade econômica implica.

$$b_{ij} = \frac{r_{ij}}{Y_j} \quad (25)$$

$$v_{ij} = \frac{u_{ij}}{Y_j} \quad (26)$$

Uma sequência de operações algébricas elementares com matrizes revela o impacto que essa tecnologia de produção exerce não só sobre a demanda por fontes de matérias-primas e fossas de assimilação de resíduos, mas também sobre o custo monetário da própria atividade econômica. Esse algoritmo de cálculo é descrito abaixo (Eqs. (27) a (37)):

**Tabela 6 – Cálculo do throughput no varejo**

Descrição	Ponta dos insumos ( <i>input end</i> )		Ponta dos produtos ( <i>output end</i> )	
	Resíduos contidos nos estoques		Resíduos de consumo	
	Cadeia de suprimentos(fornecedores)	Eq.	Cadeia do consumo	Eq.
	Operação		Operação	
1) Efeito multiplicador da poluição por RSU	$M = \frac{dN}{dF} Y \rightarrow$ $\underline{\underline{M}} = \left[ \frac{\underline{\underline{B}}_{(4 \times 3)} \underline{\underline{(I - A)}_{(3 \times 3)}^{-1}}}{\frac{t}{\$}} \right] \underline{\underline{Y}}_{(3 \times 1)}$	(27) a	$S = \frac{dW}{dF} Y \rightarrow$ $\underline{\underline{S}} = \left[ \frac{\underline{\underline{V}}_{(2 \times 3)} \underline{\underline{(I - A)}_{(3 \times 3)}^{-1}}}{\frac{t}{\$}} \right] \underline{\underline{Y}}_{(3 \times 1)}$	(27) b
2) Matriz diagonal da carga de RSU devida ao efeito multiplicador da poluição	$\hat{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{44} \end{bmatrix}$	(28) a	$\hat{S} = \begin{bmatrix} s_{11} & 0 \\ 0 & s_{22} \end{bmatrix}$	(28) b
3) Carga de RSU (em t) por unidade monetária de produto econômico (1\$)	$\underline{\underline{\hat{M}^{-1}}} = \left[ \begin{array}{cccc} \frac{1}{m_{11}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_{22}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{m_{33}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{m_{44}} \end{array} \right]$	(29) a	$\underline{\underline{\hat{S}^{-1}}} = \left[ \begin{array}{cc} \frac{1}{s_{11}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{s_{22}} \end{array} \right]$	(29) b
4) Custo monetário (\$) de uma unidade de RSU (1 t)	$\underline{\underline{X}} = \underline{\underline{\hat{M}^{-1}}} \underline{\underline{B}}$	(30) a	$\underline{\underline{H}} = \underline{\underline{\hat{S}^{-1}}} \underline{\underline{V}}$	(30) b
5) Proporção do custo monetário ( <b>C</b> ) das quantidades de RSU (em t) ou valor monetário total (\$) dos RSU na receita ou benefício monetário ( <b>B</b> ) total (\$) ≈ Razão C/B	$L = \underline{\underline{X}} \underline{\underline{Y}}$ $L = \frac{1t \times \$}{\$} = \frac{\$}{\$}$ $L = \frac{\text{Valor total ou custo monetário (em \$) da carga de RSU (em t)}}{\text{Benefício monetário total (em \$) obtido com o produto econômico}}$	(31) a	$G = \underline{\underline{H}} \underline{\underline{Y}}$ $G = \frac{1t \times \$}{\$} = \frac{\$}{\$}$ $G = \frac{\text{Valor total ou custo monetário (em \$) da carga de RSU (em t)}}{\text{Benefício monetário total (em \$) obtido com o produto econômico}}$	(31) b

Tabela 6 – Cálculo do *throughput* no varejo (continuação)

Descrição	Ponta dos insumos ( <i>input end</i> )		Ponta dos produtos ( <i>output end</i> )	
	Resíduos contidos nos estoques		Resíduos de consumo	
	Cadeia de suprimentos (fornecedores)	Eq. Operação	Cadeia do consumo	Eq. Operação
6) Matriz diagonal com as recíprocas da Eq. (31) $\approx$ Razão B/C	$\hat{\mathbf{L}}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\ell_{11}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\ell_{22}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\ell_{33}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\ell_{44}} \end{bmatrix}$	(32) a	$\hat{\mathbf{G}}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{g_{11}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{g_{22}} \end{bmatrix}$	(32) b
7) Matriz dos coeficientes de intensidade de RSU ou custo biofísico ( <i>throughput</i> ) do produto econômico (em t/\$)	$\underline{\mathbf{Z}} = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{L}}^{-1} \underline{\mathbf{B}} \\ \frac{t}{\$} \end{pmatrix}$ $\underline{\mathbf{Z}}_{4 \times 3} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} \end{bmatrix}$	(33) a	$\underline{\mathbf{E}} = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{G}}^{-1} \underline{\mathbf{V}} \\ \frac{t}{\$} \end{pmatrix}$ $\underline{\mathbf{E}}_{2 \times 3} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \end{bmatrix}$	(33) b
8) Carga total de RSU (em t)	$\underline{\mathbf{M}} = \underline{\mathbf{Z}} \underline{\mathbf{Y}}$	(34) a	$\underline{\mathbf{S}} = \underline{\mathbf{E}} \underline{\mathbf{Y}}$	(34) b
9) Custo monetário do uso intensivo de RSU no produto econômico (em \$/t)	$\underline{\mathbf{Z}}_{4 \times 3}^* = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_{11}} & \frac{1}{Z_{12}} & \frac{1}{Z_{13}} \\ \frac{1}{Z_{21}} & \frac{1}{Z_{22}} & \frac{1}{Z_{23}} \\ \frac{1}{Z_{31}} & \frac{1}{Z_{32}} & \frac{1}{Z_{33}} \\ \frac{1}{Z_{41}} & \frac{1}{Z_{42}} & \frac{1}{Z_{43}} \end{bmatrix}$	(35) a	$\underline{\mathbf{E}}_{4 \times 3}^* = \begin{bmatrix} \frac{1}{e_{11}} & \frac{1}{e_{12}} & \frac{1}{e_{13}} \\ \frac{1}{e_{21}} & \frac{1}{e_{22}} & \frac{1}{e_{23}} \end{bmatrix}$	(35) b
10) Custo monetário <i>total</i> (\$) por setor <i>j</i> devido à carga de RSU no produto econômico	$\underline{\mathbf{C}} = \underline{\mathbf{M}}' \underline{\mathbf{Z}}^*$	(36) a	$\underline{\mathbf{K}} = \underline{\mathbf{S}}' \underline{\mathbf{E}}^*$	(36) b
	$\underline{\mathbf{M}}_{4 \times 1} = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4 \end{bmatrix} \rightarrow$ $\underline{\mathbf{M}}_{1 \times 4}' = [m_1 \ m_2 \ m_3 \ m_4]$		$\underline{\mathbf{S}}_{2 \times 1} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} \rightarrow$ $\underline{\mathbf{S}}_{1 \times 2}' = [s_1 \ s_2]$	
		(37) a		(37) b

Fonte: Elaboração do autor.

## Aplicação hipotética do modelo ampliado de insumo-produto

Nesta seção, atribuem-se valores hipotéticos ao modelo de cálculo descrito na Tabela 6, para testá-lo e avaliar-lhe os resultados. Embora, de acordo com a Tabela 5 e com as Eqs. (16) a (24), o exercício se refira ao varejo, a metodologia de cálculo aplica-se, em tese e com os devidos ajustes, a qualquer setor de atividade.

Como anunciado na Introdução, o realismo que o hibridismo requer para combinar insumos biofísicos – medidos em unidades físicas de peso ou volume – e produtos econômicos – medidos em unidades monetárias – não admite, exceto por coincidência, que a quantidade de setores de atividade econômica (ou categorias de consumo) seja necessariamente igual ao número de insumos materiais e energéticos (matriz  $N$  – Eq. (16)) ou de resíduos (matriz  $W$  – Eq. (24)) envolvidos na obtenção do produto econômico. Graças ao artifício da diagonalização de vetores (Eqs. (28)a-b, (29)a-b e (32)a-b, na Tabela 6), bem conhecido na álgebra de matrizes (MILLER; BLAIR, 2009; MACHADO *et al.*, 2001), é possível conferir realismo ao modelo estendido.

**Tabela 7 – Exemplo numérico e operações do modelo básico (Tabela 3)**

Operações básicas	Eq.
$\begin{bmatrix} 20 & 25 & 45 \\ 40 & 30 & 50 \\ 15 & 50 & 55 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 10 \\ 30 \\ 80 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 100 \\ 150 \\ 200 \end{bmatrix}$ <p style="text-align: center;">Demanda Intermediária (3 x 3)</p> <p style="text-align: center;"><math>\bar{F}</math>      (3x1)      <math>\bar{Y}</math>      (3x1)</p>	(2)
$A_{(3 \times 3)} = \begin{bmatrix} 0,20 & 0,17 & 0,23 \\ 0,40 & 0,20 & 0,25 \\ 0,15 & 0,33 & 0,28 \end{bmatrix}$	(1), (20)
$(I - A)_{(3 \times 3)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0,20 & 0,17 & 0,23 \\ 0,40 & 0,20 & 0,25 \\ 0,15 & 0,33 & 0,28 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,80 & -0,17 & -0,23 \\ -0,40 & 0,80 & -0,25 \\ -0,15 & -0,33 & 0,72 \end{bmatrix}$	
$(I - A)^{-1}_{(3 \times 3)} = \begin{bmatrix} 1,74 & 0,69 & 0,78 \\ 1,15 & 1,91 & 1,01 \\ 0,89 & 1,02 & 2,01 \end{bmatrix}$	

**Tabela 8 – Exemplo numérico acrescido de hibridismo (Tabela 5) para o cálculo do throughput no varejo (Tabela 6)**

**Tabela 8 – Exemplo numérico acrescido de hibridismo (Tabela 5) para o cálculo do throughput no varejo (Tabela 6) (continuação)**

Eta- pa (Tab. 6)	Ponta dos insumos ( <i>input end</i> )			Ponta dos produtos ( <i>output end</i> )		
	Resíduos contidos nos estoques			Resíduos de consumo		
	Cadeia de suprimentos (fornecedores)	Operação	Eq.	Cadeia do consumo	Operação	Eq.
(7)	$\underline{\underline{\mathbf{Z}}}_{(4 \times 3)} = \begin{bmatrix} 5,72 & 6,99 & 4,29 \\ 11,25 & 6,25 & 8,44 \\ 4,62 & 12,83 & 4,43 \\ 7,34 & 9,79 & 11,01 \end{bmatrix}$	$\underline{\underline{\mathbf{Z}}}_{(4 \times 3)} = \begin{bmatrix} 17,00 \\ 25,93 \\ 21,88 \\ 28,14 \end{bmatrix}$ $\underline{\underline{\mathbf{z}}}_i = \sum_{j=1}^3 \underline{\underline{\mathbf{z}}}_{ij}$	(33) <i>a</i>	$\underline{\underline{\mathbf{E}}}_{(2 \times 3)} = \begin{bmatrix} 9,18 & 12,23 & 13,76 \\ 14,32 & 19,09 & 32,21 \end{bmatrix}$ $\underline{\underline{\mathbf{E}}}_i = \sum_{j=1}^3 \underline{\underline{\mathbf{e}}}_{ij}$	(33) <i>b</i>	
	$\mathbf{Z}_j = \sum_{i=1}^4 \mathbf{z}_{ij} = [28,93 \quad 35,86 \quad 28,16]$	(38) <i>a</i>		$\mathbf{E}_j = \sum_{i=1}^2 \mathbf{e}_{ij} = [23,49 \quad 31,32 \quad 45,98]$	(38) <i>b</i>	
(9)	$\underline{\underline{\mathbf{Z}}}_{(4 \times 3)}^* = \begin{bmatrix} 0,17 & 0,14 & 0,23 \\ 0,09 & 0,16 & 0,12 \\ 0,22 & 0,08 & 0,23 \\ 0,14 & 0,10 & 0,09 \end{bmatrix}$	$\underline{\underline{\mathbf{Z}}}_{(4 \times 3)}^* = \begin{bmatrix} 0,55 \\ 0,37 \\ 0,52 \\ 0,33 \end{bmatrix}$ $\underline{\underline{\mathbf{z}}}_i^* = \sum_{j=1}^3 \underline{\underline{\mathbf{z}}}_{ij}^*$	(35) <i>a</i>	$\underline{\underline{\mathbf{E}}}_{(2 \times 3)}^* = \begin{bmatrix} 0,11 & 0,08 & 0,07 \\ 0,07 & 0,05 & 0,03 \end{bmatrix}$ $\underline{\underline{\mathbf{E}}}_i^* = \sum_{j=1}^3 \underline{\underline{\mathbf{e}}}_{ij}^*$	(35) <i>b</i>	
	$\mathbf{Z}_j^* = \sum_{i=1}^4 \mathbf{z}_{ij}^* = [0,62 \quad 0,48 \quad 0,67]$	(39) <i>a</i>		$\mathbf{E}_j^* = \sum_{i=1}^2 \mathbf{e}_{ij}^* = [0,18 \quad 0,13 \quad 0,10]$	(39) <i>b</i>	
	$\underline{\underline{\mathbf{M}}}_{(1 \times 4)} = \begin{bmatrix} 2479,00 & 3749,34 & 3272,05 & 4404,20 \end{bmatrix}$ $\underline{\underline{\mathbf{M}}}_{(1 \times 4)} = \begin{bmatrix} 2479,00 & 3749,34 & 3272,05 & 4404,20 \end{bmatrix}$ $\underline{\underline{\mathbf{M}}}_{(1 \times 4)} = \begin{bmatrix} 2479,00 & 3749,34 & 3272,05 & 4404,20 \end{bmatrix}$	(37) <i>a</i>		$\underline{\underline{\mathbf{S}}}_{(1 \times 2)} = \begin{bmatrix} 5505,25 & 10737,53 \end{bmatrix}$ $\underline{\underline{\mathbf{S}}}_{(1 \times 2)} = \begin{bmatrix} 5505,25 & 10737,53 \end{bmatrix}$ $\underline{\underline{\mathbf{S}}}_{(1 \times 2)} = \begin{bmatrix} 5505,25 & 10737,53 \end{bmatrix}$	(37) <i>b</i>	
(10)	$\underline{\underline{\mathbf{C}}}_{(1 \times 3)} = \begin{bmatrix} \text{Alim.} & \text{Hig.} & \text{Eletr.} \\ 2075,00 & 1659,55 & 2161,35 \end{bmatrix}$	(36) <i>a</i>		$\underline{\underline{\mathbf{K}}}_{(1 \times 3)} = \begin{bmatrix} \text{Alim.} & \text{Hig.} & \text{Eletr.} \\ 1350,00 & 1012,50 & 733,33 \end{bmatrix}$	(36) <i>b</i>	

Fonte: Elaboração do autor.

## Análise e discussão dos resultados

Os resultados dispostos pelas matrizes  $\mathbf{Z}$  e  $\mathbf{E}$  ((33)*a-b*), em t/\$, oferecem a medida do throughput da produção econômica. Em última análise, como define Daly (1974) (Eqs. (6) e (7)), trata-se, no caso do varejo, do custo biofísico de manutenção, em toneladas de resíduos, dos estoques de mercadorias adquiridas aos fornecedores (cadeia de suprimentos) e oferecidas aos consumidores (cadeia de consumo). A partir das recíprocas de cada elemento das matrizes  $\mathbf{Z}$  e  $\mathbf{E}$  ((33)*a-b*), conhece-se, afinal, o custo monetário, em \$/t, do throughput (matrizes  $\mathbf{Z}^*$  e  $\mathbf{E}^*$  – (35)*a-b*).

Por informarem o custo monetário (\$) por tonelada (t) de cada tipo de material e resíduo envolvido na produção, as matrizes  $\mathbf{Z}^*$  e  $\mathbf{E}^*$  ((35)*a-b*) são possivelmente mais eloquentes que suas parentais  $\mathbf{Z}$  e  $\mathbf{E}$  ((33)*a-b*). O mais importante, porém, é que não se pode chegar àquelas sem estas. Quer dizer, o custo monetário total (matrizes (36)*a-b*) que os resíduos impõem a cada setor de atividade – ou, no caso do varejo, a cada categoria de consumo – está indissoluvelmente lastreado na realidade biofísica da produção econômica.

Comparando-se as matrizes  $\mathbf{C}$  e  $\mathbf{K}$  ((36)*a-b*), é fácil verificar qual categoria de consumo sofre maior pressão monetária a partir da base de recursos naturais, através da cadeia de suprimentos (matriz  $\mathbf{C}$ ), e qual sofre o maior impacto monetário provocado pelos

resíduos na cadeia de consumo (matriz  $\mathbf{K}$ ). Examinando-se as Eqs. (36)a-b no exemplo hipotético da Tabela 8, verifica-se que o consumo de eletroeletrônicos é o que mais impacta, monetariamente, a cadeia de suprimentos (matriz  $\mathbf{C}$ ), enquanto a demanda por alimentos é a mais onerosa, monetariamente, à cadeia de consumo (matriz  $\mathbf{K}$ ). Entretanto, comparando-se, na Tabela 8, os totais das linhas ( $\mathbf{Z}_i$  e  $\mathbf{E}_i$ ) das matrizes  $\mathbf{Z}$  e  $\mathbf{E}$  ((33)a-b) com os totais das linhas ( $\mathbf{Z}_i^*$  e  $\mathbf{E}_i^*$ ) das matrizes  $\mathbf{Z}^*$  e  $\mathbf{E}^*$  ((35)a-b), verifica-se que justamente os materiais e resíduos de menor custo biofísico unitário são os que apresentam, por unidade, os maiores custos monetários. Isso significa que o aumento da eficiência final (Eqs. (6) e (7)) – ou a redução do custo biofísico por unidade de produto econômico – implica custos monetários que podem ser calculados com o auxílio das matrizes  $\mathbf{Z}$ ,  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{C}$  e  $\mathbf{K}$ .

A análise pode ganhar ainda mais em profundidade, à medida que se examinem os *trade-offs* entre os vários tipos de materiais e resíduos utilizados por categoria de consumo (matrizes  $\mathbf{Z}$ ,  $\mathbf{Z}^*$ ,  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{E}^*$  – (33)a, (35)a, (33)b, (35)b). No exemplo hipotético da Tabela 8, o elemento  $z_{13} = 4,29$  t/\$ da matriz  $\mathbf{Z}$  ((33)a) indica que o *throughput* mais baixo na cadeia de suprimentos resulta da utilização de metais ( $i = 1$ ) em produtos eletroeletrônicos ( $j = 3$ ). Da mesma forma, o elemento  $e_{11} = 9,18$  t/\$ da matriz  $\mathbf{E}$  ((33)b) revela que o *throughput* mais baixo na cadeia de consumo decorre do uso de papel ( $i = 1$ ) para embalar alimentos ( $j = 1$ ).

O uso de menos recursos naturais e a diminuição da carga unitária de resíduos (matrizes  $\mathbf{Z}$  e  $\mathbf{E}$ ) indicam, de acordo com a racionalidade econômica dominante, de inspiração monetária, que esses materiais estão-se tornando escassos. Logo, o preço (custo) deles por unidade aumenta (matrizes  $\mathbf{Z}^*$  e  $\mathbf{E}^*$ ).

Esse efeito é nitidamente observado comparando-se as matrizes-linha  $\mathbf{Z}_j$  ((38)a) e  $\mathbf{Z}_j^*$  ((39)a) ou  $\mathbf{E}_j$  ((38)b) e  $\mathbf{E}_j^*$  ((39)b). Quanto menor o uso de materiais (custo biofísico ou *throughput*) por categoria de consumo, nas matrizes  $\mathbf{Z}_j$  e  $\mathbf{E}_j$ , maiores os custos monetários desses materiais no produto econômico dessas categorias, conforme indicam as matrizes  $\mathbf{Z}_j^*$  e  $\mathbf{E}_j^*$ .

Na verdade, esse descompasso entre valores monetários e biofísicos tem sido há muito observado na Ciência Econômica. Inevitavelmente, ele conduz a vazamentos de ganhos de eficiência, conhecidos como “efeitos-rebote” ou “paradoxo de Jevons” (GRAY, 1914). Tais desvios ou ineficiências não só estimulam, via preços monetários, um modelo predatório de atividade econômica, como também demonstram quanto a lógica monetária pode dissimular a realidade biofísica.

## Considerações finais

A essência dos modelos estendidos de insumo-produto é que eles possibilitam tratar os resíduos e recursos naturais de maneira semelhante à que se tratam as transações monetárias entre os setores de atividade econômica. A matriz inversa de insumo ou inversa de Leontief ( $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ ), tipicamente monetária, informa, no modelo de insumo-produto tradicional (Tabela 3), quanto deve aumentar o produto de um determinado setor ( $i$ ) para fornecer os insumos requeridos pela demanda de uma unidade adicional nos setores usuários ( $j$ ). Em resumo, isso significa que qualquer expansão da economia (rendas mo-

netárias e valor monetário do produto econômico) implica demandas crescentes através dos setores de atividade.

Embora bem conhecido para os fluxos monetários, esse “efeito multiplicador” da renda e do produto tem sido sistematicamente ignorado para os fluxos de matéria e energia. Assim como os coeficientes técnicos de Leontief (Eq. (1) e matriz (20)) denotam proporções monetárias do custo dos insumos no produto setorial, os coeficientes técnicos naturais (Eqs. (25) e (26) e matrizes (18) e (23)) informam as proporções do custo *biofísico* dos insumos de produção no valor monetário do produto setorial. Quando se ignora esse custo, despreza-se o “efeito multiplicador da poluição” (Eqs. (12)*b*, (13)*b*, (27)*a-b*), que leva ao esgotamento das fontes e fossas ambientais, tanto quanto o efeito multiplicador da renda e do produto econômicos determina gargalos intersetoriais de produção.

A lógica por trás do efeito multiplicador da poluição é que, mantida a relação técnica entre a produção econômica e o uso de recursos (fontes de matérias-primas e energia) e serviços (fossas de resíduos) naturais, as pressões ambientais aumentam com o crescimento da renda e do produto econômicos. Mais e mais fontes e fossas naturais são requeridas para atender à demanda crescente por mercadorias econômicas, estimulada pela expansão da renda. Paradoxalmente, contudo, o hibridismo revela também que impactos (custos) biofísicos (matrizes  $Z_i$  e  $E_i$ ) menores resultam em custos monetários (matrizes  $Z_i^*$  e  $E_i^*$ ) maiores – e vice-versa (Tabela 8).

Do ponto de vista da política ambiental, esse paradoxo implica que, se não se quiser subvertê-las, as metas de geração e redução de RSU devem ser definidas a partir das quantidades de resíduos, e não a partir dos custos monetários. Por outro lado, os geradores de RSU conhecem melhor os custos monetários do que o substrato biofísico e material de sua atividade econômica.

Tal assimetria subsiste porque o crescimento do produto e da renda econômicos encontra-se dissociado das metas de poupança e redução de energia e materiais. Por causa do efeito multiplicador da poluição (BUTNAR; LLOP, 2007) e dos efeitos-rebote (GRAY, 1914), os únicos cortes que contam são os que se verificam em termos absolutos (matrizes  $M$  e  $S$  – Eqs. (27)*a-b*); não relativos (matrizes  $B$  – Eqs. (18) e (25) – e  $V$  – Eqs. (23) e (26)). À medida que as economias amadurecem, elas tendem a usar menos energia e materiais por unidade de produto – ou seja, elas se tornam menos intensivas em RSU. Todavia, na realidade, essa diminuição da intensidade significa aumento do uso (consumo) de energia e materiais (MONBIOT, 2006), justamente porque seu custo monetário (matrizes  $Z^*$  e  $E^*$ ) (Eqs. (35)*a-b* e (39)*a-b*) por unidade de insumo torna-se, como demonstram as matrizes  $Z$ ,  $E$ ,  $Z^*$  e  $E^*$  (Eqs. (33)*a-b*, (35)*a-b*, (38)*a-b* e (39)*a-b*), relativamente menor.

Mesmo assim, ainda que a lógica monetária permaneça dissociada dos fundamentos biofísicos da realidade, os modelos estendidos de insumo-produto proporcionam uma identificação rápida e imediata das categorias de consumo que mais prejudicam a base de recursos e serviços ambientais. Por certo, esse tipo de análise substitui com vantagens o trabalhoso e dispendioso cálculo de índices de sustentabilidade — principalmente no que diz respeito aos incontornáveis artifícios da ponderação e da escolha de indicadores, que a metodologia da construção de índices requer.

## Notas

- 1 O pressuposto de invariabilidade ou mudança lenta que o modelo fechado de Leontief reivindica para os coeficientes técnicos aí sugere que, na economia da natureza, a mudança tecnológica (evolução) é muito mais lenta do que a marcha do progresso técnico na economia humana (Daly, 1968).
- 2 Os multiplicadores macroeconômicos foram exaustivamente estudados pelo economista britânico J. M. Keynes. Fundamentalmente, o multiplicador da renda e do produto depende dos gastos da economia, contidos na propensão marginal a consumir ( $c$ ). Seu valor é dado por  $1/(1 - c)$ , com  $0 < c < 1$ .
- 3 Essa interpretação remete aos “encadeamentos para frente”, que a matriz inversa de produto, de Jones (1976), encerra. Ela denota os impactos, sobre os usuários, da expansão do produto econômico, devida ao acréscimo de uma unidade de insumo nas indústrias de suprimentos (fornecedores).

## Referências

- AYRES, R. U.; KNEESE, A. V. Production, consumption, and externalities. *The American Economic Review*, v. 59, n. 3, p. 282-297, 1969.
- BOURSCHEIT, A. Comissões do Senado votam projeto na quarta-feira. *Valor Econômico*, São Paulo, v. 11, n. 2521, p. F2, Especial Meio Ambiente, 7 jun. 2010.
- BUTNAR, I.; LLOP, M. Composition of greenhouse gas emissions in Spain: an input-output analysis. *Ecological Economics*, v. 61, p. 388-395, 2007.
- DALY, H. E. On economics as a life science. *The Journal of Political Economy*, v. 76, n. 3, p. 392-406, 1968.
- DALY, H. E. The economics of the steady state. *The American Economic Review*, v. 64, n. 2, p. 15-21, 1974.
- GRAY, L. C. Rent under the assumption of exhaustibility. *Quarterly Journal of Economics*, v. 28, p. 466-489, 1914.
- JONES, L. P. The measurement of Hirschmanian linkages. *The Quarterly Journal of Economics*, v. 90, n. 2, p. 323-333, 1976.
- MACHADO, G.; SCHAEFFER, R.; WORRELL, E. Energy and carbon embodied in the international trade of Brazil: an input-output approach. *Ecological Economics*, v. 39, p. 409-424, 2001.
- MILLER, R. E.; BLAIR, P. D. **Input-output analysis:** foundations and extensions. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- MONBIOT, G. **Heat:** how to stop the planet burning. London: Penguin Books, 2006.
- NAKAMURA, P.; CAMPASSI, R. Especialistas discutem ganho com ecoeficiência. *Valor Econômico*, São Paulo, v. 6, Caderno Empresas, p. B2, 25 ago. 2005.
- PERMAN, R.; MA, Y.; McGILVRAY, J. **Natural resource and environmental economics.** London and New York: Longman, 1996.
- SÖDERBAUM, P. **Understanding sustainability economics:** towards pluralism in economics. London: Earthscan, 2008.

THOMAS, J. M.; CALLAN, S. J. Administração de resíduos sólidos urbanos. In: **Economia Ambiental**: fundamentos, políticas e aplicações. São Paulo: Cengage Learning, 2010. Parte 6, cap. 19, pp. 431-455.

ZANATTA, M. Lei de resíduos é sancionada por Lula, mas só começa a vigorar em 90 dias. **Valor Econômico**, São Paulo, v. 11, n. 2562, p. A2, 3 ago. 2010.

Submetido em: 05/11/2012

Aceito em: 21/08/2013

# SUSTENTABILIDADE DO “BERÇO AO TÚMULO”: EXTENSÃO DE MODELOS INSUMO-PRODUTO PARA RSU E RSA NO VAREJO

---

VALNY GIACOMELLI SOBRINHO

**Resumo:** Segundo uma versão mais consistente de sustentabilidade, os negócios sustentáveis definem-se não só pela responsabilidade de recolher resíduos de bens e serviços deixados ao longo da cadeia de consumo (output end), mas também pela de reduzi-los na cadeia de fornecedores (input end). Em outras palavras, trata-se de reduzir o throughput – o custo inevitável de manutenção dos estoques, desde a ponta dos insumos (input), com os requerimentos de recursos materiais e energéticos (depleção) para o suprimento de bens e serviços, até a ponta dos produtos (output), com os resíduos (poluição) deixados pelo caminho. Por isso as matrizes de insumo-produto permitem tratar adequadamente do throughput. Adicionalmente, a introdução do hibridismo nesses modelos possibilita lastrear o valor monetário (em unidades monetárias) do produto econômico ao valor biofísico (em unidades de peso ou volume) de sua manutenção. Um modelo aplicado ao setor varejista demonstra por que poupanças biofísicas implicam custos monetários maiores.

**Palavras-chave:** Resíduos sólidos urbanos (RSU); Responsabilidade socioambiental (RSA); Modelos de insumo-produto; Varejo sustentável.

**Abstract:** According to a stronger version of sustainability, sustainable business is defined by the responsibility for both collecting wastes arising from goods and services along the output end and for reducing them along the input end (supply chain). In other words, it is meant by reducing the throughput – the unavoidable cost of maintaining stocks, from material and energy requirements (depletion) to supply goods and services, at the input end, up to the wastes (pollution) arising from their consumption and left along the way, at the output end. Accordingly, input-output matrices can appropriately cope with the throughput. Moreover, by bringing hybridism into these models, it is possible to ground the monetary value (measured in monetary units) of the economic output in the biophysical value (measured in weight or volume units) of its maintenance. An alike model is applied to the retail sector to show why biophysical savings imply higher monetary costs.

**Keywords:** Urban solid wastes; Corporate social and environmental responsibility; Input-output models; Sustainable retail.

Resúmen: Según una versión más consistente de sostenibilidad, los negocios sostenibles son definidos no solo por la responsabilidad de recoger desechos de bienes y servicios al largo de la cadena de consumo (output end), sino por la de reducirlos en la cadena de suministros (input end). O sea, se trata de reducir el throughput — el costo inevitable de manutención de stocks, desde la punta de suministros (input), con los requerimientos de recursos materiales y energéticos para la provisión de bienes y servicios, hacia la punta de productos (output), con los desechos (polución) que se quedan por el camino. Por eso, las matrices de insumo-producto permiten tratar adecuadamente del throughput. Además, la introducción del hibridismo en esos modelos posibilita enganchar el valor monetario (en unidades monetarias) del producto económico en el valor biofísico (en unidades de peso u volúmen) de su manutención. Un modelo aplicado al sector tendero demuestra por qué ahorros biofísicos implican costos monetarios mayores.

**Palabras-clave:** Desechos sólidos urbanos; Responsabilidad socioambiental; Modelos de insumo-producto; Tiendas sostenibles.

---