

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Regulação ambiental e comércio global de resíduos: paraíso da poluição ou
especialização eficiente?**

Jennyfer Ferreira da Silva
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026**

JENNYFER FERREIRA DA SILVA

Regulação ambiental e comércio global de resíduos: paraíso da poluição ou especialização eficiente?

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Economia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Michelle M. Viana Martins

Coorientador: Alan Marques Miranda Leal

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S586r
2026

Silva, Jennyfer Ferreira da, 2000-

Regulação ambiental e comércio global de resíduos: paraíso da poluição ou especialização eficiente? / Jennyfer Ferreira da Silva. – Viçosa, MG, 2026.

1 dissertação eletrônica (80 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Michelle Márcia Viana Martins.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Economia, 2026.

Referências bibliográficas: f. 62-72.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.524>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Comércio internacional. 2. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). 3. Direito ambiental. I. Martins, Michelle Márcia Viana, 1991-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Economia. Programa de Pós-Graduação em Economia. III. Título.

CDD 22. ed. 382.45628445

JENNYFER FERREIRA DA SILVA

Regulação ambiental e comércio global de resíduos: paraíso da poluição ou especialização eficiente?

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Economia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 31 de julho de 2026.

Assentimento:

Jennyfer Ferreira da Silva
Autora

Michelle Marcia Viana Martins
Orientadora

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 10/09/2026 às 12:33:16 e pela orientadora em 11/09/2026 às 10:08:58. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **UUTJ.L3BM.R75Z** e clique no botão 'Validar documento'.

Aos meus pais ,minha irmã, Manuel e Pedro, cujo amor e apoio foram essenciais.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, que sempre me apoiaram, acreditaram no meu potencial e não mediram esforços para que eu pudesse estar onde estou hoje. Mesmo nos dias mais difíceis e cansativos, nunca deixaram de estender as mãos para mim, de me buscar para que pudéssemos estar juntos e de fazer tudo o que estava ao alcance deles para me ajudar. Nunca esperaram nada em troca, apenas acreditaram em mim e nos meus sonhos. Sou eternamente grata por todo o amor, cuidado, dedicação e por fazerem de cada conquista minha uma conquista de vocês também.

À minha irmã, agradeço por todo o apoio, por todas as ajudas e pelos momentos que passamos juntas, que tornaram essa caminhada mais leve e feliz. Sua dedicação e determinação sempre me inspiraram e me motivaram a seguir em frente. Você é a melhor irmã do mundo, e eu sempre vou torcer por você, pelos seus sonhos e por todas as suas conquistas.

Ao Pedro, meu agradecimento por estar sempre ao meu lado. Obrigada por nunca hesitar em me ajudar, por ser meu amparo nos momentos difíceis e por sempre me lembrar da minha capacidade, especialmente quando eu mesma duvidava dela. Obrigada por celebrar comigo cada conquista e por ser um verdadeiro porto seguro em todas as fases dessa caminhada.

Um agradecimento especial ao bebê mais simpático e esperto do mundo, o meu querido Manuel. Você é o ser humano que eu mais amo nesta vida. Sem você, tudo isso teria muito menos graça. Você tem o dom de arrancar sorrisos até nos dias mais difíceis e me faz enxergar que todo esforço valeu a pena. Mesmo tão pequenininho, sua sensibilidade me emociona. Seus abraços, quando percebe que estou triste, têm o poder de tornar tudo mais leve. Espero, de todo o coração, que eu possa ser um orgulho para você, assim como você já é o meu maior orgulho e uma das maiores alegrias da minha vida.

Um agradecimento à professora Michelle, minha orientadora desde a graduação. Obrigada por sempre acreditar no meu potencial e por me guiar na produção deste trabalho com tanta paciência e atenção. Obrigada por todos os ensinamentos, pelos conselhos, por cada orientação e por cada “puxão de orelha” quando necessário. Com humildade e sabedoria, você compartilhou comigo muito mais do que conhecimento. Sou profundamente grata pela oportunidade de aprender ao seu lado, pela confiança depositada em mim e por toda a dedicação ao longo dessa trajetória.

Ao Alan, agradeço por compartilhar sua experiência e seus

conhecimentos com tanta generosidade. Sua expertise me permitiu aprender novos métodos e aprimorar minha forma de pensar a pesquisa. Tenho certeza de que levarei esses ensinamentos comigo por toda a minha trajetória.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

SILVA, Jennyfer Ferreira da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2026.
Regulação ambiental e comércio global de resíduos: paraíso da poluição ou especialização eficiente?. Orientadora: Michelle Marcia Viana Martins.
Coorientador: Alan Marques Miranda Leal.

O comércio internacional de resíduos intensificou-se nas últimas décadas em decorrência do aumento da geração de resíduos e das diferenças entre países quanto à regulação ambiental e à capacidade de reciclagem. Nesse contexto, este estudo investiga se a assimetria regulatória ambiental entre países exportadores e importadores e a capacidade de processamento do destino determinam de forma distinta os fluxos internacionais de resíduos plásticos e de sucata de alumínio no período de 2010 a 2023. Adicionalmente, almeja identificar o efeito causal da National Sword, implementada pela China em 2018, sobre o comércio internacional desses materiais. Para isso, empregam-se duas estratégias empíricas complementares. A primeira consiste na estimação de um modelo gravitacional estrutural por meio do estimador Poisson Pseudo Maximum Likelihood (PPML), com diferentes estruturas de efeitos fixos e termos de interação entre o diferencial regulatório e a capacidade de processamento do importador. A segunda utiliza um estimador de tripla diferença, complementado por estudo de evento e testes de robustez, explorando a National Sword Policy como um choque regulatório exógeno. Os resultados mostram que o diferencial regulatório influencia os fluxos de resíduos plásticos apenas quando a capacidade de processamento do destino é reduzida, efeito consistente com a hipótese do paraíso da poluição. À medida que essa capacidade aumenta, o efeito do diferencial regulatório perde relevância. Para a sucata de alumínio, a assimetria regulatória não apresenta efeito robusto, enquanto a capacidade de processamento do importador constitui o principal determinante dos fluxos, resultado compatível com a hipótese de especialização eficiente. A análise causal indica que a National Sword reduziu em mais de 80% as exportações de resíduos plásticos dos países mais dependentes do mercado chinês, efeito persistente e robusto aos testes de identificação, enquanto os efeitos sobre o alumínio não se mostraram robustos. Conclui-se que o comércio internacional de resíduos não é explicado por um único mecanismo, mas pela interação entre regulação ambiental, capacidade de processamento e características econômicas específicas de cada material. Os resultados contribuem para a literatura ao demonstrar que políticas de controle do comércio internacional de resíduos devem considerar a capacidade efetiva

de processamento dos países importadores, além do grau de rigor regulatório.

Palavras-chave: comércio internacional de resíduos; paraíso da poluição; especialização eficiente; capacidade de reciclagem; National Sword

ABSTRACT

SILVA, Jennyfer Ferreira da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2026. **Environmental Regulation and the Global Waste Trade: Pollution Haven or Efficient Specialization?**. Adviser: Michelle Marcia Viana Martins. Co-adviser: Alan Marques Miranda Leal.

International waste trade has intensified over recent decades as a result of increasing waste generation and differences across countries in environmental regulation and recycling capacity. In this context, this study investigates whether environmental regulatory asymmetry between exporting and importing countries and the processing capacity of destination countries determine international trade flows of plastic waste and aluminum scrap in distinct ways over the period from 2010 to 2023. Additionally, it identifies the causal effect of the National Sword, implemented by China in 2018, on the international trade of these materials. To achieve this objective, two complementary empirical strategies are employed. The first consists of estimating a structural gravity model using the Poisson Pseudo Maximum Likelihood (PPML) estimator with alternative fixed-effects structures and interaction terms between regulatory asymmetry and the importer's processing capacity. The second applies a Difference-in-Differences (DiD) estimator, complemented by an event-study framework and robustness tests, exploiting the National Sword as an exogenous regulatory shock. The results show that regulatory asymmetry affects plastic waste trade flows only when the destination country's processing capacity is low, a finding consistent with the Pollution Haven Hypothesis. As processing capacity increases, the effect of regulatory asymmetry diminishes. For aluminum scrap, regulatory asymmetry does not exhibit a robust effect, whereas the importer's processing capacity is the main determinant of trade flows, a result consistent with the Efficient Specialization Hypothesis. The causal analysis indicates that the National Sword Policy reduced plastic waste exports by more than 80% among countries most dependent on the Chinese market, with effects that remain persistent and robust across identification tests, whereas the effects on aluminum scrap are not robust. It is concluded that international waste trade cannot be explained by a single mechanism but rather by the interaction between environmental regulation, processing capacity, and the specific economic characteristics of each material. These findings contribute to the literature by demonstrating that policies governing international waste trade should consider the actual processing capacity of importing countries in addition to the stringency of environmental regulations.

Keywords: International waste trade ; pollution haven; efficient specialization; recycling capacity; National Sword

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 O problema e sua importância.....	12
1.2 Objetivos.....	14
1.2.1 Objetivo geral	14
1.2.2 Objetivos específicos.....	14
1.3 Hipóteses	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1 Hipótese do paraíso de poluição.....	15
2.2 Hipótese de Porter e especialização eficiente.....	17
2.3 Comércio de resíduos e choques regulatórios	20
3 METODOLOGIA.....	25
3.1 Modelo gravitacional.....	26
3.2 Estimador de tripla diferença.....	32
3.2.1 Testes placebo e falsificação	37
3.3 Composição dos destinos alternativos.....	38
4. RESULTADOS	39
4.1 Resultados do modelo gravitacional.....	39
4.2. Resultados do estimador de tripla diferença.....	46
4.3 Composição dos destinos alternativos.....	53

4.4 Implicações para a política comercial e ambiental e limitações.....	57
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
REFERÊNCIAS	62
ANEXO A	72
ANEXO B	76
ANEXO C	78
ANEXO D	79

1 INTRODUÇÃO

1.1 O problema e sua importância

O comércio internacional de resíduos movimentou mais de USD 80 bilhões em 2022 e cresceu a taxas anuais superiores a 6% entre 2000 e 2017, consolidando-se como um segmento relevante da economia circular global (elaboração própria, UN Comtrade, 2025). Nesse período, a China foi o destino preferencial de resíduos recicláveis, absorvendo 45% do volume mundial de resíduos plásticos importados desde 1992 (Brooks et al., 2018) e posicionando-se como o maior importador individual de sucata de alumínio. Sua participação é estimada entre 25% e 35% das importações globais no período 2015-2017 (elaboração própria, UN Comtrade). A dependência concentrada nesse destino criou uma vulnerabilidade estrutural que se materializou em 2018, quando a China implementou a política National Sword, reduzindo os limites de contaminação de até 3% para 0,5% para 24 categorias de resíduos sólidos e encerrando, na prática, as importações de plásticos mistos e papéis de baixa qualidade (WTO, 2017).

A reação dos mercados foi assimétrica. O valor exportado de resíduos plásticos recuou 63% na média anual do biênio 2018-2019 em relação ao período 2014-2017, enquanto o de sucata de alumínio cresceu 18% no mesmo intervalo (elaboração própria, UN Comtrade). As emendas plásticas da Convenção de Basileia, que passaram a exigir consentimento prévio (PIC) informado para exportações de resíduos plásticos contaminados a partir de 2021, aprofundaram esse padrão divergente para os plásticos sem produzir efeito equivalente sobre o alumínio. Essa divergência mostra que o choque atingiu o plástico e poupou o alumínio, condição que o desenho de identificação exige para separar o efeito da política de tendências gerais do comércio de resíduos.

A diferença de resposta reflete as estruturas de mercado e as características técnicas de cada material. O alumínio de sucata de alumínio possui mercado de commodities estabelecido, com preços de referência cotados na bolsa London Metal Exchange, cadeia de reciclagem tecnologicamente intensiva que requer escala industrial e diferencial de valor econômico que favorece o processamento em países com capacidade instalada, independentemente do rigor regulatório ambiental (London Metal Exchange, 2025; Graedel et al., 2011). Os plásticos, ao contrário, apresentam alta heterogeneidade de qualidade, mercados secundários pouco desenvolvidos e custos de processamento sensíveis à disponibilidade de mão de obra barata e ao

relaxamento de padrões ambientais locais, criando incentivos para o redirecionamento para países com regulação mais fraca (Baggs, 2009; Kellenberg, 2015).

A literatura sobre comércio internacional e meio ambiente documenta a hipótese do paraíso da poluição (Copeland & Taylor, 1994; Cole, 2004), segundo a qual diferenças nos custos regulatórios ambientais geram vantagens comparativas que redirecionam indústrias poluentes para países com menor rigor normativo. Em contraposição, Porter e van der Linde (1995) argumentam que a regulação rigorosa pode estimular inovação e competitividade, e Hu et al. (2020) demonstraram que o rigor do importador pode maximizar a absorção de resíduos de valor acima de um limiar mínimo de capacidade institucional, sugerindo que a relação não é monotônica.

Uma questão que permanece em aberto é se os efeitos da regulação ambiental sobre o comércio internacional de resíduos operam de forma semelhante entre diferentes tipos de resíduos ou variam conforme suas características econômicas, uma vez que a literatura tem analisado o comércio internacional de resíduos de maneira que dificulta essa distinção. Parte dos estudos estima os efeitos da regulação ambiental utilizando resíduos agregados ou impondo um coeficiente comum para materiais distintos (Kellenberg, 2012; D'Amato et al., 2012; Pothén e Hundt, 2024), o que impede distinguir se a resposta observada decorre da assimetria regulatória ou das diferenças inerentes aos materiais, como seu valor econômico, a organização de seus mercados e capacidade de processamento.

Para enfrentar essa lacuna, este trabalho compara resíduos plásticos e sucata de alumínio, materiais com estruturas de mercado e incentivos econômicos distintos, permitindo avaliar em que medida a influência da assimetria regulatória ambiental e da capacidade de reciclagem do importador depende das características do material comercializado. A análise abrange o período de 2010 a 2023 e combina o modelo gravitacional estrutural com um estimador de tripla diferença que explora a implementação da política *National Sword* como experimento quase-natural, utilizando a sucata de alumínio como grupo de comparação para identificar os efeitos da restrição chinesa sobre os resíduos plásticos.

Ao integrar essas abordagens, o estudo contribui com a literatura sobre comércio internacional de resíduos ao mostrar que os efeitos da regulação ambiental não devem ser interpretados como homogêneos entre materiais. Os resultados contribuem para compreender em que condições predominam os mecanismos associados à hipótese do paraíso da poluição ou à

especialização eficiente e oferecem evidências relevantes para o aperfeiçoamento das regras internacionais de comércio de resíduos.

Os achados deste estudo também contribuem para o desenho de políticas ambientais voltadas ao comércio internacional de resíduos, ao sugerir que a capacidade efetiva de processamento do país importador pode representar um critério mais adequado para orientar instrumentos regulatórios do que classificações binárias entre países desenvolvidos e em desenvolvimento.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Investigar se a assimetria regulatória ambiental entre exportador e importador e a capacidade de processamento do destino determinam os fluxos bilaterais de comércio de resíduos de alumínio e plásticos de forma distinta no período 2010 a 2023, e identificar causalmente o mecanismo de ajustamento gerado pelo choque exógeno do *National Sword* de 2018.

1.2.2 Objetivos específicos

- i) Estimar o efeito da assimetria regulatória bilateral (diferencial da Qualidade Regulatória entre exportador e importador) sobre os fluxos de alumínio e plásticos, por meio do modelo gravitacional com efeitos fixos, controlando a resistência multilateral ao comércio;
- ii) Estimar o efeito da capacidade de processamento do importador sobre os fluxos bilaterais, e testar se esse efeito domina o da assimetria regulatória de forma distinta entre alumínio e plásticos;
- iii) Identificar causalmente, por meio de um estimador de tripla diferença com estudo de eventos, o efeito do *National Sword* de 2018 sobre o volume total exportado, comparando plásticos e alumínio, com intensidade dada pela dependência prévia do mercado chinês;
- iv) Comparar a composição regulatória e de capacidade dos novos destinos entre alumínio e plásticos, testando se o perfil dos países que absorveram os fluxos redirecionados difere entre os

dois materiais com os mecanismos concorrentes da hipótese do paraíso da poluição e da especialização eficiente.

1.3 Hipóteses

- i) A assimetria regulatória entre exportador e importador tem efeito positivo sobre os fluxos de resíduos plásticos, de modo que maiores diferenciais de regulação dirigem mais exportações para destinos com menor rigor, consistente com a hipótese do paraíso da poluição;
- ii) A capacidade de processamento do importador é o determinante principal dos fluxos de sucata de alumínio, com papel menos relevante da assimetria regulatória, consistente com a hipótese de especialização eficiente;
- iii) O efeito da assimetria regulatória sobre os fluxos comerciais diminui à medida que aumenta a capacidade de processamento do país de destino no caso dos resíduos plásticos. Em destinos com regulação mais fraca, os fluxos permanecem elevados independentemente dessa capacidade. Para a sucata de alumínio, por outro lado, a capacidade de processamento é o principal fator explicativo, enquanto a assimetria regulatória não exerce efeito relevante.
- iv) Enquanto o *National Sword*, implementado em 2018, redirecionou os fluxos de resíduos plásticos para destinos com menor capacidade de processamento, os fluxos de sucata de alumínio, que não foram abrangidos pela política chinesa, permaneceram direcionados a países com maior capacidade de processamento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Hipótese do paraíso de poluição

A hipótese da poluição, proposta inicialmente por McGuire (1982), argumenta que regulamentações ambientais mais rigorosas podem elevar os custos de produção das empresas, reduzindo sua competitividade em mercados sujeitos à concorrência internacional. O aumento dos custos de conformidade pode limitar recursos destinados a investimentos produtivos e inovação, além de afetar preços e decisões de localização. Nesse cenário, países com padrões ambientais mais flexíveis podem se tornar mais atrativos para atividades intensivas em poluição, favorecendo a concentração desses setores em economias com menor rigor regulatório.

Copeland e Taylor (1994) formalizaram esse mecanismo ao desenvolverem o modelo do paraíso da poluição. Segundo os autores, diferenças nos padrões ambientais entre países alteram os custos relativos de produção de bens intensivos em poluição. Economias com regulação mais rigorosa impõem maiores custos associados às emissões, enquanto aquelas com normas mais brandas reduzem esses custos, criando uma vantagem comparativa para atividades ambientalmente intensivas. Como resultado, o país com menor rigor regulatório tende a se especializar nesses setores, atrair investimentos e ampliar suas exportações, enquanto países com padrões mais elevados passam a importar esses bens. Esse mecanismo também pode ser estendido ao comércio internacional de resíduos, uma vez que diferenças nos custos de processamento, reciclagem e controle ambiental podem direcionar materiais para destinos onde as exigências regulatórias são menos rigorosas.

Estudos sobre essa hipótese, entretanto, apresentam resultados heterogêneos. Jaffe et al. (1995), ao revisarem os estudos iniciais sobre o tema, não identificaram um efeito consistente da regulação ambiental sobre a localização industrial, indicando que outros fatores também influenciam as decisões das empresas. Posteriormente, Millimet e Roy (2016), ao controlarem a endogeneidade da regulação ambiental por meio de variáveis instrumentais, encontraram uma relação negativa entre rigor regulatório e investimento direto em setores poluentes. Esse resultado sugere que estimativas que não controlam a endogeneidade da regulação ambiental podem subestimar seu efeito sobre a localização das atividades poluentes. Ederington et al. (2005), utilizando tarifas de importação dos Estados Unidos como medida indireta de restrições ambientais, observaram que setores sujeitos a maiores custos regulatórios domésticos apresentam maior propensão a importar de países com padrões ambientais menos rigorosos, reforçando a existência do mecanismo previsto pela hipótese.

No comércio de resíduos, Kellenberg (2012) mostrou que países com menor rigor regulatório tendem a participar mais dos fluxos de resíduos perigosos, especialmente em ambientes de maior abertura comercial. Esse resultado indica que diferenças institucionais entre países podem influenciar a direção dos fluxos de materiais cuja gestão envolve custos ambientais elevados. Wang et al. (2019), ao analisarem firmas chinesas entre 2011 e 2015, encontraram que a resposta das empresas à regulação varia conforme as condições regionais. Enquanto algumas regiões apresentaram comportamento compatível com a hipótese de Porter, em que a regulação estimula inovação e ganhos de produtividade capazes de compensar os custos de conformidade, outras

seguiram o padrão previsto pelo paraíso da poluição, com empresas buscando locais de menor rigor ambiental. Esses resultados mostram que os efeitos da regulação dependem das características produtivas e tecnológicas dos locais analisados.

Evidências recentes também mostram que alterações regulatórias específicas podem modificar a distribuição internacional de atividades de reciclagem. Tanaka et al. (2022), ao analisarem o mercado de baterias chumbo-ácido usadas (HS 854810), identificaram que o endurecimento dos padrões de qualidade do ar nos Estados Unidos em 2009 deslocou parte do processamento dessas baterias para o México. O aumento dos custos de conformidade no país exportador tornou economicamente mais atrativa a transferência da atividade para uma economia com exigências ambientais menos restritivas. Esse tipo de choque regulatório se aproxima da estratégia adotada neste estudo, pois permite observar mudanças nos fluxos comerciais após uma alteração específica nas condições regulatórias associadas a determinado material.

Apesar dos avanços, a literatura ainda oferece poucas evidências sobre como diferenças regulatórias afetam distintos tipos de resíduos. A maior parte dos estudos concentra-se em um único material ou setor, dificultando avaliar se características como valor econômico, intensidade tecnológica da reciclagem e demanda por matéria-prima secundária alteram a sensibilidade dos fluxos comerciais ao rigor regulatório. O presente estudo contribui para essa discussão ao comparar resíduos de plástico e alumínio e investigar se a assimetria regulatória produz efeitos distintos sobre seus fluxos internacionais após um choque regulatório exógeno.

2.2 Hipótese de Porter e especialização eficiente

A literatura identifica dois mecanismos associados aos efeitos da regulação ambiental sobre o desempenho econômico. O primeiro corresponde ao efeito de custo de conformidade, no qual a adoção de padrões ambientais eleva os custos das empresas e reduz recursos disponíveis para investimentos produtivos e atividades inovadoras (Gray e Shadbegian, 2003; Jaffe et al., 1995). O segundo é o efeito de compensação pela inovação, proposto por Porter e Van der Linde (1995), segundo o qual empresas submetidas a exigências ambientais desenvolvem respostas tecnológicas e organizacionais capazes de aumentar a produtividade e reduzir custos no longo prazo.

A hipótese de Porter considera que políticas ambientais mais rigorosas podem induzir as empresas a desenvolver novas tecnologias, reorganizar processos produtivos e utilizar recursos de forma mais eficiente, gerando ganhos de produtividade que compensam parte dos custos iniciais

de adaptação. Nessa perspectiva, a regulação ambiental não representa apenas uma restrição às atividades produtivas, mas também um mecanismo capaz de estimular mudanças tecnológicas e organizacionais. De Santis et al. (2021) reforçam essa interpretação ao analisar 18 países da OCDE e identificar que impostos ambientais estiveram associados ao crescimento da produtividade e da força de trabalho, além de reduzirem custos relacionados à inovação. Segundo os autores, instrumentos ambientais podem diminuir a incerteza associada aos investimentos tecnológicos e aumentar a disposição das empresas em assumir riscos relacionados à inovação, favorecendo o desenvolvimento de soluções produtivas mais eficientes.

Essa perspectiva também possui implicações para a competitividade internacional. Dechezleprêtre e Sato (2017) mostram que diferenças no rigor das regulamentações ambientais alteram os custos relativos de produção e induzem respostas das empresas por meio de mudanças em preços, produção e investimentos. Assim, países que desenvolvem capacidade tecnológica para atender padrões ambientais mais elevados podem transformar a regulação em uma fonte de vantagem competitiva, enquanto economias que não acompanham essa transição podem enfrentar dificuldades de acesso a mercados com maiores exigências ambientais. Um exemplo desse movimento é o Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) da União Europeia, que busca incorporar o custo das emissões de carbono associadas aos produtos importados e reduzir incentivos à transferência da produção para países com menores restrições ambientais.

No comércio internacional de resíduos, essa interpretação dá origem à hipótese de especialização eficiente, que funciona como mecanismo alternativo ao paraíso da poluição. A especialização eficiente sugere que os fluxos de resíduos podem se concentrar em países com capacidade tecnológica e industrial para recuperar materiais de maior valor econômico. Nesse caso, a relação entre rigor regulatório e importação de resíduos tende a ser positiva, pois a regulação pode estimular investimentos em reciclagem, melhorar padrões de processamento e ampliar a capacidade de recuperação de materiais.

Essa hipótese é relevante para materiais com mercados secundários consolidados. Graedel et al. (2011) mostram que apenas uma parcela dos metais analisados apresenta taxas elevadas de reciclagem ao final da vida útil, destacando alumínio, cobre, ouro e prata como materiais com mercados secundários estruturados. Para esses materiais, a diferença entre o valor do metal primário e o preço da sucata influencia a comercialização, fazendo com que os fluxos sejam direcionados para países capazes de realizar o processamento. Kellenberg (2012) interpreta esse

processo como uma determinação dos fluxos de resíduos pela demanda por commodities secundárias. No caso do alumínio, essa dinâmica também está relacionada às exigências tecnológicas da reciclagem, uma vez que o processamento depende de instalações industriais capazes de realizar operações de fundição em escala, concentrando a atividade em países com infraestrutura produtiva adequada (Capuzzi e Timelli, 2018).

Estudos sobre o comércio de resíduos indicam que os efeitos da regulação ambiental dependem das características econômicas e tecnológicas dos materiais. Higashida e Managi (2014), ao analisarem cinco categorias de resíduos recicláveis por meio de um modelo gravitacional, não encontraram suporte para a hipótese do paraíso da poluição. Os autores observaram que países com maior renda e desenvolvimento industrial importavam mais resíduos recicláveis, resultado consistente com a especialização produtiva. Entretanto, como o estudo agrega diferentes categorias de materiais, seus resultados não permitem identificar se esses mecanismos variam conforme as características específicas dos resíduos.

Essa distinção também aparece em estudos recentes sobre resíduos com valor econômico. Compagnoni et al. (2025), ao analisarem resíduos de baterias, identificaram que regulações de responsabilidade estendida do produtor (EPR) aumentaram as exportações desses materiais, sugerindo que políticas ambientais podem estimular a organização de mercados de reciclagem quando os resíduos possuem componentes recuperáveis. Nesse caso, a regulação atua como mecanismo de coordenação dos fluxos em direção a destinos com capacidade de processamento, e não necessariamente para países com padrões ambientais mais baixos.

A literatura, portanto, indica que a relação entre regulação ambiental e comércio de resíduos depende das características econômicas e tecnológicas dos materiais. Entretanto, os estudos existentes geralmente analisam diferentes resíduos em contextos e períodos distintos, dificultando a identificação de se os resultados decorrem das características dos materiais ou dos efeitos regulatórios. Este estudo contribui ao comparar plástico e alumínio sob o mesmo choque exógeno, período e conjunto de países. Como a política *National Sword* afetou o comércio de resíduos plásticos, mas não a sucata de alumínio, o alumínio funciona como grupo de comparação para avaliar se as mudanças nos fluxos decorrem da política ou de tendências gerais do comércio de resíduos.

2.3 Comércio de resíduos e choques regulatórios

A assimetria regulatória entre países exportadores e importadores de sucatas pode atuar por diferentes canais, todos convergindo para o deslocamento de materiais de menor qualidade para destinos com menor capacidade de controle. O primeiro canal refere-se ao custo de conformidade imposto aos exportadores. Países com elevada qualidade regulatória, como os membros da União Europeia sujeitos à Diretiva-Quadro de Resíduos (2008/98/CE), estabelecem exigências de classificação, segregação e certificação que definem se determinado material será tratado como “resíduo” ou como “matéria-prima secundária” antes de sua movimentação internacional. O Regulamento (UE) nº 333/2011 estabelece critérios técnicos específicos para a sucata de alumínio, incluindo requisitos de pureza, sistemas de gestão da qualidade auditados e declaração de conformidade, sob os quais o material deixa de ser considerado resíduo e passa a ser comercializado como produto. Materiais que não atendem a esses critérios permanecem sujeitos ao Regulamento de Transferência de Resíduos, com exigência de documentação, notificação e aprovação prévia para cada remessa (European Commission, 2008).

Esse diferencial regulatório pode elevar o custo de preparação e comercialização dos materiais de menor qualidade nos países exportadores, criando incentivos para seu envio a destinos onde os controles de entrada são menos restritivos. Embora esse mecanismo não seja identificado diretamente pelo indicador agregado de qualidade regulatória utilizado neste estudo, ele contribui para interpretar por que diferenças institucionais entre países podem estar associadas a alterações nos fluxos bilaterais de resíduos.

O segundo canal está relacionado à capacidade dos países importadores de implementar os procedimentos de controle previstos nos acordos internacionais. A Convenção de Basileia (1989), em vigor desde 1992, estabeleceu o princípio do PIC como mecanismo de controle dos movimentos transfronteiriços de resíduos, exigindo que o exportador notifique a movimentação, que o país importador conceda autorização formal e que exista confirmação sobre a destinação do material antes do envio. As emendas de 2019, vigentes desde 2021, aumentaram esse regime para incluir determinados fluxos de resíduos plásticos contaminados (Basel Convention Secretariat, 2026). Entretanto, a efetividade desse mecanismo depende da capacidade administrativa do país importador de analisar notificações, avaliar riscos e acompanhar as operações autorizadas. Essa capacidade é limitada em muitos países em desenvolvimento, fazendo com que a existência formal do procedimento não garanta sua aplicação integral (Basel Convention, 2022; Krueger, 1998).

Assim, países com menor capacidade institucional podem tornar-se destinos de materiais que, embora sujeitos às regras internacionais, recebem menor escrutínio na prática (Kellenberg & Levinson, 2014).

O terceiro canal corresponde à assimetria de enforcement, isto é, à diferença entre possuir uma legislação formal e possuir capacidade efetiva de fiscalização. Dois países podem ter ratificado a Convenção de Basileia e adotado normas domésticas semelhantes, mas apresentar capacidades distintas para inspecionar cargas, identificar contaminação, rastrear remessas e aplicar sanções em casos de descumprimento. Dessa forma, são as diferenças na implementação efetiva da regulação, e não apenas o conteúdo formal das normas, que determinam a capacidade de controle dos fluxos internacionais de resíduos (D'Amato et al., 2012).

A distinção entre adesão formal e capacidade real de enforcement é sustentada por evidências empíricas da literatura. Kellenberg e Levinson (2014), utilizando dados bilaterais de 117 países entre 1988 e 2008, demonstraram que a ratificação da Emenda de Proibição de Basileia não resultou em redução dos fluxos de resíduos perigosos de países desenvolvidos para países em desenvolvimento. Os autores mostram que a adesão formal ao tratado, quando desacompanhada de capacidade de implementação, não altera necessariamente os padrões de comércio. De forma complementar, Nuñez-Rocha (2016), ao analisar o regime europeu de resíduos por meio de um modelo gravitacional, mostrou que, mesmo dentro da União Europeia, onde existe elevado grau de harmonização normativa, diferenças na eficiência institucional influenciam os fluxos de resíduos. Esses resultados indicam que a existência de normas é uma condição necessária, mas insuficiente: a capacidade de transformar regras em fiscalização efetiva é o elemento que condiciona os fluxos bilaterais.

O comércio internacional de resíduos constitui uma rede de fluxos entre países com diferentes capacidades de geração, processamento e controle desses materiais. Martínez et al. (2022), ao analisarem 108 categorias de resíduos comercializados entre 163 países no período de 2001 a 2019, demonstraram que grande parte dos fluxos de resíduos perigosos ocorre entre países desenvolvidos, embora permaneça uma assimetria de envios de economias desenvolvidas para economias em desenvolvimento. Nesse sistema, a Convenção de Basileia consolidou-se como o principal marco multilateral utilizado pela literatura para analisar a governança internacional dos resíduos. Entretanto, seus mecanismos concentram-se na definição de procedimentos de controle e consentimento, enquanto permanecem lacunas sobre como diferenças na capacidade regulatória

dos países afetam a reorganização dos fluxos após choques específicos. É nesse ponto que mudanças unilaterais adotadas por grandes importadores, especialmente a China, tornam-se relevantes.

A China foi protagonista no comércio internacional de resíduos por mais de duas décadas, tornando-se o principal destino de diversas categorias de materiais recicláveis provenientes de países desenvolvidos. As restrições implementadas pelo governo chinês a partir de 2013 e intensificadas com a política *National Sword*, em 2018, modificaram a estrutura desse comércio ao reduzir a entrada de resíduos no país e induzir a reorganização dos fluxos internacionais para novos destinos. O primeiro sinal desse endurecimento ocorreu com a operação *Green Fence*, iniciada em 2013, que intensificou inspeções e rejeições de cargas consideradas contaminadas ou fora dos padrões estabelecidos. Balkevicius et al. (2020), utilizando um modelo gravitacional com dados ao nível de 6 dígitos do Sistema Harmonizado (HS), estimaram uma redução de 26% nas exportações de resíduos de baixa qualidade para a China após essa política, sem identificar desvio estatisticamente significativo para outros países em desenvolvimento.

O processo se intensificou em 2017 com a política *National Sword*, anunciada pela China à Organização Mundial do Comércio, que proibiu, a partir de 2018, a importação de 24 categorias de resíduos sólidos, incluindo diversos tipos de plásticos, papel e outros materiais recicláveis, além de estabelecer limites mais rígidos de contaminação para os resíduos permitidos (World Trade Organization, 2017). Como consequência, a política afetou exportadores de diferentes regiões, provocando acúmulo temporário de resíduos em países desenvolvidos e redirecionamento dos fluxos para novos destinos (Brooks et al., 2018). A relevância da *National Sword* como choque regulatório decorre, portanto, de sua magnitude e do fato de ter alterado simultaneamente a demanda de um dos maiores importadores mundiais e a organização das cadeias internacionais de reciclagem. Thakur (2026) demonstrou que uma regulação unilateral dessa dimensão pode reduzir custos ambientais com efeitos que ultrapassam o território do país que a implementa. Contudo, os efeitos desse choque não foram homogêneos entre materiais, pois dependeram das características econômicas e tecnológicas de cada mercado.

No caso dos plásticos, a redução das importações chinesas provocou redirecionamento dos fluxos para países com menor capacidade de processamento. Tran et al. (2021) estimaram que as importações chinesas de plástico residual diminuíram 92%, com desvio concentrado em países de renda baixa e média da Ásia Oriental, Pacífico e Europa Central. Liang et al. (2021) mostraram

que vários países receptores no Sudeste Asiático responderam ao aumento dos fluxos adotando novas restrições entre 2018 e 2020. A Tailândia suspendeu a emissão de novas licenças para importação de plástico residual em 2018; o Vietnã interrompeu a emissão de novas licenças para importação de sucata; e a Malásia estabeleceu uma moratória temporária e anunciou restrições progressivas às importações de plástico residual. Esses movimentos indicam que alguns países aumentaram o rigor especificamente para resíduos após o choque chinês, embora seus indicadores gerais de qualidade regulatória permaneçam relativamente baixos. Isso sugere que medidas agregadas de qualidade institucional podem não capturar integralmente mudanças regulatórias direcionadas a setores específicos.

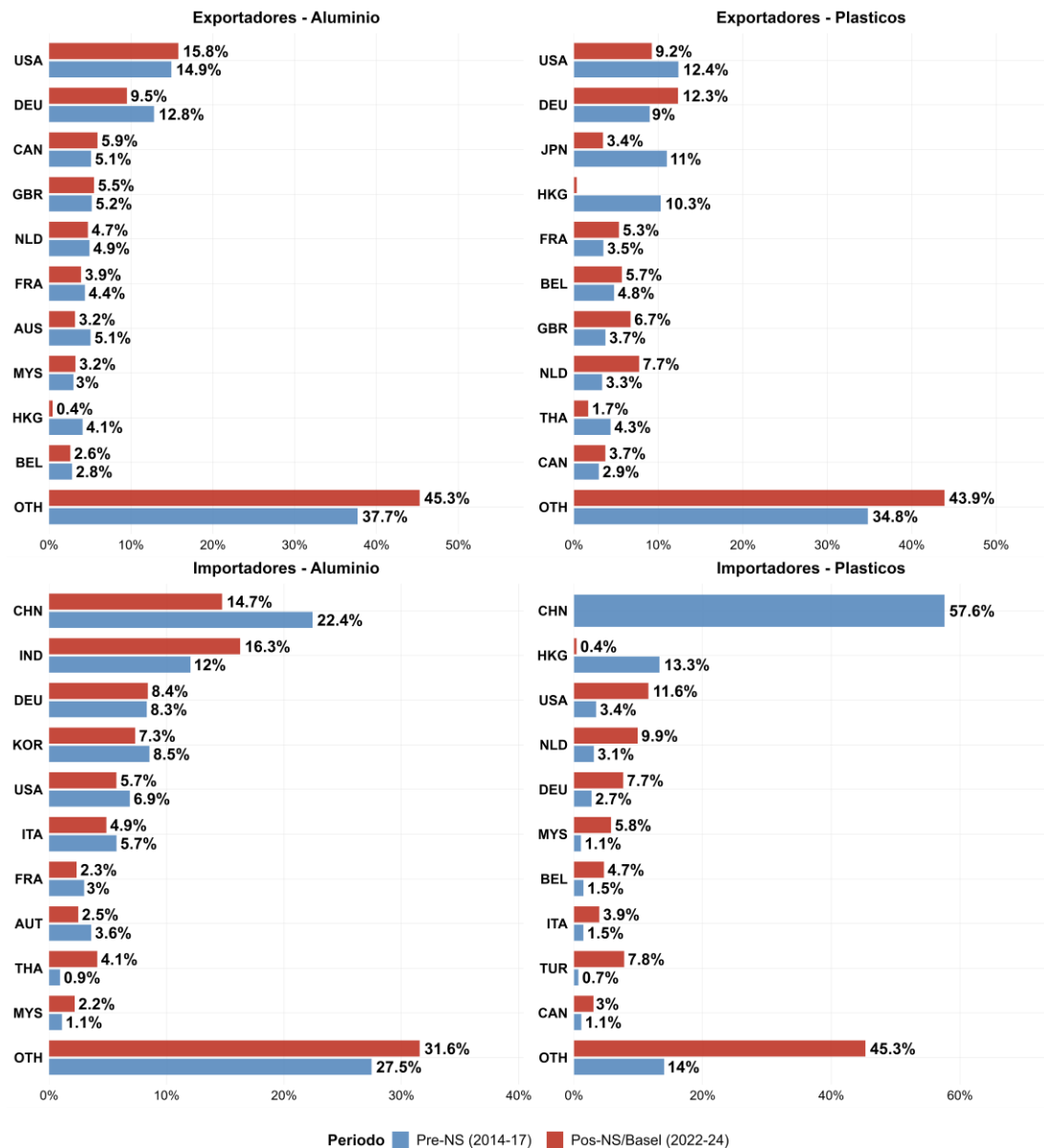
Li et al. (2024) estimaram que pelo menos 63% do plástico importado precisa ser reciclado para alcançar viabilidade econômica, taxa aproximadamente 40 pontos percentuais superior à taxa média de reciclagem doméstica de 23%, indicando dificuldades de absorção de parte dos materiais recebidos. Chunsuttiwat e Coxhead (2024), ao testarem a hipótese do paraíso da poluição após o banimento chinês, encontraram evidências de que diferenças regulatórias contribuíram para direcionar fluxos de plástico para destinos com menor rigor ambiental.

Para a sucata de alumínio, entretanto, o padrão observado foi distinto, pois esse material possui mercado secundário consolidado, preços internacionais de referência e uma cadeia de processamento intensiva em capital (Capuzzi & Timelli, 2018). Dados do UN Comtrade para o período de 2010 a 2024 mostram que a Índia se tornou um dos principais destinos da sucata de alumínio após a National Sword (Figura 1), com importações próximas a 2 milhões de toneladas em 2025 e crescimento anual de 8,6% na década anterior (Material Recycling Association of India, 2024). Pothen e Hundt (2024), ao aplicarem um modelo gravitacional ao comércio de sucata de aço, estimaram que a demanda por sucata metálica apresenta baixa sensibilidade ao preço, refletindo a dependência tecnológica dos processos de fusão secundária. O contraste entre os efeitos observados para plásticos e alumínio após o mesmo choque regulatório sugere que a reorganização dos fluxos internacionais de resíduos depende não apenas das diferenças regulatórias entre países, mas também das características econômicas e tecnológicas dos materiais comercializado.

Essa diferença na reorganização dos fluxos após a National Sword pode ser observada na evolução da posição relativa dos países no comércio internacional de sucatas. A figura 1 apresenta os principais exportadores e importadores de plástico e alumínio antes e depois da implementação

da política chinesa, permitindo visualizar como o choque regulatório alterou a distribuição geográfica desses fluxos.

Figura 1. Principais exportadores e importadores de resíduos por grupo: alumínio e plástico (top 10 do período), antes e depois da *National Sword*



Elaboração própria. OTH corresponde ao conjunto de todos os demais países não listados. Azul = 2014-17 (pré-*National Sword*); vermelho = 2022-24 (pós-*National Sword*/Basel Amendment). Fonte: WITS/UN Comtrade.

3 METODOLOGIA

A amostra cobre o período de 2010 a 2023 para sucata de alumínio (HS 760200) e plásticos (HS 391510, 391520, 391530, 391590). Os dados de comércio bilateral provêm do WITS/UN Comtrade na forma de importações. Os fluxos de exportação foram construídos por espelho: importações declaradas pelo país j provenientes de i são interpretadas como exportações de i para j . Essa escolha é preferível porque a cobertura de importadores que reportam os dados é mais ampla na categoria de produtos e porque o importador tem incentivo fiscal para declarar o valor com maior precisão, dado que a base de incidência tarifária recai sobre o valor importado (Yotov et al., 2016).

Para eliminar pares sem fluxo comercial no período e concentrar a estimação nos países economicamente relevantes para cada material, foram retidos aqueles mercados que respondem por ao menos 95% do valor global do comércio do produto no período, ordenados em participação decrescente. Para alumínio, o critério resultou em 55 exportadores e 28 importadores. Para plásticos, resultou em 48 exportadores e 28 importadores¹. O período inicial em 2010 garante oito anos de janela pré-tratamento para o método diferenças em diferenças (DiD), com tripla diferença, coincidindo com a melhora de cobertura do Comtrade para países de renda baixa e média. A lista completa de países por produto consta no Anexo A.

A escolha de alumínio e plásticos como par comparativo decorre de ambos terem recebido o mesmo choque exógeno (*National Sword*, 2018), mas com estruturas de mercado que geram previsões opostas sobre o mecanismo dominante.² O plástico foi escolhido porque representa o principal alvo da *National Sword*. A política foi criada para restringir a entrada de resíduos plásticos de baixa qualidade, que respondiam pela maior parte das importações chinesas de resíduos sólidos. Embora outros materiais também tenham sido afetados, muitos deles não possuem códigos HS específicos para identificar, de forma consistente, o comércio internacional do resíduo ao longo do tempo. Isso dificulta a construção de uma base comparável e compromete a identificação do efeito da política. Ao mesmo tempo, a sucata de alumínio permaneceu fora do escopo das restrições da

¹ Taiwan foi mantido no conjunto de exportadores, mas excluído do conjunto de importadores por ausência de dados da variável da base *Direct Material Input*, que segue a prática estatística das Nações Unidas de não desagregar o território da China. A exclusão representa perda inferior a 2% do valor total de cada painel.

² Resíduos ferrosos (HS 7204) foram excluídos porque a participação da China como destino não ultrapassou 2% em nenhum ano do período, tornando inaplicável à identificação via DiD.

National Sword, possibilitando distinguir os efeitos específicos da política de mudanças mais amplas que afetaram o comércio internacional de resíduos após 2018.

3.1 Modelo gravitacional

A equação gravitacional, proposta por Tinbergen (1962) e fundamentada teoricamente por Anderson e van Wincoop (2003), é o instrumento padrão para análise de determinantes de fluxos bilaterais de comércio. Na formulação estrutural, o valor exportado é função direta do tamanho econômico do exportador e do importador, medido pelo PIB, e função inversa dos custos de comércio. Anderson e van Wincoop (2003) demonstraram que esses custos devem ser avaliados em termos relativos à resistência multilateral, isto é, ao conjunto de barreiras que cada país enfrenta com todos os seus parceiros, sob pena de viés nos coeficientes estimados quando essa dimensão é omitida. A solução usual consiste em incluir efeitos fixos de exportador-ano e importador-ano, que absorvem os termos de resistência multilateral de forma flexível. Head e Mayer (2014) mostraram que a combinação desses efeitos fixos com efeitos fixos de par de países capta, simultaneamente, os termos de resistência multilateral, os choques macroeconômicos específicos de cada país em cada ano e as características bilaterais invariantes no tempo, como distância, idioma e fronteira comum.

A estimação do modelo gravitacional em dados de comércio de resíduos enfrenta duas dificuldades que exigem atenção na escolha do estimador. A primeira é a presença de zeros na variável dependente, frequente em dados de resíduos porque muitos pares bilaterais apresentam fluxo nulo em determinados anos, padrão mais comum para plásticos entre países sem relação comercial preexistente. A segunda é a heterocedasticidade multiplicativa, problema que Santos Silva e Tenreyro (2006) demonstraram tornar inconsistente a estimação do modelo gravitacional na forma log-linear por mínimos quadrados ordinários (MQO), uma vez que a transformação logarítmica altera a esperança do erro quando a sua variância depende dos regressores. O estimador de Poisson com pseudo-máxima verossimilhança (PPML) resolve as duas dificuldades ao estimar a equação em nível, mantendo-a consistente sob heterocedasticidade de qualquer forma e acomodando observações de valor zero sem necessidade de transformação, razão pela qual Yotov et al. (2016) o consolidaram como prática padrão para estimação gravitacional estrutural.

A especificação gravitacional adotada neste trabalho responde aos objetivos (i) e (ii) e segue a forma estrutural recomendada por Anderson e van Wincoop (2003) e operacionalizada em Head e Mayer (2014) e Yotov et al. (2016), conforme seção 2.3. A variável dependente, X_{ijkt} , refere-se ao valor das importações bilaterais em dólares correntes³ do país i para o país j do produto k no ano t extraída do WITS/UN. As variáveis de interesse são o diferencial bilateral da qualidade regulatória, construído a partir do indicador *Regulatory Quality* do Banco Mundial (WGI), e, respectivamente para cada material analisado, o *Direct Material Input* (DMI) de minerais metálicos (DMI_ALU_{jt}) para o alumínio e o de produtos derivados de combustíveis fósseis (DMI_PLA_{jt}) para os plásticos, ambos extraídos da *Global Material Flows Database* (GMFD) do *United Nations Environment Programme/International Resource Panel* (UNEP/IRP). Essa base tem sido utilizada pelo próprio UNEP na elaboração de relatórios internacionais sobre uso de recursos naturais, economia circular e fluxos globais de materiais (UNEP/IRP, 2016).

O diferencial bilateral de qualidade regulatória (ΔRQ_{ijt}) é definido como a diferença entre o indicador de qualidade regulatória do país exportador e do país importador, isto é, $\Delta RQ_{ijt} = RQ_{it} - RQ_{jt}$, onde valores positivos apontam que o exportador apresenta qualidade regulatória superior à do importador, enquanto valores negativos indicam a situação oposta.

As variáveis DMI_ALU_{jt} e DMI_PLA_{jt} medem a quantidade de material utilizado na economia doméstica, somando a extração interna e as importações (UNEP/IRP, 2016). Dessa forma, o indicador fornece uma *proxy* para capacidade de processamento, sem o desconto das exportações que poderia gerar valores negativos para grandes exportadores de materiais. A interação entre o diferencial regulatório e o respectivo indicador de capacidade de processamento constitui o parâmetro principal para identificar o mecanismo da hipótese do paraíso da poluição em cada produto.

Para os fluxos de sucata de alumínio, a variável DMI_ALU_{jt} representa o consumo doméstico de produtos metálicos (produção interna mais importações). Sua utilização como *proxy* da demanda potencial por sucata de alumínio decorre do fato de que o alumínio, em suas formas primária e secundária, integra a cadeia produtiva de bens metálicos. Cullen e Allwood (2013) mostram que a sucata de alumínio é reinserida no sistema produtivo por meio de refusão e refino,

³ No modelo gravitacional, os efeitos fixos de ano absorvem a variação comum do nível de preços em cada período, e na tripla diferença os efeitos fixos de produto por ano absorvem inclusive variações de preços relativos entre os materiais, tornando a deflação redundante.

sendo posteriormente empregada na fabricação de produtos metálicos intermediários e finais. Assim, economias com maior processamento de produtos metálicos tendem a demandar maiores volumes de insumos metálicos ao longo de suas cadeias produtivas, aumentando o potencial de incorporação de sucata de alumínio. Além disso, a literatura sobre reciclagem de metais destaca que sucatas ferrosas e não ferrosas estão inseridas em uma estrutura industrial integrada, compartilhando etapas de coleta, triagem, transporte e comercialização (Brooks et al., 2019).

Para os resíduos plásticos, a variável de capacidade de processamento é construída a partir do DMI de produtos derivados de combustíveis fósseis, categoria disponível na base GMFD. Esta escolha é justificada pela própria estrutura dos dados. A documentação técnica da GMFD (UNEP/IRP, 2016) especifica que a categoria de produtos de combustíveis fósseis abrange plásticos e demais derivados petroquímicos, dos quais a maior parte corresponde ao processamento de plásticos.

A estrutura de efeitos fixos foi definida de modo a garantir a identificação das variáveis de interesse sem que estas sejam absorvidas pelos próprios controles. A variável ΔRQ_{ijt} varia nas dimensões do par e do tempo (i, j, t) , enquanto DMI_{jt} varia apenas pela dimensão do importador e do tempo (j, t) . A inclusão de efeitos fixos de importador-ano (δ_{jt}) absorveriam integralmente DMI_{jt} , visto que essa variável apresenta a mesma dimensão de variação dos efeitos fixos. Consequentemente, surgiria um problema de multicolinearidade, levando à absorção de DMI_{jt} pelos efeitos fixos. Por essa razão, a especificação principal adota efeitos fixos de importador δ_j e de produto-ano λ_{kt} , que controlam a heterogeneidade do destino e os choques setoriais anuais, comuns a todos os países, sem eliminar a variação temporal de $DMI_{ALU_{jt}}$ e $DMI_{PLA_{jt}}$.

Adota-se efeitos fixos de exportador (γ_i) , para controlar características permanentes do país de origem, e efeitos fixos de par bilateral (μ_{ij}) , que absorvem a heterogeneidade bilateral invariante no tempo, como a distância entre dois países, língua comum, laços coloniais e acordos comerciais histórico. Essa estratégia elimina o viés de variáveis omitidas que não variam ao longo do período amostral ou que variam para o exportador no tempo.

Especificação A (efeitos principais identificados):

Para alumínio:

$$X_{ijkt} = \exp[\beta_1 \Delta RQ_{ijt} + \beta_2 \ln(DMI_ALU_{jt}) + \beta_3 (\Delta RQ_{ijt} \times \ln(DMI_ALU_{jt})) + \beta_4 \ln(1 + \tau_{ijkt}) + \beta_5 APC_{ijt} + \gamma_i + \delta_j + \lambda_{kt} + \mu_{ij}] \times \varepsilon_{ijkt} \quad (1)$$

Para plásticos:

$$X_{ijkt} = \exp[\beta_1 \Delta RQ_{ijt} + \beta_2 \ln DMI_PLA_{jt} + \beta_3 (\Delta RQ_{ijt} \times \ln(DMI_PLA_{jt})) + \beta_4 \ln(1 + \tau_{ijkt}) + \beta_5 APC_{ijt} + \gamma_i + \delta_j + \lambda_{kt} + \mu_{ij}] \times \varepsilon_{ijkt} \quad (2)$$

em que β_1 captura o efeito da assimetria regulatória sobre os fluxos de importação; β_2 o efeito da capacidade de processamento do importador DMI_ALU_{jt} para alumínio, DMI_PLA_{jt} para plásticos; β_3 a interação entre ambos, parâmetro utilizado para identificar o mecanismo da hipótese do paraíso da poluição; e τ_{ijkt} é a tarifa aplicada, que entra na forma $\ln(1 + \tau_{ijkt})$ para acomodar pares com tarifa zero e preservar a interpretação de elasticidade (Yotov et al., 2016). Os dados de tarifas são da base TRAINS/COMTRADE. A variável APC_{ijt} indica a existência de acordo comercial com provisões ambientais entre o exportador e o importador. Sua construção parte da base TREND (*Trade and Environment Database*), que codifica o conteúdo ambiental dos acordos comerciais (Morin, Dür & Lechner, 2018). Para cada par de países e ano, são construídas duas versões da variável. A variável APC_{ijt_Ampla} assume valor igual a 1 quando o acordo em vigor entre as partes contempla ao menos uma provisão relacionada à gestão e reciclagem de resíduos domésticos, às restrições à exportação, importação ou transporte de resíduos perigosos ou a outras normas sobre resíduos perigosos, como regras de gestão, disposição, recuperação e liberalização do setor, assumindo valor 0 nos demais casos. Na segunda, a variável $APC_{ijt_Restrito}$ assume valor igual a 1 apenas quando o acordo contém disposições relativas às restrições à exportação, importação ou transporte de resíduos perigosos, permanecendo igual a 0 nos demais casos. As duas definições são estimadas separadamente como teste de robustez, permitindo avaliar se provisões ambientais mais abrangentes ou normas diretamente relacionadas ao controle do movimento transfronteiriço de resíduos produzem efeitos diferentes sobre os fluxos comerciais. A variável ΔRQ_{ijt} entra no modelo transformada pela função seno hiperbólico inverso (asinh) dado que o diferencial regulatório pode assumir valores negativos, inviabilizando o uso do logaritmo natural (ln). Já DMI_ALU_{jt} e DMI_PLA_{jt} são inclusos no modelo em ln, pois só assumem valores positivos.

Quanto à interpretação dos coeficientes, o estimador PPML tem a variável dependente em nível, o que define a leitura dos parâmetros. Para variáveis explicativas em logaritmo, como a capacidade de processamento e a tarifa, o coeficiente é uma elasticidade, ou seja, a variação percentual esperada no fluxo de comércio diante de uma variação de 1% na variável. Para variáveis que entram em nível ou sob a transformação seno hiperbólico inverso, como o diferencial regulatório, o coeficiente é uma semielasticidade, e a variação percentual aproximada no fluxo obtém-se por $((e^\beta - 1) \times 100)$. No termo de interação, o efeito do diferencial regulatório deixa de ser constante e passa a depender do nível de capacidade instalada do importador, razão pela qual sua interpretação exige o cálculo de efeitos marginais em diferentes níveis, apresentado na seção de resultados.

No termo de interação, a capacidade de processamento entra centralizada em torno de sua média dentro de cada material, ou seja, de cada valor de DMI_{jt} subtrai-se a média do material antes de multiplicá-lo pelo diferencial regulatório. A centralização não altera o coeficiente da interação, mas muda a interpretação dos efeitos principais, que passam a ser lidos no ponto médio da capacidade de processamento, e não no ponto de capacidade igual a zero, que não existe na amostra e não teria sentido econômico. Assim, o coeficiente do diferencial regulatório isolado mede seu efeito para um importador de capacidade média, o que torna o exame direto e reduz a colinearidade entre o termo de interação e seus componentes, um problema recorrente em modelos com interação que infla os erros-padrão dos efeitos principais. Os efeitos marginais reportados nos resultados são calculados sobre essa variável centralizada, nos percentis 25, 50 e 75 da capacidade de processamento de cada material.

A Especificação B serve de teste de robustez para verificar se os choques não absorvidos pelo efeito fixo importador-ano (δ_{jt}) afetam as estimativas.

Especificação B (estrutural, robustez):

Para alumínio:

$$X_{ijkt} = \exp [\beta_1 (\Delta RQ_{ijt} \times \ln(DMI_ALU_{jt})) + \beta_2 \ln(1 + \tau_{ijkt}) + \beta_3 APC_{ijt} + \gamma_{ikt} + \delta_{jkt} + \mu_{ij}] \times \varepsilon_{ijkt} \quad (3)$$

Para plásticos:

$$X_{ijkt} = \exp[\beta_1(\Delta RQ_{ijt} \times \ln(DMI_PLA_{jt})) + \beta_2 \ln(1 + \tau_{ijkt}) + \beta_3 APC_{ijt} + \gamma_{ikt} + \delta_{jkt} + \mu_{ij}] \times \varepsilon_{ijkt} \quad (4)$$

com efeitos fixos de exportador-produto-ano (γ_{ikt}), importador-produto-ano (δ_{jkt}) e par-produto (μ_{ijk}). Nessa especificação, os efeitos principais são absorvidos pelos efeitos fixos, mas a interação permanece identificada, pois o diferencial regulatório bilateral é definido como a diferença entre a qualidade regulatória do exportador e do importador, de modo que seus componentes são absorvidos pelos efeitos fixos exportador-produto-ano e importador-produto-ano. A capacidade de processamento do importador também é absorvida pelos efeitos fixos de importador-produto-ano, uma vez que, embora seja construída ao nível do importador e do ano, ela é definida separadamente para alumínio e plásticos, o que introduz variação na dimensão produto. Assim, se β_3 mantém sinal entre as duas especificações, o resultado da Especificação A ganha credibilidade.

O estimador PPML é preferível ao MQO na forma log-linear conforme demonstrado por Santos Silva e Tenreyro (2006) e discutido na seção 2.3. Os erros-padrão são clusterizados pelo par de países para acomodar correlação serial e heterocedasticidade dentro de cada relação ao longo do tempo.

Se $\beta_3 > 0$, a assimetria regulatória está associada a maiores fluxos de resíduos para países com maior capacidade de processamento do respectivo material. Sua interpretação depende das características do material sobre o qual a assimetria regulatória incide e das especificidades do setor em que ocorre o comércio. No caso do plástico, um coeficiente positivo sugere que diferenças regulatórias estão associadas ao direcionamento dos fluxos para países com regulamentações ambientais menos rigorosas. Isso porque para materiais com baixo valor de recuperação e limitada viabilidade de reinserção produtiva, como o plástico, os fluxos tendem a refletir a lógica de descarte, na qual os resíduos são direcionados a países onde os custos ambientais e de destinação final são menores. Já para o alumínio, o mesmo coeficiente positivo pode refletir a demanda industrial por um insumo reciclável de elevado valor econômico, de modo que o aumento dos fluxos esteja relacionado à sua utilização como matéria-prima no processo produtivo.

Como exercício de robustez, adota-se uma estratégia de estimação em duas etapas, em linha com Larch, Shikher e Yotov (2025). O indicador de capacidade de processamento do importador varia no nível de importador-ano, a inclusão do efeito fixo completo do lado do importador na estimação principal absorveria toda a variação da capacidade e impossibilitaria a identificação de

seu coeficiente. Na primeira etapa, estima-se por PPML uma equação gravitacional cuja variável dependente é o valor do fluxo bilateral de comércio, controlando pela tarifa, pelo diferencial regulatório e pela variável binária de acordo ambiental, e mantendo a interação fora da equação porque envolve a capacidade de processamento que a segunda etapa recupera. A especificação inclui efeitos fixos de exportador-produto-ano, importador-produto-ano e de par bilateral. Os coeficientes estimados na primeira etapa são recuperados para uso na segunda etapa. Em ambos os casos, a capacidade de processamento é absorvida pelos efeitos fixos do importador e não pode ser estimada diretamente nessa etapa.

Na segunda etapa, a base é agregada a uma observação por importador-ano para os dois materiais. No plástico, o efeito fixo de importador-produto-ano recuperado na primeira etapa é agregado ao nível de importador-ano, que é o nível em que a capacidade de processamento varia. Esse efeito fixo entra como variável dependente de uma regressão por MQO sobre o logaritmo da capacidade de processamento, com efeito fixo de ano e erros-padrão agrupados no importador. O agrupamento no importador acompanha o nível em que o regressor varia e evita a subestimação do erro-padrão que resultaria de tratar cada importador-ano como observação independente (Moulton, 1990). O procedimento estima o efeito da capacidade de processamento que havia sido absorvido pelos efeitos fixos do importador.

A próxima seção apresenta o estimador de DiD, em tripla diferença, que complementa a análise gravitacional ao explorar o choque exógeno do *National Sword* como experimento natural, investigando como a política afetou os fluxos de exportação de resíduos.

3.2 Estimador de tripla diferença

Conforme discutido na primeira seção, alumínio e plásticos possuem estruturas de mercado distintas que geram previsões opostas sobre o mecanismo de redirecionamento dos fluxos após um choque regulatório. Enquanto a hipótese de especialização eficiente prevê que o alumínio se dirige a destinos com elevada capacidade de processamento industrial independentemente do rigor regulatório, a hipótese do paraíso da poluição sugere que os plásticos migrem para destinos com menor rigor ambiental e capacidade institucional. Essas previsões são testadas no modelo gravitacional; a tripla diferença calculada pela lógica do DiD identifica o efeito causal do choque sobre o material efetivamente atingido.

A estratégia de identificação adotada é inspirada na metodologia de diferenças-em-diferenças, mas não utiliza a especificação tradicional, na qual o tratamento é representado por uma variável dicotômica. A exposição ao choque é medida de forma contínua, pela participação das exportações de cada país à China no período anterior à *National Sword*, caracterizando um modelo de dosagem. Isso significa que a política não distingue apenas países tratados e não tratados, mas considera que alguns estavam mais expostos ao choque do que outros. Assim, a identificação continua baseada na comparação entre os períodos anterior e posterior à política, porém explorando diferentes intensidades de exposição.

Dessa forma, o estimador deve ser interpretado como um modelo saturado, incluindo inclui todos os termos que a interação de três variáveis gera, preservando a lógica de identificação das DiD, adaptada para um tratamento contínuo. A inclusão de efeitos fixos de exportador-produto, produto-ano e par-produto absorve todos os componentes associados às dimensões do tratamento, de modo que a identificação decorre exclusivamente da interação entre a intensidade de exposição ao mercado chinês, o período posterior à *National Sword* e o produto afetado. O coeficiente de interesse mede se países mais dependentes do mercado chinês apresentaram uma alteração diferencial nas exportações de plástico, em comparação ao alumínio, após 2018, descontadas as diferenças permanentes entre pares comerciais e as variações específicas de exportadores, importadores e produtos ao longo do tempo. Com isso, a interpretação dos coeficientes, a lógica contrafactual e os mecanismos de identificação permanecem os mesmos da metodologia de DiD, diferindo apenas na forma de representar o tratamento, que passa a variar em intensidade, em vez de assumir apenas os valores de tratado e não tratado.

Essa análise é comparativa e, para isolar o efeito de uma política ou choque sobre um grupo afetado, compara-se a variação da variável de interesse desse grupo ao longo do tempo com a variação de um grupo que não foi afetado pelo mesmo choque. A ideia é que o grupo de controle sirva de contrafactual, isto é, que revele como os tratados teriam se comportado na ausência da intervenção, desde que ambos os grupos tivessem trajetórias paralelas antes do choque. Nesse estudo, o choque é a política chinesa (*National Sword*), em vigor desde janeiro de 2018, que proibiu ou restringiu a importação de 24 categorias de resíduos sólidos, com destaque para plásticos misto, que foi a categorias mais afetada.

O objeto de análise são os exportadores mundiais de alumínio e plásticos. A sucata de alumínio não está incluído no escopo do *National Sword* e serve como bem de comparação dentro

de uma estrutura de tripla diferença. A China continuou importando sucata de alumínio, o que o diferencia dos resíduos de menor valor alcançados pela política, como papel de baixa qualidade e o plástico, que tiveram suas exportações para a China interrompidas a partir de 2018. Como os dois materiais são exportados, em grande medida, pelo mesmo conjunto de países, exportadores de alumínio e de plásticos compartilharam o mesmo ambiente macroeconômico global no período 2010 a 2023. Fatores que afetaram o país exportador em geral, como a desaceleração do comércio global, as tensões comerciais de 2018 ou variações nos custos de frete, atingiram ambos simultaneamente e são cancelados na comparação entre eles. Por essa razão, o alumínio serve de contrafactual dentro do país e do ano na especificação de tripla diferença apresentada a seguir.

O uso desse modelo cumpre os objetivos (iii). A variável dependente é Y_{ikt} , que corresponde ao log do valor total exportado pelo país i no ano t para o produto k , agregado sobre todos os destinos e foi obtido na base WITS/UN. O *National Sword* qualifica-se como experimento quase-natural por três razões: foi decisão unilateral do governo chinês motivada por objetivos de qualidade ambiental doméstica, portanto exógena ao comportamento dos exportadores; o prazo entre o anúncio, em julho de 2017, e a implementação, em janeiro de 2018, foi curto, com restrição técnica de contaminação máxima de 0,5% que tornou a adaptação imediata inviável para a maioria dos exportadores; e o choque atingiu os exportadores em graus distintos conforme sua dependência prévia do mercado chinês. É justamente essa dependência prévia que define a variável de tratamento do modelo, medida pelo *share* das exportações de cada país para a China no período 2010 a 2016, calculada conforme segue:

$$Share_{ik} = \frac{X_{i,CHN,pre,k}}{\sum_j X_{i,j,pre,k}} \quad (5)$$

onde $X_{i,CHN,pre,k}$ são as exportações do produto k do país i para a China no período 2010 a 2016⁴, e o denominador é o total exportado de plástico⁵ por i para todos os destinos no mesmo período. Países com $Share_{ik}$ elevado tinham no mercado chinês um destino relevante de suas exportações e foram mais atingidos pelo choque. O cálculo tem como fonte a base WITS/UN.

A especificação principal da tripla diferença compara a trajetória do plástico com a do alumínio dentro do mesmo exportador e do mesmo ano, entre países com diferentes intensidades de dependência prévia do mercado chinês⁶ (Olden e Møen, 2022):

$$Y_{ikt} = \alpha + \beta(Share_{ik} \times Post_t \times Plastic_k) + \gamma_{ik} + \delta_{kt} + \varphi_{it} + \varepsilon_{ikt} \quad (6)$$

onde $Share_{ik} \in [0,1]$ é a participação da China no destino das exportações de plástico do país i no período anterior ao choque (2010 a 2016), $Post_t$ assume valor 1 a partir de 2018, $Plastic_k$ vale 1 para plástico e 0 para alumínio, γ_{ik} , δ_{kt} e φ_{it} são os efeitos fixos de exportador- produto, produto- ano e exportador- ano. A vantagem deste desenho é exigir uma única hipótese de tendências paralelas (Olden e Møen, 2022), formulada sobre o diferencial plástico menos alumínio: na ausência da política, esse diferencial evoluiria de forma semelhante entre países mais e menos dependentes da China.

⁴ A janela 2010 a 2016 responde a três exigências de identificação: a exposição precisa ser pré-determinada, pois a inclusão de anos posteriores ao choque faria a própria queda das exportações para a China reduzir mecanicamente o *share* dos países mais atingidos, tornando o tratamento função do resultado que ele deveria explicar; a janela encerra em 2016 porque o anúncio da política, em julho de 2017, pode ter induzido redirecionamento antecipado dos fluxos, o que contaminaria o padrão de comércio daquele ano; por fim, a média de sete anos atenua a volatilidade anual do comércio de resíduos, decorrente de flutuações de preço, câmbio e choques logísticos, de modo que o *share* capture a dependência estrutural do mercado chinês, e não a posição de um ano atípico.

⁵ O *share* é calculado exclusivamente sobre os fluxos de plástico porque a exposição relevante para a identificação é a dependência de cada país em relação ao mercado que fechou. O *National Sword* não alterou as condições de acesso da sucata de alumínio ao mercado chinês, de modo que uma participação calculada sobre o alumínio não mediria exposição ao choque. Calcular o *share* sobre o conjunto dos dois materiais tampouco seria adequado, pois diluiria a exposição de países muito dependentes da China no plástico com fluxos de alumínio que não estavam em risco.

⁶ O *share* entra com subscrito apenas de país porque é atribuído de forma uniforme às observações dos dois produtos do mesmo exportador. Essa construção é justificada, primeiro, porque o alumínio serve de contrafactual por compartilhar com o plástico a mesma exposição ao mercado chinês, diferindo apenas pela incidência da política, ao passo que participações próprias por material fariam a comparação contrastar exposições distintas sob políticas distintas; segundo, como o *share* não varia entre produtos, a dupla interação *Share*×*Post* é idêntica dentro de cada exportador-ano e é integralmente absorvida pelo efeito fixo de exportador por ano, assim como o *share* isolado é absorvido pelo efeito fixo de exportador por produto e a interação *Post*×*Plastic* pelo de produto por ano, razão pela qual os termos de ordem inferior não aparecem na equação e resta identificada apenas a interação tripla, cujo coeficiente mede quanto o plástico caiu além do alumínio, dentro do mesmo país e ano, entre exportadores mais e menos dependentes da China.

Para avaliar essa hipótese da tripla diferença, estima-se um estudo de eventos que permite ao efeito variar por biênio, substituindo a tripla interação única por interações entre biênio, *share* e o indicador de plástico:

$$Y_{ikt} = \alpha + \sum_{s \neq 2016-17} \beta_s \text{Share}_{ik} \times 1\{t \in s\} \times \text{Plastic}_k + \gamma_{ik} + \delta_{kt} + \varphi_{it} + \varepsilon_{ikt} \quad (7)$$

em que *s* indexa os biênios (2010-11, 2012-13, 2014-15, 2018-19, 2020-21 e 2022-23, 2016-17 é usado como referência) e cada coeficiente mede a diferença de trajetória do diferencial plástico menos alumínio entre países mais e menos expostos à China naquele biênio, relativa ao biênio de referência. Coeficientes próximos de zero e não significativos nos biênios anteriores a 2018 sustentam a hipótese de tendências paralelas, ao passo que coeficientes significativos após 2018 medem a resposta ao choque. Como robustez, o estudo de eventos é reestimado com referência apenas em 2016 e com 2017 isolado em categoria própria, para avaliar antecipação entre o anúncio, em julho de 2017, e a implementação.

A agregação em biênios, em vez de anos individuais, responde à volatilidade do comércio bilateral de resíduos, decorrente de flutuações de preço de *commodities*, variações cambiais e choques logísticos, que pode mascarar as tendências quando os coeficientes são estimados ano a ano, inflando os erros padrão e dificultando a interpretação dos padrões pré e pós-tratamento. A agregação suaviza esse ruído sem sacrificar a capacidade de identificar o momento da quebra estrutural, uma vez que o choque ocorre entre os biênios 2016-17 e 2018-19, e não no interior de nenhum deles. Por se tratar de tratamento contínuo, a interpretação do coeficiente como resposta à intensidade de exposição requer a versão forte da hipótese de tendências paralelas, nos termos de Callaway, Goodman-Bacon e Sant’Anna (2024), exigência atenuada neste desenho porque características do exportador que afetem os dois materiais de modo semelhante são absorvidas pelo efeito fixo de exportador- ano.

Identifica-se um conjunto de potenciais problemas, começando pela antecipação, dado que o anúncio da política em julho de 2017 pode ter induzido ajuste de comportamento antes da implementação formal, possibilidade avaliada por dois exercícios complementares: no estudo de eventos, 2017 é retirado do biênio de referência e passa a compor categoria própria, com 2016 como única referência, o que permite medir diretamente eventual ajuste antecipado; na equação

principal, o ano é excluído da amostra, a fim de verificar se o resultado depende de um período possivelmente contaminado. Merece atenção também o fato de o alumínio, que cumpre o papel de bem de comparação, deixar de estar inteiramente livre de restrições no fim da janela analisada. A China proibiu a importação de todo resíduo sólido a partir de 1º de janeiro de 2021, para dar cumprimento à lei revista de controle da poluição por resíduos sólidos (China, 2020). A sucata de alumínio passa, então, a ser parcialmente alcançada, ainda que material de alta pureza tenha continuado a ingressar no país reclassificado como matéria-prima reciclada, e não como resíduo. Como consequência, o diferencial entre plástico e alumínio pode ser comprimido nos anos finais, atenuando o coeficiente estimado. Para isolar esse efeito, a equação principal é reestimada com o período posterior restrito a 2018-2020.

Cabe considerar, ainda, a possibilidade de o *share* captar exposição econômica geral à China, e não a resposta específica à restrição sobre resíduos, preocupação endereçada por construção pelo efeito fixo de exportador-ano, que absorve qualquer choque comum aos dois materiais dentro de um mesmo exportador, e verificada de forma complementar pelo teste de placebo com minério de ferro e cobre não refinado apresentado na próxima seção. Persiste, por fim, a possibilidade de transbordamentos dos exportadores mais dependentes sobre os demais na busca por destinos alternativos, e, como o tratamento é contínuo, eventual contaminação dos países de baixa exposição aproxima as estimativas de zero, de modo que o coeficiente obtido representa um limite inferior para a magnitude do impacto.

A validade da hipótese de tendências paralelas e a solidez do resultado são avaliadas por um conjunto de verificações. Os coeficientes anteriores ao choque no estudo de eventos são testados em conjunto por um teste de Wald, cuja hipótese nula é a nulidade conjunta das diferenças de trajetória antes de 2018. A equação principal é reestimada excluindo 2017, restringindo o período pós a 2018-2020, excluindo Hong Kong e Macau, entrepostos de reexportação que figuram entre as maiores participações sem serem produtores, e por PPML com o valor exportado em nível, que incorpora os fluxos nulos descartados pela transformação logarítmica (Santos Silva e Tenreyro, 2006).

3.2.1 Testes placebo e falsificação

A robustez da identificação é avaliada por testes de placebo, o primeiro deles consiste na mudança do ano de tratamento: o *National Sword* é deslocado artificialmente para 2014 e para 2016 e a tripla diferença é reestimada nesses cenários fictícios, com a amostra restrita ao período anterior ao corte real de 2018. Se a identificação for válida, os coeficientes nesses placebos temporais deverão ser estatisticamente não significativos, pois não houve choque regulatório real nesses anos. Um coeficiente significativo indicaria que a estratégia está capturando tendências preexistentes no diferencial plástico menos alumínio, e não o efeito causal do *National Sword*.

O segundo teste utiliza como placebo de produto as exportações de minério de ferro (HS 2601) e cobre não refinado e anodos de cobre para refino (HS 7401), bens exportados para a China que não constavam entre as 24 categorias de resíduos vedadas. Se o mecanismo de identificação é específico ao choque regulatório sobre resíduos, os coeficientes para esses produtos placebo devem ser nulos. Um efeito significativo indicaria que $Trat_{ik}$ está capturando exposição econômica geral à China como vulnerabilidade a desacelerações da demanda chinesa ou a tarifas retaliatórias, e não o impacto específico da política sobre resíduos plásticos. Na tripla diferença esse placebo torna-se verificação complementar, pois o efeito fixo de exportador por ano já absorve a exposição geral à China; sua manutenção documenta que o canal descartado por construção tampouco aparece nos dados.

3.3 Composição dos destinos alternativos

O objetivo (iv) requer caracterizar não a magnitude do redirecionamento, já medida pela tripla diferença, mas o perfil dos destinos que absorveram os fluxos deslocados. Se o modelo gravitacional confirmar as hipóteses de atribuir os fluxos de plástico ao diferencial regulatório e os de alumínio à capacidade de processamento, os destinos que absorveram o plástico deslocado pelo *National Sword* devem ser de regulação mais frouxa que a origem, ao passo que a capacidade de processamento não deveria distinguir os dois materiais. Esta seção verifica se essa previsão se confirma nos dados, o que configura um exercício de verificação da previsão do modelo e não de identificação causal. Para cada exportador, calcula-se a média das características dos destinos atendidos, ponderada pela participação de cada importador no valor exportado. As características do importador compreendem a qualidade regulatória, tomada em nível e no diferencial em relação ao exportador, em que valores positivos deste último indicam destino menos regulado que o país

de origem, e a capacidade de processamento, medida pelo mesmo índice empregado no modelo gravitacional.

A agregação por exportador permite observar como a carteira de destinos de cada país se recompôs após o fechamento do mercado chinês, contrastando o intervalo anterior ao choque (2010 a 2016) e o posterior (2018 a 2023), com 2017 excluído por ser o ano do anúncio. A China é retirada da amostra, uma vez que o interesse recai sobre os destinos alternativos, e mantê-la faria a medida apenas registrar a saída do próprio mercado que se fechou. O alumínio cumpre nessa análise o papel de referência de comparação: por não ter sido alcançado pela política, sua carteira de destinos indica como a composição evoluiu na ausência da restrição, permitindo distinguir o movimento próprio do plástico de tendências gerais do comércio de resíduos. A comparação entre as variações observadas nos dois materiais é avaliada por teste de médias pareado por exportador, em painel balanceado de 39 exportadores presentes nos dois materiais e nos dois períodos.

A próxima seção apresenta os resultados.

4. RESULTADOS

Esta seção é subdividida em quatro partes, a primeira apresenta os resultados das regressões do modelo gravitacional, a segunda reúne os resultados obtidos a partir do estimador de tripla diferença, a terceira verifica se o perfil dos destinos que absorveram os fluxos deslocados é coerente com o mecanismo estimado pelo gravitacional, e a quarta discute as implicações de política e limitações.

4.1 Resultados do modelo gravitacional

A tabela 1 reúne as estimativas do modelo gravitacional para os dois materiais nas duas especificações e permite avaliar a hipótese do paraíso da poluição, segundo a qual a assimetria regulatória entre exportador e importador eleva os fluxos de resíduos plásticos, e a hipótese de especialização eficiente, em que os fluxos respondem à capacidade de processamento do destino e não ao rigor regulatório. A leitura conjunta dos coeficientes do diferencial regulatório, da

capacidade de processamento e do termo de interação mostra se o mecanismo opera de forma distinta entre os dois materiais e se as estimativas se mantêm sob estruturas alternativas de efeitos fixos.

Tabela 1. Resultados das especificações do modelo gravitacional PPML para o comércio internacional de resíduos de alumínio e plástico

	Alumínio(A)	Alumínio(B)	Plástico (A)	Plástico (B)
Diferencial regulatório (asinh)	0,0275 (0,3345)	-	0,1843 (0,3266)	-
DMI (log)	0,0453 (0,1851)	-	1,5168*** (0,2804)	-
Interação	0,2613** (0,1224)	0,0555 (0,1186)	-0,8097*** (0,1627)	0,2739** (0,1355)
Tarifa (log)	0,1357 (0,1300)	0,0341 (0,1678)	-0,2299** (0,1173)	-0,0529 (0,0511)
Acordo ambiental (amplo)	0,5773* (0,3402)	0,2018 (0,1905)	1,0183*** (0,1994)	0,0291 (0,1267)
Constante	17,8601*** (0,2011)	18,2297*** (0,1096)	16,0626*** (0,4148)	17,0449*** (0,1413)
N	17.077	17.077	61.488	57.895
Pseudo R ²	0,9115	0,9408	0,8522	0,9560
<i>Efeitos fixos</i>	Exp-ano; Imp; Ano; Par	Exp-prod- ano; Imp-prod-ano; Par	Exp-ano; Imp; Prod-ano; Par	Exp-prod- ano; Imp-prod-ano; Par

Elaboração própria. Erros-padrão entre parênteses, agrupados por par bilateral. * p<0,10; ** p<0,05; *** p<0,01. Exp = exportador; Imp = importador; Prod = produto; Par = par exportador-importador.

Para o alumínio, a interação entre o diferencial regulatório e a capacidade de processamento do importador é positiva e significativa ao nível de 5% na especificação A (0,2613), padrão mais nítido que o observado na rodada anterior. Como a variável dependente entra em nível e o estimador é PPML, a interação lê-se como semielasticidade, de modo que um aumento de 1% na capacidade de processamento do importador desloca em cerca de 0,26 ponto percentual o efeito de uma unidade adicional do diferencial regulatório sobre o fluxo de sucata de alumínio. O diferencial regulatório isolado, a capacidade de processamento isolada e a tarifa continuam sem significância estatística. Na especificação B, cuja estrutura de efeitos fixos por exportador-produto-ano e importador-produto-ano absorve quase toda a variação disponível, a interação perde significância (0,0555, não significativo) e a capacidade de processamento continua absorvida pela estrutura de efeitos fixos, não sendo estimada separadamente.

A ausência de efeito robusto do diferencial regulatório sobre o alumínio, tanto na especificação A quanto na B, é consistente com um mercado governado por fatores econômicos e produtivos que a própria estrutura de efeitos fixos já capta, como o valor de reaproveitamento do alumínio, o preço internacional do metal secundário, a oferta de cada exportador, a proximidade dos mercados consumidores e os custos de transporte. Na especificação A, o valor de reaproveitamento e o preço internacional, comuns a todos os pares em cada período, são absorvidos pelo efeito de produto-ano, a oferta de cada exportador ao longo do tempo é absorvida pelo efeito de exportador-ano e a proximidade dos mercados é absorvida pelo efeito de par. Na especificação B, cuja estrutura de exportador-produto-ano, importador-produto-ano e par é mais exigente, esses determinantes passam a ser controlados de forma ainda mais completa, inclusive os componentes que variam no tempo dentro de cada exportador e de cada importador, de modo que o resultado para o alumínio não decorre da omissão desses fatores, mas persiste mesmo quando são inteiramente absorvidos.

Esse resultado é compatível com Grether e de Melo (2003), que identificam o comércio de metais não ferrosos como exceção ao padrão de deslocamento para países de menor rigor ambiental, com o setor respondendo à dotação de fatores e não ao diferencial regulatório. Na mesma direção, Grether, Mathys e de Melo (2009) mostram que, para a poluição associada a metais, o efeito opera em sentido contrário ao previsto pela hipótese do paraíso da poluição, uma vez que as indústrias pesadas de metais têm baixa mobilidade internacional. Lai (2026) também observou que a abundância de fatores pode sobrepor-se à diferença de rigor regulatório, de modo

que um país de regulação estrita ainda importa a produção intensiva em poluição quando é abundante no fator correspondente, o que ajuda a explicar a evidência mista sobre o paraíso da poluição. Com isso, nota-se que a influência do diferencial regulatório sobre o comércio de sucata de alumínio tende a ser limitada, o que enfraquece a hipótese de paraíso de poluição nesse setor.

A variável de acordos comerciais com provisões relacionadas a resíduos, na versão ampla, apresenta para o alumínio coeficiente positivo e de significância fraca na especificação A (0,5773, $p < 0,10$), que não se sustenta na especificação B (0,2018, não significativo) nem na versão restrita, tanto na especificação A (0,1092) quanto na B (0,4731), ambas sem significância estatística (Anexo B), de modo que não há efeito robusto desses acordos sobre os fluxos de sucata de alumínio.

Para o plástico, a interação entre o diferencial regulatório e a capacidade de processamento é significativa nas duas especificações, com sinais opostos: negativo na especificação A (-0,8097, $p < 0,01$) e positivo na B (0,2739, $p < 0,05$). Na especificação A, com efeitos fixos de exportador-ano, importador, produto-ano e par, o coeficiente sugere que o efeito do diferencial regulatório sobre o fluxo diminui à medida que a capacidade de processamento do importador cresce. Em B, com efeitos fixos de exportador-produto-ano, importador-produto-ano e par, os efeitos fixos removem as diferenças entre pares e a resistência multilateral de cada produto em cada ano, de modo que o coeficiente passa a ser estimado apenas com a variação de cada par ao longo do tempo, isto é, com a forma como um mesmo exportador e importador alteram seu comércio de um ano para o outro. A inversão de sinal decorre dessa mudança na fonte de variação aproveitada por cada especificação, e não de contradição entre elas, pois o padrão observado entre pares não precisa coincidir com o padrão observado dentro de cada par no tempo. Nesta rodada, a capacidade de processamento isolada aparece positiva e significativa na especificação A do plástico (1,5168, $p < 0,01$), sinal de que destinos com maior capacidade instalada tendem a importar mais resíduo plástico mesmo antes de considerar o diferencial regulatório.

Para o plástico, a variável de acordos com provisões de resíduos apresenta coeficiente positivo e estatisticamente significativo na especificação A, tanto na versão ampla (1,0183, $p < 0,01$) quanto na versão restrita (1,6777, $p < 0,01$), esta última voltada às restrições ao movimento transfronteiriço de resíduos perigosos. Na especificação B, mais exigente, o coeficiente do acordo perde significância tanto na versão ampla (0,0291) quanto na restrita (0,3080), sinal de que o efeito é captado sobretudo pela variação entre pares, e não pela variação de um mesmo par ao longo do tempo. O sinal positivo na especificação A indica que pares de países vinculados por acordo com

esse conteúdo registram maiores fluxos bilaterais de resíduos plásticos, resultado compatível com a ideia de que a cooperação ambiental formalizada opera pela harmonização de normas de classificação, pela redução de custos de transação e pela previsibilidade quanto ao tratamento do resíduo no destino. A tarifa apresenta coeficiente negativo e significativo ao nível de 5% na especificação A (-0,2299), sinal esperado de que barreiras tarifárias mais altas reduzem o fluxo, mas perde significância na especificação B (-0,0529), de modo que a evidência sobre o papel das tarifas nesse comércio segue mais forte na especificação A.

A diferença de efeitos entre os dois materiais decorre da natureza de cada um deles. Nos resíduos plásticos, a presença de acordo com provisões de resíduos associa-se a maior comércio bilateral, enquanto nos fluxos de sucata de alumínio não se observa efeito robusto. A sucata de alumínio é insumo de valor econômico elevado e mercado estabelecido, cujos fluxos já se dirigem a destinos com escala metalúrgica, de modo que o conteúdo ambiental do acordo pouco altera o padrão de comércio. Nos resíduos plásticos, de baixo valor de recuperação e maior incerteza quanto à qualidade e à composição do material negociado, o acordo com provisões de resíduos funciona como infraestrutura institucional que viabiliza o fluxo, pela harmonização de normas de classificação, pelo reconhecimento mútuo de procedimentos de controle e pela previsibilidade quanto ao tratamento do resíduo no destino. O fato de o efeito aparecer no plástico e não no alumínio é coerente com a interpretação de que os dois mercados respondem a lógicas distintas, a de descarte no primeiro caso e a de suprimento industrial no segundo.

A tabela 2 apresenta os efeitos marginais do diferencial regulatório sobre o comércio internacional de resíduos para diferentes níveis de capacidade de processamento do país importador, correspondentes aos percentis 25, 50 e 75 do DMI centralizado de cada material, e verifica a terceira hipótese do estudo: o efeito da assimetria regulatória diminui com a capacidade de reciclagem no caso dos plásticos, enquanto no alumínio predomina a demanda industrial. Como o modelo inclui um termo de interação entre o diferencial regulatório e o DMI, o efeito do diferencial regulatório não é constante entre os países, variando conforme a capacidade instalada do importador. Assim, o coeficiente não pode ser interpretado isoladamente, é necessário calcular os efeitos marginais para diferentes níveis, o que permite avaliar como o impacto do diferencial regulatório se altera entre países de baixa, média e alta capacidade.

Tabela 2. Efeito marginal do diferencial regulatório por nível de DMI do importador

	Efeito marginal
Alumínio: DMI baixo (p25)	-0,0895 (0,3687)
Alumínio: DMI médio (p50)	0,0655 (0,3246)
Alumínio: DMI alto (p75)	0,1969 (0,2962)
Plástico: DMI baixo (p25)	0,8289** (0,3461)
Plástico: DMI médio (p50)	0,1348 (0,3272)
Plástico: DMI alto (p75)	-0,3507 (0,3484)
N (alumínio; plástico)	17.077; 61.488
<i>Efeitos fixos</i>	Exp-ano; Imp; (Prod-)ano; Par

*Elaboração própria. Erros-padrão entre parênteses. * $p < 0,10$, ** $p < 0,05$, *** $p < 0,01$.*

Para o plástico, o efeito do diferencial regulatório varia conforme a capacidade de processamento do importador. Quando o DMI é baixo, o efeito é positivo e significativo ao nível de 5%, com semielasticidade estimada em 0,8289 ($p=0,017$). Lido pela aproximação exponencial, equivale a uma elevação de cerca de 129% no fluxo de resíduos plásticos para cada unidade adicional do diferencial regulatório na escala transformada pelo seno hiperbólico inverso. No nível intermediário de capacidade o efeito cai para 0,1348 e deixa de ser significativo, e no nível alto torna-se negativo (-0,3507), também sem significância. O padrão mostra que o diferencial regulatório se associa ao comércio de resíduos plásticos onde a capacidade de processamento do destino é reduzida e perde relevância à medida que essa capacidade aumenta, em linha com o mecanismo de paraíso da poluição moderado pela capacidade instalada.

Para o alumínio, os efeitos estimados são positivos e crescem com o nível de capacidade de processamento, do nível baixo (-0,0895) passando pelo médio (0,0655) até o alto (0,1969), mas em nenhum dos três níveis o efeito atinge significância estatística ($p > 0,10$ em todos os casos). Diferentemente da rodada anterior, em que o efeito se tornava significativo no nível alto de capacidade, o resultado atual não permite rejeitar a hipótese de que o diferencial regulatório não

afeta o comércio de sucata de alumínio em nenhum nível de capacidade do importador. Ainda assim, o sinal crescente dos coeficientes pontuais mantém-se compatível com a leitura de que, quando existe alguma associação, ela tende a acompanhar a escala industrial do destino, e não o mecanismo de paraíso da poluição, no qual o efeito seria maior onde a capacidade é menor.

Em conjunto, as tabelas 1 e 2 apontam que a capacidade de processamento segue atuando como moderador do efeito do diferencial regulatório apenas no mercado de resíduos plásticos. Para o alumínio, nem o efeito principal do diferencial regulatório, nem sua interação com a capacidade de processamento na especificação B, nem os efeitos marginais em nenhum nível de capacidade se mostram estatisticamente robustos nesta rodada, o que reforça, de forma ainda mais nítida do que na estimativa anterior, que os efeitos da assimetria regulatória são heterogêneos entre materiais e dependem das características econômicas e produtivas de cada setor.

Como exercício de robustez, estimou-se o modelo em duas etapas para alumínio e plástico (Anexo C). O coeficiente da capacidade de processamento é positivo nos dois materiais (0,3438 no alumínio e 0,5203 no plástico), mas alcança significância estatística apenas no plástico ($p=0,029$); no alumínio, o coeficiente não é estatisticamente significativo ($p=0,170$). Como a segunda etapa regride o efeito fixo do importador, em escala logarítmica, sobre a capacidade também em logaritmo, o coeficiente lê-se como elasticidade, de modo que um aumento de 1% na capacidade instalada do importador associa-se a cerca de 0,52% mais demanda estimada por resíduo plástico; para o alumínio, a estimativa pontual sugere magnitude semelhante (0,34%), mas sem sustentação estatística nesta rodada. O resultado reforça, para o plástico, a resposta do mercado à demanda industrial dos destinos de maior escala, e indica que essa evidência é mais frágil para o alumínio do que na estimação anterior, ainda que o diferencial regulatório e sua interação sigam identificados separadamente na especificação principal.

O conjunto das estimativas apresentadas avalia as três hipóteses do modelo gravitacional. A primeira, de que a assimetria regulatória tem efeito positivo sobre os fluxos de resíduos plásticos no sentido do paraíso da poluição, encontra sustentação condicional: o efeito do diferencial regulatório é positivo e significativo ($p<0,05$) apenas onde a capacidade de processamento do destino é baixa, e se dissipa à medida que essa capacidade aumenta. A segunda, de que a capacidade de reciclagem do importador é o determinante principal dos fluxos de sucata de alumínio, com papel secundário da assimetria regulatória, confirma-se de forma ainda mais clara nesta rodada: o diferencial regulatório não exerce efeito robusto sobre o alumínio em nenhuma especificação, embora a associação positiva entre capacidade de processamento e fluxos de alumínio, identificada na segunda etapa, não tenha alcançado significância estatística ($p=0,170$), o que sugere que outros determinantes econômicos e produtivos, além da capacidade instalada, respondem pelo padrão observado. A terceira, de que o efeito marginal da assimetria regulatória diminui com a capacidade de reciclagem no plástico, ao passo que no alumínio predominaria a demanda por capacidade, sustenta-se apenas parcialmente: no plástico, os efeitos marginais são decrescentes e perdem significância à medida que a capacidade de processamento aumenta, confirmando o padrão anterior; no alumínio, os efeitos pontuais também crescem com o nível de capacidade, mas nenhum deles é estatisticamente significativo nesta rodada, de modo que a hipótese não pode ser confirmada

com a evidência estatística atual, ainda que o sinal dos coeficientes permaneça compatível com essa leitura.

O padrão alinha-se a Higashida e Managi (2014), que, ao desagregarem o comércio de recicláveis por material, também não identificam padrão uniforme de paraíso da poluição entre categorias, e a Millimet e Roy (2016), para quem o efeito da regulação sobre os fluxos é frágil e sensível à especificação. A heterogeneidade entre materiais dialoga com Copeland e Taylor (2004), segundo os quais o mecanismo do paraíso da poluição não opera de modo uniforme, mas depende de fatores estruturais e produtivos de cada setor, e com Chunsuttiwat e Coxhead (2024), que, ao examinarem os paraísos de poluição no comércio de plástico, condicionam o deslocamento dos fluxos à capacidade de absorção dos destinos, em linha com o papel moderador da capacidade de processamento identificado neste estudo. No plástico, o fluxo responde à assimetria regulatória e à cooperação ambiental formalizada, o que é coerente com Kellenberg (2012), para quem a direção dos fluxos de resíduos acompanha o gradiente regulatório bilateral. No alumínio, o comércio é governado pela demanda industrial e, possivelmente, pelos preços de referência de um mercado secundário, o que aproxima esse material da lógica de especialização eficiente e não da de paraíso da poluição. O comércio de resíduos, portanto, não se explica por um único mecanismo, mas pela interação entre assimetria regulatória, capacidade instalada e características econômicas de cada material.

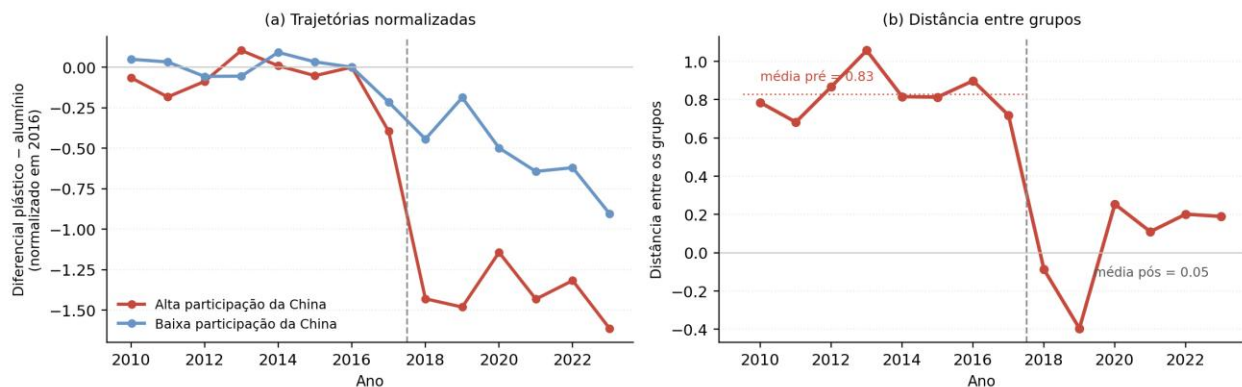
4.2. Resultados do estimador de tripla diferença

A estimação principal é a tripla diferença, que complementa a análise gravitacional ao isolar o efeito do *National Sword* sobre os fluxos de resíduos, sob a hipótese de tendências paralelas do diferencial plástico menos alumínio apresentada na seção 3.2. Essa hipótese é avaliada de três formas no período de 2010 a 2023: a inspeção gráfica das trajetórias dos dois materiais (figura 2), o estudo de eventos por biênio com referência em 2016-2017 (figura 3) e os testes de *Wald* e o *bootstrap*. O efeito médio depois do choque é resumido em um único coeficiente pela equação principal.

A figura 2 serve para verificar, de forma visual, a suposição que sustenta a estimação. A forma de comparação dos dados não ocorre do confronto entre o plástico de um país com o plástico de outro, e sim o plástico com o alumínio dentro do mesmo país e do mesmo ano. Essa escolha existe porque tudo o que atinge as exportações de um país em determinado ano, afeta os dois materiais ao mesmo tempo. Esse efeito desaparece quando um é comparado com o outro sob uma estrutura de efeitos fixos. O que sobra dessa comparação, e que o modelo de fato mede, é a distância

entre plástico e alumínio. Por isso a figura mostra essa distância, e não a trajetória de cada material separadamente: seria possível desenhar duas linhas, uma para cada produto, mas elas ilustrariam uma comparação que a estimação não faz. É também sobre essa distância que a hipótese de tendências paralelas da tripla diferença é formulada (Olden e Møen, 2022). O que separa as linhas do gráfico é o quanto cada país dependia da China antes do choque, que é a própria variável de tratamento definida na equação (5). A intuição é: se a política foi o que derrubou as importações chinesas de plástico, a queda deve aparecer nos países que tinham a China como destino relevante e não nos demais. Para tornar isso visível, os exportadores foram divididos em dois grupos pela mediana da participação chinesa, situada em 23,6%. O grupo mais exposto reúne os países acima desse corte, com participação média de 62,7%, e o grupo menos exposto reúne os demais, com média de 4,7%, de modo que a distância entre as médias dos dois grupos deixa claro que o corte separou situações bem distintas de dependência do mercado que se fechou.

Figura 2. Trajetória do logaritmo do valor exportado de resíduos plásticos e de alumínio (teste visual de tendências paralelas)



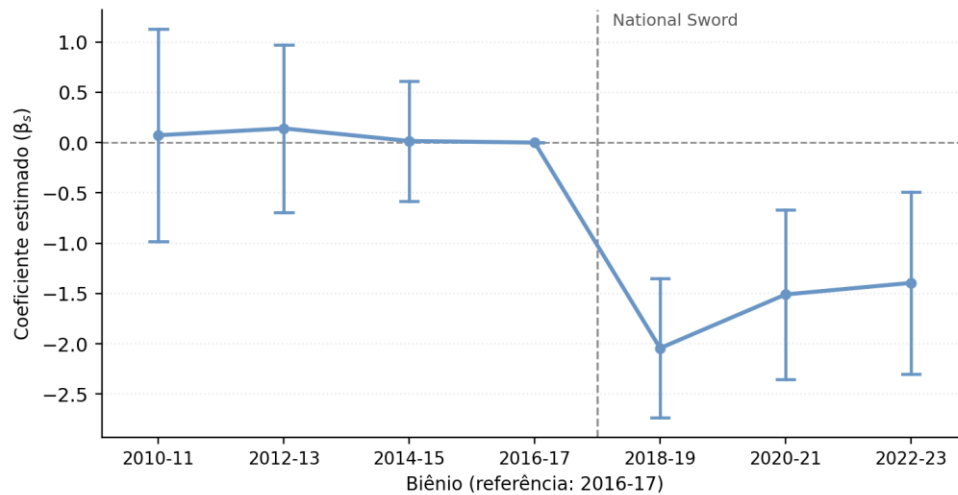
Elaboração própria. As séries representam o logaritmo do valor exportado ao longo do período, com a linha vertical no ano de implementação do *National Sword* (2018).

O painel (a) apresenta as duas séries normalizadas em 2016: entre 2010 e 2016 ambas oscilam próximo de zero, com amplitude de -0,18 a 0,10 no grupo mais exposto e de -0,06 a 0,09 no menos exposto, e a partir de 2018 se separam, com recuo médio de 1,40 contra 0,55. A queda comum aos dois grupos após o choque corresponde ao efeito fixo de produto-ano, que a estimação absorve, de modo que o efeito de interesse é a divergência entre as séries e não o nível em que elas se situam. O painel (b) isola essa divergência ao ilustrar a distância entre os grupos, que permanece em torno de 0,83 entre 2010 e 2017 e recua para 0,05 no período posterior. Essa variação de 0,78

é exatamente o número que o modelo produz quando substitui a participação contínua por grupos binários, caso em que o coeficiente estimado é de -0,784. A figura, portanto, não ilustra o resultado por analogia, mas mostra a própria quantidade que o modelo mede nessa versão. A divisão em dois grupos cumpre função ilustrativa, uma vez que a estimação emprega a participação de forma contínua, e o teste formal da hipótese é apresentado adiante, no estudo de eventos e no teste de Wald.

A figura 3 e a tabela 3 apresentam os coeficientes do estudo de eventos da tripla diferença por biênio, com o período 2016-2017 como referência. Os três biênios anteriores ao choque situam-se próximos de zero, com estimativas de 0,073, 0,141 e 0,016, todas não significativas, o que sustenta a hipótese de tendências paralelas sobre o diferencial plástico menos alumínio. A partir do biênio de implementação, os coeficientes tornam-se negativos e assim permanecem, com estimativas de -2,043, -1,509 e -1,395 nos três biênios posteriores, todas significativas a 1%. Isso significa que depois de 2018, e somente depois de 2018, o plástico dos exportadores mais dependentes da China cai em relação ao alumínio dos mesmos países.

Figura 3. Estudo de eventos da tripla diferença por biênio, com intervalos de confiança de 95%, referência no biênio 2016-2017



Elaboração própria. Coeficientes da interação biênio $\times$ share $\times$ plástico, com intervalos de confiança de 95% e erros-padrão agrupados por exportador. Os coeficientes anteriores à referência avaliam a hipótese de tendências paralelas e os posteriores captam a resposta ao choque. Diferencial plástico menos alumínio, entre exportadores mais e menos dependentes da China.

Tabela 3. Estudo de eventos da tripla diferença do efeito do *National Sword* sobre as exportações, por biênio

Biênio (ref. 2016-17)	Coeficiente (β)
2010-11	0,073 (0,539)
2012-13	0,141 (0,424)
2014-15	0,016 (0,304)
2018-19	-2,043*** (0,354)
2020-21	-1,509*** (0,430)
2022-23	-1,395*** (0,461)
Teste de Wald (pré-tendências), p-valor	0,987
Observações	6.132

Elaboração própria. Variável dependente: logaritmo do valor total exportado. Coeficientes da interação entre biênio, share e o indicador de plástico, relativos ao biênio de referência 2016-2017, com efeitos fixos de exportador por produto, produto por ano e exportador por ano. Erros-padrão entre parênteses, agrupados por exportador. * $p < 0,10$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$.

A interpretação segue a semielasticidade (cálculo exponencial): a variável dependente está em logaritmo e o *share* varia de 0, para um exportador sem parcela de mercado na China, a 1, para exportadores inteiramente dependentes desse destino, de modo que cada coeficiente compara esses dois extremos. No primeiro biênio após o choque, o valor de -2,043 corresponde a uma queda de 87,0%, ou seja, para um exportador dependente da China a razão entre plástico e alumínio recuou 87% a mais do que para um exportador sem qualquer dependência. Os biênios seguintes, com -1,509 e -1,395, equivalem a quedas de 77,9% e 75,2%, sugerindo que a reconfiguração não foi transitória, ou seja, os exportadores mais dependentes da China não recuperaram o patamar anterior de comércio de plástico ao longo dos seis anos seguintes ao choque. Como robustez, o estudo de eventos foi reestimado com 2017 isolado em categoria própria e 2016 como única referência, para verificar se houve ajuste antecipado entre o anúncio, em julho de 2017, e a implementação. O coeficiente de 2017 é de -0,458 e não é estatisticamente significativo, o que afasta o endendimento de que houve antecipação à política, enquanto os biênios posteriores mantêm o padrão, com -2,272, -1,738 e -1,623, todos significativos a 1%.

A figura 3 e a tabela 3 descrevem o efeito biênio a biênio, ao passo que a tabela 4 apresenta o resultado principal, que sintetiza em um único coeficiente o impacto médio depois do choque. A tripla interação entre *share*, período posterior e o indicador de plástico é de -1,706, estatisticamente significativo. Pela aproximação exponencial, isso corresponde a uma retração próxima de 82% no diferencial de fluxo exportado na comparação entre exportadores de exposição nula e plena à China, magnitude confirmada pelo *wild cluster bootstrap*.

Tabela 4. Estimativa de tripla diferença do efeito do *National Sword* sobre as exportações

	Tripla diferença (DDD)
Share × Pós × Plástico (β)	-1,706*** (0,391)
Efeitos fixos	
Exportador × produto	Sim
Produto × ano	Sim
Exportador × ano	Sim
Observações	6.132

Elaboração própria. Variável dependente: logaritmo do valor total exportado. Efeitos fixos de exportador por produto, produto por ano e exportador por ano. Erros-padrão entre parênteses, agrupados por exportador. * $p < 0,10$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$.

O teste de Wald sobre os três coeficientes anteriores à política não rejeita a hipótese nula, com p-valor de 0,987: antes do choque, o diferencial entre plástico e alumínio não se afastava entre os exportadores mais e menos dependentes do mercado chinês. Em termos econômicos, isso significa que os países que viriam a ser atingidos pelo *National Sword* não vinham perdendo espaço no comércio de plástico frente aos demais, de modo que a ruptura observada a partir de 2018 não dá continuidade a um movimento já em curso. Cabe registrar que os intervalos de confiança do período anterior, embora amplos, excluem efeitos da ordem do que se observa depois de 2018, de modo que a não rejeição não decorre apenas de imprecisão das estimativas.

A tabela 5 reúne as verificações de robustez da equação principal, a exclusão de 2017, ano de anúncio, resulta em coeficiente de -1,747, com significância estatística. A restrição do período pós a 2018-2020, que evita a contaminação do banimento chinês total de resíduos sólidos de janeiro de 2021 sobre a sucata de alumínio, resulta em -1,895, também significativo. A exclusão de Hong Kong e Macau, entrepostos de reexportação, resulta em -1,577, significativo; e a estimação por PPML com o valor em nível, que incorpora os fluxos nulos, resulta em -2,757, também estatisticamente significativa. O aumento de magnitude quando o período pós é restrito a 2018-2020 é coerente com a contaminação tardia do bem de comparação. A estimativa por PPML, maior em módulo, indica que a margem extensiva reforça o resultado em vez de atenuá-lo, com fluxos que se tornam nulos após o choque e são descartados pela transformação logarítmica.

Tabela 5. Robustez da tripla diferença: exclusão de 2017, período pós restrito a 2018-2020, exclusão de entrepostos e PPML

	Base	Sem 2017	Pós 2018-2020	Sem HKG/MAC	PPML
Share × Pós × Plástico (β)	-1,706*** (0,391)	-1,747*** (0,416)	-1,895*** (0,411)	-1,577*** (0,391)	-2,757*** (0,405)
Observações	6.132	5.694	4.818	6.076	5.690

Elaboração própria. Variável dependente: logaritmo do valor total exportado, exceto na coluna PPML, em que o valor entra em nível. Erros-padrão entre parênteses, agrupados por exportador. * p<0,10; ** p<0,05; *** p<0,01.

Como verificação adicional, conduziu-se o teste de placebo temporal, supondo-se que o *National Sword* tivesse sido implementado em 2014 ou em 2016, com a amostra restrita ao período anterior ao corte real de 2018. Os coeficientes da tripla interação são de -0,099 e -0,076, ambos sem significância. A ausência de efeito nos placebos reforça a hipótese de tendências paralelas e afasta a preocupação de que o efeito estimado capture uma tendência pré-existente alheia à política.

No teste placebo com ferro e cobre (tabela 6), estimado na mesma especificação do painel principal, o coeficiente da interação entre tratamento e período posterior é de -0,365 e não é significativo, resultado confirmado pelo *wild cluster bootstrap*. Não há indicação de que os exportadores mais expostos à China tenham reduzido as exportações de ferro e cobre no mesmo período, o que reforça que o efeito encontrado para o plástico não decorre de um choque geral alheio à política.

Tabela 6. Teste de placebo de produto: plástico frente a minério de ferro e cobre não refinado

	Plástico (efeito real)	Ferro e cobre (placebo)
Share $\times$ Pós $\times$ Plástico (β)	-1,594*** (0,346)	-0,365 (0,527)
Constante	5,831*** (0,050)	5,299*** (0,075)
N	3.094	2.436
R ²	0,9167	0,8513
Efeitos fixos	Exportador; Ano	Exportador; Ano

Elaboração própria. Minério de ferro (HS 2601) e cobre não refinado (HS 7401) não integravam as categorias vedadas pela *National Sword*. Erros-padrão entre parênteses, agrupados por exportador. * $p < 0,10$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$.

Os dois resultados fortalecem a interpretação causal do impacto estimado da política sobre as exportações de plástico. Se o coeficiente da interação $Share_{ik} \times Post_t \times Plastic_k$ fosse significativo no teste placebo, demonstraria que o resultado poderia estar captando uma tendência comum a todos os exportadores, e não um efeito da política sobre o produto analisado. Como isso não ocorre, o teste apoia a validade do efeito estimado na especificação principal.

Retomando a hipótese de identificação, a inspeção gráfica, o estudo de eventos e o teste de Wald com p-valor de 0,987 convergem para a validade das tendências paralelas do diferencial plástico menos alumínio, e os placebos temporal e de produto afastam a conclusão de que o efeito capture uma tendência comum que não tem relação com a política.

A queda persistente das exportações de plástico dos exportadores mais expostos depois de 2018 está alinhada com a restrição chinesa, que redirecionou fluxos que antes se apoiavam em um destino de baixo custo de destinação, mecanismo próximo do descrito por Copeland e Taylor (2004) para o paraíso da poluição e documentado para o comércio de resíduos por Baggs (2009) e por Kellenberg e Levinson (2014). O resultado é coerente com a literatura sobre a própria *National Sword*, que registra a reconfiguração do comércio global de resíduos plásticos depois de 2018 (Brooks et al., 2018), a reação dos fluxos às barreiras regulatórias no episódio anterior do *Green Fence*, uma política chinesa de 2013, anterior ao *National Sword*, que endureceu a fiscalização na

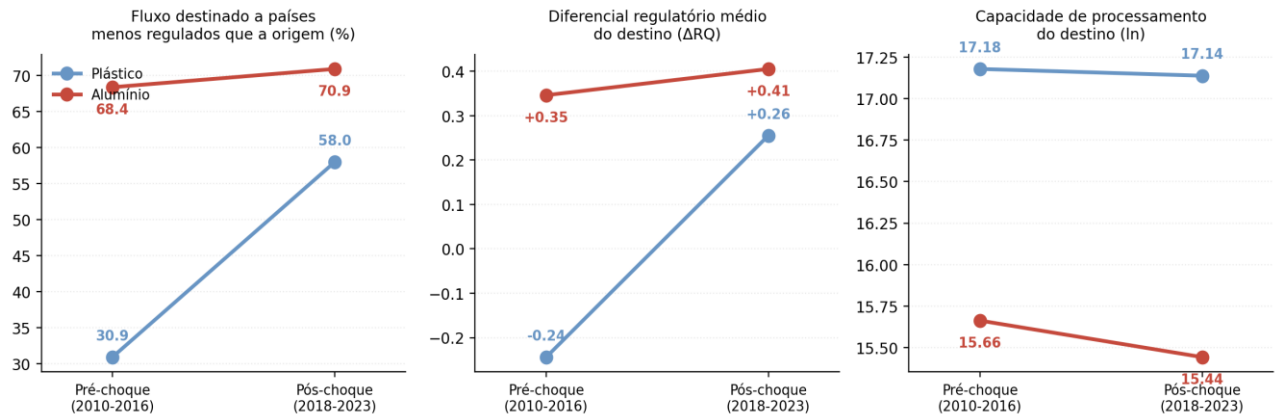
entrada de resíduos importados por alguns meses, mas de forma temporária e parcial. Seria uma prévia do que viria em 2018, com a rejeição de carregamentos contaminados (Balkevicius et al., 2020) e o deslocamento em direção a destinos de menor exigência regulatória, os refúgios de resíduos discutidos por Chunsuttiwat e Coxhead (2024).

4.3 Composição dos destinos alternativos

A seção 4.1 estimou que o diferencial regulatório governa os fluxos de plástico e que a capacidade de processamento governa os de alumínio. A seção 4.2 confirmou que o *National Sword* deslocou o plástico dos exportadores mais dependentes da China. Se essas duas estimativas são observadas simultaneamente, os destinos que absorveram o plástico deslocado devem ser de regulação frouxa, não de alta capacidade. Essa seção apresenta a composição dos destinos alternativos para verificar se esse padrão se confirma nos dados. A descrição completa da redistribuição dos fluxos comerciais após o *National Sword* é apresentada no anexo D.

Antes do choque, 30,9% do valor exportado de plástico para destinos que não a China dirigia-se a países menos regulados que a própria origem, participação que sobe para 58,0% no período posterior, ao passo que para o alumínio a mesma medida permanece praticamente estável, passando de 68,4% para 70,9%. A qualidade regulatória média do destino acompanha esse movimento nas duas formas de medida: em nível, cai de 0,64 para 0,13 no plástico e recua apenas de 0,08 para 0,01 no alumínio; no diferencial em relação à origem, sobe de -0,24 para 0,26 no plástico e varia de 0,35 para 0,41 no alumínio. A capacidade de processamento do destino, por sua vez, recua de forma semelhante nos dois materiais.

Figura 4. Composição dos destinos alternativos ao mercado chinês, por material, antes e depois do *National Sword*



Elaboração própria. Médias dos destinos ponderadas pela participação no valor exportado, com a China excluída e 2017 omitido. Os níveis de capacidade não são comparáveis entre materiais, por serem medidos de forma específica para cada um, sendo comparáveis apenas as variações.

A tabela 7 reúne essas medidas e submete a comparação a um teste de médias pareado por exportador. A variação da participação destinada a países menos regulados é de 27,0 pontos percentuais no plástico contra 2,5 pontos no alumínio, e a diferença entre as duas variações é estatisticamente significativo. O mesmo vale para a qualidade regulatória do destino, que recua 0,50 no plástico e 0,07 no alumínio, e para o diferencial em relação à origem, que sobe 0,50 e 0,06, respectivamente, ambos significativos. A capacidade de processamento é a única dimensão em que os dois materiais se movem de forma semelhante, com recuo de 0,04 no plástico e 0,22 no alumínio e diferença não significativa. Os sinais opostos entre nível e diferencial são esperados, pois o destino do plástico torna-se mais permissivo em termos próprios ao mesmo tempo em que se distancia da regulação vigente na origem.

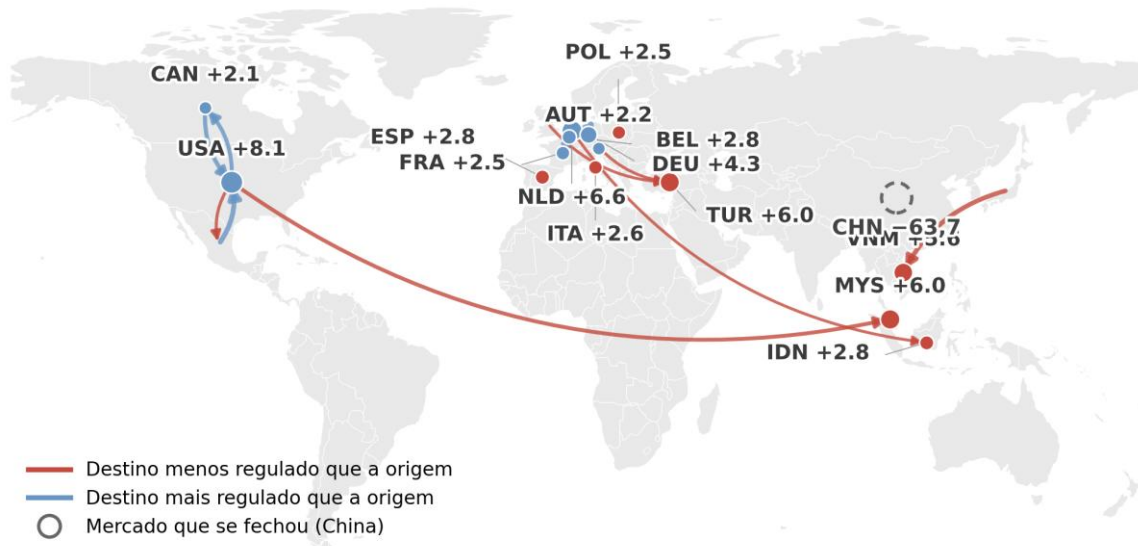
Tabela 7. Composição dos destinos alternativos ao mercado chinês, por material, antes e depois do *National Sword*

Característica do destino	Plástico			Alumínio			P-valor
	Pré	Pós	Variação	Pré	Pós	Variação	
% do fluxo para destino menos regulado	30,9	58,0	+27,0	68,4	70,9	+2,5	0,000
Qualidade regulatória do destino	0,64	0,13	-0,50	0,08	0,01	-0,07	0,000
Diferencial regulatório origem-destino	-0,24	0,26	+0,50	0,35	0,41	+0,06	0,000
ln capacidade de processamento	17,18	17,14	-0,04	15,66	15,44	-0,22	0,115

Elaboração própria. Médias das características dos destinos, ponderadas pela participação de cada destino no valor exportado, calculadas por exportador e agregadas em painel balanceado de 39 exportadores. A qualidade regulatória refere-se ao próprio importador; o diferencial mede a regulação da origem menos a do destino, de modo que valores maiores indicam destino mais permissivo. A China é excluída e 2017 é omitido. A última coluna traz o p-valor do teste de médias pareado por exportador para a diferença entre as variações dos dois materiais.

A geografia do redirecionamento, exibida na figura 5, mostra que o deslocamento se deu por duas rotas simultâneas. Parte do fluxo foi absorvida por economias de regulação mais rigorosa que a origem, com destaque para Estados Unidos, Países Baixos e Alemanha, que juntos ganharam cerca de 19 pontos percentuais de participação e concentram trocas de proximidade geográfica, como o comércio intraeuropeu e o norte-americano. Outra parte migrou para destinos de regulação mais frouxa, sobretudo Malásia, Turquia, Vietnã e Indonésia, que somam cerca de 20 pontos percentuais e recebem fluxos originados em economias de regulação bem mais rigorosa, como Japão, Alemanha e Reino Unido. É essa segunda rota que sustenta o resultado da tabela 7 e caracteriza o redirecionamento como descarte em direção a jurisdições permissivas.

Figura 5. Redirecionamento dos fluxos de resíduos plásticos após o *National Sword*



Elaboração própria. Os círculos indicam o ganho de participação de cada destino, em pontos percentuais, entre os períodos anterior e posterior ao choque. As setas representam os doze maiores aumentos de fluxo bilateral, com espessura proporcional ao aumento. A cor distingue destinos menos regulados que a origem daqueles mais regulados. O agregado Ásia, outros, sem localização única, foi omitido do mapa.

O perfil dos destinos é coerente com a previsão do modelo gravitacional, pois o plástico passou a ser dirigido a destinos de governança mais frágil, movimento que não se observa no alumínio, mas os dois materiais não se distinguem quanto à capacidade de processamento de seus destinos. Isso confirma que a margem pela qual o resíduo de baixo valor se redistribuiu foi a permissividade regulatória do destino, e não sua aptidão técnica, exatamente o que a combinação do gravitacional com o DiD prevê. Cabe registrar que esta seção verifica uma previsão derivada das seções anteriores, caracterizando para onde os fluxos migraram e confronta esse padrão com o mecanismo estimado, ao passo que a atribuição causal do choque sobre o volume exportado permanece a cargo da tripla diferença apresentada na seção 4.2.

Tomados em conjunto, os dois modelos e a análise de composição dos mercados de destino contam uma história única: o plástico deslocou-se para economias de menor ganho regulatório e menor capacidade instalada, o que sugere o redirecionamento como descarte, e não como realocação guiada pela demanda industrial por matéria-prima secundária. O exame integrado desses resultados e suas consequências para o desenho de política são desenvolvidas na seção seguinte.

4.4 Implicações para a política comercial e ambiental e limitações

Os resultados estimados neste trabalho dialogam com políticas de resíduos e de economia circular em vigor ou em fase de implementação nos planos multilateral, europeu e brasileiro, mostrando que a capacidade de processamento do destino fornece uma dimensão que as regras atuais ainda não incorporam, pois esses instrumentos normalmente classificam os países em categorias binárias.

A Convenção de Basileia constitui o primeiro ponto, visto que o PIC, estendido ao plástico contaminado desde 2021, reduziu o comércio desse material entre países desenvolvidos e em desenvolvimento (Ishimura et al., 2024). Esse mecanismo poderia direcionar maior atenção às exportações destinadas a países com menor capacidade de processamento, grupo no qual o diferencial regulatório se associou ao aumento dos fluxos de resíduos plásticos.

O Regulamento Europeu de Transferência de Resíduos, por exemplo, em vigor desde maio de 2024, proíbe a exportação de resíduos plásticos para países fora da OCDE prevista para novembro de 2026, e exige que o país de destino comprove uma gestão ambientalmente adequada (European Commission, 2024). Esse desenho utiliza a condição de membro ou não da OCDE como principal critério, sem considerar diretamente a capacidade de processamento de cada destino. A incorporação desse fator poderia complementar o regulamento e, ao mesmo tempo, diferenciar materiais cujos fluxos respondem a mecanismos distintos, como plástico e alumínio. A Seção 4.3 mostra que parte dos fluxos redirecionados após o *National Sword* passou a se concentrar em Malásia, Turquia, Vietnã e Indonésia, destinos que podem demandar acompanhamento mais próximo durante a implementação da nova regulamentação.

O Brasil é outro exemplo, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010, atualizada pela Lei nº 15.088/2025) e a Política Nacional de Economia Circular (Decreto nº 12.082/2024) estabelecem diretrizes para prevenção da geração de resíduos, reutilização, reciclagem e destinação ambientalmente adequada, mas não diferenciam o comércio internacional de resíduos conforme as características de cada material. A diferença observada entre plástico e alumínio indica que instrumentos, como o de logística reversa e incentivos previstos pela Política Nacional de Economia Circular, tendem a produzir efeitos distintos conforme o material. Enquanto o comércio de resíduos plásticos é mais sensível a mecanismos que fortalecem a gestão e a coordenação dos fluxos internacionais, o comércio de sucata de alumínio responde

predominantemente à demanda industrial e à capacidade produtiva dos países importadores. Além disso, como o Brasil ocupa a 19ª posição entre os maiores importadores mundiais de sucata de alumínio, com participação de 1,23% no comércio internacional desse material (Anexo A), informações sobre a infraestrutura disponível para tratamento dos resíduos podem contribuir para a avaliação das importações.

As diretrizes da OCDE sobre responsabilidade estendida do produtor recomendam que o custo do descarte seja assumido no país de origem (OECD, 2016). Compagnoni et al. (2025) mostram que esse tipo de regulação pode aumentar o comércio de resíduos de maior valor ao facilitar sua inserção em mercados secundários. Nesse contexto, a verificação do cumprimento das metas de reciclagem também poderia considerar as condições de tratamento existentes nos países de destino, reduzindo a possibilidade de que essas metas sejam alcançadas apenas pelo redirecionamento de resíduos para locais com infraestrutura limitada.

Em conjunto, os resultados deste estudo mostram que regular o comércio de resíduos apenas por classificações como Norte e Sul, membros e não membros da OCDE ou países pertencentes ao Anexo VII da Convenção de Basileia não contempla toda a heterogeneidade observada nos fluxos internacionais. A capacidade de processamento do destino surge como um critério complementar para identificar situações em que diferenças regulatórias podem favorecer o deslocamento de resíduos, especialmente no caso dos plásticos.

Essas conclusões precisam ser interpretadas à luz das limitações da análise. O estudo identifica o efeito do choque regulatório sobre os fluxos comerciais e descreve o perfil dos destinos que passaram a receber o material redirecionado, mas não mede diretamente os danos ambientais decorrentes desses fluxos nem estima seus efeitos sobre o bem-estar. As interpretações apresentadas são compatíveis com os resultados empíricos, sem constituir evidências causais sobre os impactos ambientais do comércio de resíduos. Pesquisas futuras podem integrar informações sobre comércio internacional, capacidade de tratamento e indicadores de qualidade ambiental para aprofundar essa discussão.

A principal contribuição desta dissertação não está em mostrar que plástico e alumínio respondem a mecanismos distintos, resultado já antecipado pela teoria, mas em demonstrar essa distinção com identificação causal, usando um material como contrafactual do outro sob o mesmo choque. O plástico apresenta maior sensibilidade ao diferencial regulatório em países com menor capacidade de processamento, ao passo que a sucata de alumínio é explicada principalmente pela

demanda industrial dos importadores. O desenho de tripla diferença permite atribuir essas respostas às características dos materiais, e não a diferenças de amostra, período ou choque, o que distingue este trabalho da literatura que estima o efeito do *National Sword* sobre o plástico sem um bem de comparação. A análise do choque mostra também que o redirecionamento dos fluxos ocorreu sem eliminar o comércio internacional de resíduos, o que desloca o passivo do descarte para destinos de governança mais frágil e reforça a importância da capacidade efetiva de processamento dos países importadores.

Esses resultados têm implicação direta para acordos comerciais que tratam de resíduos. Como os mecanismos que orientam o comércio variam conforme o material negociado, futuros acordos poderiam adotar disciplinas específicas para diferentes tipos de resíduos, em vez de aplicar uma única regra a todos os fluxos. Alguns instrumentos já caminham nessa direção, ainda que sem diferenciar por tipo de material, o que reforça a relevância de incorporar essa distinção. Na Convenção de Basileia, as emendas de 2019, vigentes desde 2021, passaram a exigir consentimento prévio para plásticos contaminados, mas mantiveram a sucata metálica sob regime simplificado, reconhecendo implicitamente que os dois materiais impõem riscos distintos ao destino (Basel Convention Secretariat, 2022).

Em âmbito bilateral, o *North Sea Resources Roundabout*, iniciativa entre França, Países Baixos, Reino Unido e Flandres, busca harmonizar critérios regulatórios para facilitar o comércio de recursos secundários entre seus participantes, o que na prática significa reduzir o diferencial regulatório que o modelo identifica como motor do comércio de plástico. No Japão e na Coreia do Sul, a economia circular foi institucionalizada por legislação específica, como a *Framework Act on Resource Circulation*, que estabelece diretrizes para reduzir a geração de resíduos e ampliar sua reutilização e reciclagem. Essas ações tratam os resíduos por categorias distintas e condicionam os fluxos à capacidade do destino, mas não diferenciam as disciplinas de acordo com a estrutura de mercado do material, que é o que os resultados deste estudo indicam ser o fator determinante. À luz desses instrumentos, os achados deste estudo sugerem que que esses instrumentos ganhariam precisão ao condicionar o regime de cada fluxo à estrutura de mercado do material transportado: resíduos com mercados secundários consolidados e processamento intensivo em capital, como o alumínio, podem ser regulados pela verificação da capacidade instalada no destino, ao passo que resíduos de baixo valor e processamento difuso, como o plástico, exigem controle do diferencial

regulatório entre origem e destino para evitar que o comércio funcione como descarte em jurisdições permissivas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo investigou se a assimetria regulatória ambiental entre exportador e importador e a capacidade de reciclagem do destino determinam os fluxos bilaterais de comércio de resíduos de alumínio e de plásticos de forma estruturalmente distinta no período de 2010 a 2023, e buscou identificar causalmente o mecanismo de ajustamento gerado pelo choque do *National Sword* de 2018.

O modelo gravitacional mostra que os dois materiais obedecem a lógicas de comércio opostas. No plástico, o diferencial regulatório eleva o fluxo apenas quando a capacidade de processamento do destino é baixa, efeito que se dissipa e se torna negativo à medida que essa capacidade cresce, padrão condizente com o paraíso da poluição moderado pela capacidade de absorção do destino. No alumínio, a assimetria regulatória não exerce efeito robusto, e o fluxo cresce com a capacidade instalada do importador, resultado que aproxima o comércio de sucata desse metal da lógica de demanda industrial por matéria-prima secundária.

O estimador de tripla diferença, ao explorar o *National Sword* como choque exógeno e usar o alumínio como contrafactual dentro do mesmo exportador e ano, acrescenta a dimensão causal que o gravitacional não isola. A política reduziu em cerca de 82% o diferencial de exportações de plástico dos exportadores mais dependentes do mercado chinês, efeito que surge no biênio da intervenção, persiste nos períodos seguintes, passa no teste de tendências paralelas com p-valor de 0,987 e resiste a cinco exercícios de robustez e a dois placebos. A resposta do alumínio ao mesmo choque é fraca e pouco robusta, o que reproduz, no experimento natural, a heterogeneidade encontrada no gravitacional. A verificação do perfil dos destinos que absorveram os fluxos deslocados confirma a previsão do modelo: o plástico migrou para destinos de governança mais frágil, ao passo que a capacidade de processamento não distingue os dois materiais.

A contribuição deste trabalho não reside em mostrar que plástico e alumínio respondem a mecanismos distintos, resultado que a teoria já antecipa, mas em demonstrar essa distinção com identificação causal, dentro de um desenho que compara dois materiais exportados pelos mesmos países e no mesmo período, diferindo apenas na exposição à política. Essa estrutura permite atribuir

as diferenças de resposta às características dos materiais, e não a diferenças de amostra, período ou conjuntura, o que separa este trabalho da literatura que acompanha o efeito do *National Sword* sobre o plástico sem um bem de comparação.

O estudo apresenta quatro limitações: (i) a qualidade regulatória empregada é um indicador de governança geral, não de regulação ambiental de resíduos especificamente, e variações no rigor de fiscalização dentro de um mesmo país não são captadas por essa medida; (ii) o alumínio, embora não tenha sido alvo do *National Sword* de 2018, passou a ser parcialmente alcançado pelo banimento chinês de resíduos sólidos de janeiro de 2021, o que pode comprimir o diferencial entre os materiais nos biênios finais do painel e atenuar a magnitude dos coeficientes posteriores ao choque; (iii) a análise de composição dos destinos, por sua vez, verifica uma previsão do modelo gravitacional e não identifica um efeito causal próprio, de modo que o padrão observado é coerente com o mecanismo estimado, mas não exclui explicações alternativas para a recomposição dos destinos; por último, (iv) a base bilateral não inclui comércio intrafirma nem fluxos ilegais, que podem representar parcela dos movimentos de resíduos de menor valor e que escapam dos registros alfandegários.

Três direções de pesquisa se abrem a partir destes resultados: estender a comparação a outros pares de materiais, como resíduos têxteis ou eletrônicos, que combinam baixo valor de recuperação com composição heterogênea e para os quais a previsão do modelo seria de comportamento semelhante ao do plástico; a segunda sugestão é acompanhar se a reconfiguração dos destinos do plástico é persistente ou se os países receptores, como a Malásia e o Vietnã, que já adotaram restrições próprias a partir de 2019, estão reproduzindo a cascata regulatória que a China iniciou; em terceiro lugar, é sugerido incorporar dados de preços de referência da *London Metal Exchange* e de índices de preço de plástico reciclado para separar o efeito-preço do efeito-regulação, distinção que o desenho atual controla via efeitos fixos de produto por ano mas não decompõe.

No plano de política, os resultados recomendo que acordos sobre comércio de resíduos ganhariam precisão ao condicionar o regime de cada fluxo à estrutura de mercado do material transportado. Resíduos com mercados secundários consolidados e processamento intensivo em capital podem ser regulados pela verificação da capacidade instalada no destino, ao passo que resíduos de baixo valor e processamento difuso exigem controle do diferencial regulatório entre origem e destino para evitar que o comércio funcione como descarte em jurisdições permissivas.

Embora a análise se concentre nos resíduos plásticos e de alumínio, os mecanismos identificados podem ser aplicáveis a outros resíduos que apresentem características econômicas semelhantes, como heterogeneidade do material, baixo valor de recuperação ou elevada dependência de capacidade de processamento. Essa possibilidade, contudo, deve ser investigada em estudos específicos para cada cadeia. Além disso, a utilização da DMI como proxy da capacidade de reciclagem constitui uma limitação, pois o indicador não mede diretamente a infraestrutura de reciclagem nem suas variações ao longo do tempo. Pesquisas futuras podem aperfeiçoar essa dimensão por meio de indicadores dinâmicos e mais específicos da capacidade de processamento, preferencialmente variantes no tempo e, quando disponíveis, associados aos pares de países, permitindo identificar com maior precisão como a capacidade de reciclagem influencia os fluxos internacionais de resíduos.

REFERÊNCIAS

- Abbring, J. H., & Heckman, J. J. (2007). Econometric evaluation of social programs, part III: Distributional treatment effects, dynamic treatment effects, dynamic discrete choice, and general equilibrium policy evaluation. In J. J. Heckman & E. E. Leamer (Eds.), *Handbook of Econometrics* (Vol. 6B, pp. 5145–5303). Elsevier.
- Anderson, J. E. (1979). A theoretical foundation for the gravity equation. *The American Economic Review*, 69(1), 106–116.
- Anderson, J. E., & Marcouiller, D. (2002). Insecurity and the pattern of trade: An empirical investigation. *Review of Economics and Statistics*, 84(2), 342–352. <https://doi.org/10.1162/003465302317411587>
- Anderson, J. E., & van Wincoop, E. (2003). Gravity with gravitas: A solution to the border puzzle. *American Economic Review*, 93(1), 170–192.
- Angrist, J. D., & Pischke, J.-S. (2009). *Mostly harmless econometrics: An empiricist's companion*. Princeton University Press.
- Antràs, P., & Foley, C. F. (2015). Poultry in motion: A study of international trade finance practices. *Journal of Political Economy*, 123(4), 809–852. <https://doi.org/10.1086/681592>
- Antràs, P., & Gortari, A. (2020). On the geography of global value chains. *Econometrica*, 88(4), 1553–1598.

Autor, D. H. (2003). Outsourcing at will: The contribution of unjust dismissal doctrine to the growth of employment outsourcing. *Journal of Labor Economics*, 21(1), 1–42.

Autor, D. H., Dorn, D., & Hanson, G. H. (2013). The China syndrome: Local labor market effects of import competition in the United States. *American Economic Review*, 103(6), 2121–2168.

Baggs, J. (2009). International trade in hazardous waste. *Review of International Economics*, 17(1), 1–16. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9396.2008.00778.x>

Baier, S. L., & Bergstrand, J. H. (2007). Do free trade agreements actually increase members' international trade? *Journal of International Economics*, 71(1), 72–95. <https://doi.org/10.1016/j.jinteco.2006.02.005>

Baldwin, R., & Tomiura, E. (2020). Thinking ahead about the trade impact of COVID-19. In R. Baldwin & B. W. di Mauro (Eds.), *Economics in the time of COVID-19* (pp. 59–71). CEPR Press.

Balkevicius, A., Sanctuary, M., & Zvirblyte, S. (2020). Fending off waste from the west: The impact of China's Operation Green Fence on the international waste trade. *The World Economy*, 43(10), 2742–2761. <https://doi.org/10.1111/twec.12949>

Basel Convention Secretariat. (1989/1992). *Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and their Disposal*. United Nations Environment Programme.

Basel Convention Secretariat. (2026). *Plastic waste amendments: Overview*. <https://www.basel.int/implementation/plasticwaste/amendments/overview/tabid/8426/default.aspx>

Basel Convention. (2022). *Decision BC-15/3: Improving the functioning of the prior informed consent procedure*. Conference of the Parties to the Basel Convention, COP-15.

Bastiaens, I., & Postnikov, E. (2017). Greening up? The effects of environmental standards in EU and US trade agreements. *Environmental Politics*, 26(5), 847–869. <https://doi.org/10.1080/09644016.2017.1338213>

Bergstrand, J. H. (1985). The gravity equation in international trade: Some microeconomic foundations and empirical evidence. *Review of Economics and Statistics*, 67(3), 474–481.

Bergstrand, J. H. (1989). The generalized gravity equation, monopolistic competition, and the factor-proportions theory in international trade. *Review of Economics and Statistics*, 71(1), 143–153.

Bourtsalas, A. T., Yepes, I. M., & Tian, Y. (2023). US plastic waste exports: A state-by-state analysis pre-and post-China import ban. *Journal of Environmental Management*, 344, 118604.

Bown, C. P., & Crowley, M. A. (2007). Trade deflection and trade depression. *Journal of International Economics*, 72(1), 176–201.

Brambilla, I., & Porto, G. G. (2016). Structuring optimal trade policy under monopolistic competition. *Journal of International Economics*, 100, 1–12.

Brasil. (2010). Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União.

Brasil. (2025). Lei nº 15.088, de 6 de janeiro de 2025. Altera a Lei nº 12.305/2010 (Política Nacional de Resíduos Sólidos). Diário Oficial da União.

Brasil. (2024). Decreto nº 12.082, de 27 de junho de 2024. Institui a Política Nacional de Economia Circular (PNEC). Diário Oficial da União.

Brooks, A. L., Wang, S., & Jambeck, J. R. (2018). The Chinese import ban and its impact on global plastic waste trade. *Science Advances*, 4(6), eaat0131. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat0131>

Brooks, L., Gaustad, G., Gesing, A., Mortvedt, T., & Freire, F. (2019). Ferrous and non-ferrous recycling: Challenges and potential technology solutions. *Waste Management*, 85, 519–528.

Brunel, C., & Gallego-Álvarez, I. (2018). Environmental provisions in trade agreements and their impact on trade flows. *Journal of Environmental Economics and Management*, 89, 218–238.

Callaway, B., & Sant’Anna, P. H. C. (2021). Difference-in-differences with multiple time periods. *Journal of Econometrics*, 225(2), 200–230.

Callaway, B.; Goodman-Bacon, A.; Sant’anna, P. H. C. Difference-in-differences with a continuous treatment. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research, 2024. (NBER Working Paper, n. 32117). DOI: 10.3386/w32117.

Cameron, A. C., Gelbach, J. B., & Miller, D. L. (2008). Bootstrap-based improvements for inference with clustered errors. *The Review of Economics and Statistics*, 90(3), 414–427. <https://doi.org/10.1162/rest.90.3.414>

Capuzzi, S., & Timelli, G. (2018). Preparation and melting of scrap in aluminum recycling: A review. *Metals*, 8(4), 249. <https://doi.org/10.3390/met8040249>

Chaney, T. (2008). Distorted gravity: The intensive and extensive margins of international trade. *American Economic Review*, 98(4), 1707–1721.

Chen, Y., Zhu, X., & Zeng, A. (2023). Decoupling analysis between economic growth and aluminum cycle: From the perspective of aluminum use and carbon emissions. *Journal of Environmental Management*, 344, 118461.

China. Ministry of Ecology and Environment; Ministry of Commerce; National Development and Reform Commission; General Administration of Customs. Announcement on Matters concerning the Total Ban on Solid Waste Import. Beijing, 2020. Disponível em: https://english.mee.gov.cn/News_service/media_news/202011/t20201130_810429.shtml. Acesso em: 24 jul. 2026.

Chunsuttiwat, P., & Coxhead, I. (2024). Will you take my (s)crap? Waste havens in the global plastic waste trade. *Review of World Economics*, 160(4), 1203–1246. <https://doi.org/10.1007/s10290-024-00534-8>

Cole, M. A. (2004). Trade, the pollution haven hypothesis and the environmental Kuznets curve: Examining the linkages. *Ecological Economics*, 48(1), 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2003.09.007>

Cole, M.A., Elliott, R.J. (2003), Determining the trade–environment composition effect: The role of capital, labor and environmental regulations. *Journal of Environmental Economics and Management*, 46(3), 363–383

Compagnoni, M., Grazzi, M., Pieri, F., & Tomasi, C. (2025). Extended producer responsibility and trade flows in waste: The case of batteries. *Environmental and Resource Economics*, 88(1), 43–76. <https://doi.org/10.1007/s10640-024-00907-5>

Compaore, W., Horie, M., & Tanaka, K. (2013). Determinants of trade in recyclable wastes: Evidence from commodity-based trade of waste and scrap. *Environment and Development Economics*, 18(6), 734–756. <https://doi.org/10.1017/S1355770X13000302>

Copeland, B. R., & Taylor, M. S. (1994). North-South trade and the environment. *Quarterly Journal of Economics*, 109(3), 755–787. <https://doi.org/10.2307/2118421>

Copeland, B. R., & Taylor, M. S. (2004). Trade, growth, and the environment. *Journal of Economic Literature*, 42(1), 7–71. <https://doi.org/10.1257/002205104773558047>

Correia, S., Guimarães, P., & Zylkin, T. (2020). Fast Poisson estimation with high-dimensional fixed effects. *The Stata Journal*, 20(1), 95–115. <https://doi.org/10.1177/1536867X20909691>

Council of the European Union. (2011). *Council Regulation (EU) No 333/2011 of 31 March 2011 establishing criteria determining when certain types of scrap metal cease to be waste under Directive 2008/98/EC*. Official Journal of the European Union, L 94, 2–11.

Cullen, J. M., & Allwood, J. M. (2013). Mapping the global flow of aluminum: From liquid aluminum to end-use goods. *Environmental Science & Technology*, 47(7), 3057–3064. <https://doi.org/10.1021/es304256s>

D’Amato, A., Iozzi, A., & Trovato, G. (2012). The trade of polyethylene waste: Prices or policies? *Environmental Economics and Policy Studies*, 14(4), 341–356. <https://doi.org/10.1007/s10018-012-0044-4>

DeSantis, R., Esposito, P., Lasinio, C. J., 2021. Environmental regulation and productivity growth: main policy challenges. *Int. Econ.* 165, 264–277.

Dithmer, J., & Abdulai, A. (2017). Does trade openness contribute to food security? A dynamic panel analysis. *Food Policy*, 69, 218–230.

Duflo, E. (2001). Schooling and labor market consequences of school construction in Indonesia: Evidence from an unusual policy experiment. *American Economic Review*, 91(4), 795–813.

Eaton, J., & Kortum, S. (2002). Technology, geography, and trade. *Econometrica*, 70(5), 1741–1779.

Ederington, J., Levinson, A., & Minier, J. (2005). Footloose and pollution-free. *Review of Economics and Statistics*, 87(1), 92–99. <https://doi.org/10.1162/0034653053327658>

European Parliament and Council. (2008). *Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (Waste Framework Directive)*. Official Journal of the European Union, L 312, 3–30.

European Commission. (2024). *Regulation (EU) 2024/1157 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 on shipments of waste*. Official Journal of the European Union.

Feenstra, R. C. (2004). *Advanced international trade: Theory and evidence*. Princeton University Press.

Feenstra, R. C., & Romalis, J. (2014). International prices and endogenous quality. *Quarterly Journal of Economics*, 129(2), 477–527.

Gao, Q., Li, B., & Qin, Y. (2025). Global plastic waste reallocation and pollution: Evidence from China's import ban. *Available at SSRN 5529098*. HKU Jockey Club Enterprise Sustainability Global Research Institute.

Graedel, T. E., Allwood, J., Birat, J.-P., Buchert, M., Hagelüken, C., Reck, B. K., Sibley, S. F., & Sonnemann, G. (2011). What do we know about metal recycling rates? *Journal of Industrial Ecology*, 15(3), 355–366. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00342.x>

Gray, W.B., Shadbegian, R.J., 2003. Plant vintage, technology, and environmental regulation. *J. Environ. Econ. Manage.* 46 (3), 384–402.

Greenpeace. (2019). *Crisis in plastic recycling: How export bans are crippling recycling markets*. Greenpeace International.

Gregson, N., Crang, M., Fuller, S., & Holmes, H. (2015). Interrogating the circular economy: The moral economy of resource recovery in the EU. *Economy and Society*, 44(2), 218–243.

Grether, J.-M., & de Melo, J. (2003). *Globalization and dirty industries: Do pollution havens matter?* (NBER Working Paper No. 9776). National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w9776>

Grether, J.-M., Mathys, N. A., & de Melo, J. (2012). Unraveling the worldwide pollution haven effect. *The Journal of International Trade & Economic Development*, 21(1), 131–162.

Head, K., & Mayer, T. (2014). Gravity equations: Workhorse, toolkit, and cookbook. In G. Gopinath, E. Helpman, & K. Rogoff (Eds.), *Handbook of International Economics* (Vol. 4, pp. 131–195). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-54314-1.00003-3>

Head, K., Mayer, T., & Ries, J. (2010). The erosion of colonial trade linkages after independence. *Journal of International Economics*, 81(1), 1–14.

Helpman, E., Melitz, M., & Rubinstein, Y. (2008). Estimating trade flows: Trading partners and trading volumes. *Quarterly Journal of Economics*, 123(2), 441–487.

Higashida, K., & Managi, S. (2014). Determinants of trade in recyclable wastes: Evidence from commodity-based trade of waste and scrap. *Environment and Development Economics*, 19(2), 250–270. <https://doi.org/10.1017/S1355770X13000533>

Hu, B., Zhang, Y., Li, J., & Wang, W. (2020). Does environmental regulation promote the upgrading of China's foreign trade? Evidence from the perspective of export quality. *Science of the Total Environment*, 707, 135989.

Hu, J., Qiao, J., Fang, Y., & Chen, J. (2020). Waste haven transfer and environmental regulation: Based on the evidence from China's waste import. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 18309–18319.

Ishimura, Y.; Daisuke, I.; Nomura, S.; Ichinose, D.; Nomura, K. Plastic waste trade and international agreements. *Environmental Economics and Policy Studies*, v. 27, p. 357-380, 2024. DOI: 10.1007/s10018-024-00424-1.

Jaffe, A. B., Peterson, S. R., Portney, P. R., & Stavins, R. N. (1995). Environmental regulation and the competitiveness of U.S. manufacturing: What does the evidence tell us? *Journal of Economic Literature*, 33(1), 132–163.

Kaufmann, D., Kraay, A., & Mastruzzi, M. (2011). The Worldwide Governance Indicators: Methodology and analytical issues. *Hague Journal on the Rule of Law*, 3(2), 220–246.

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank.

Kellenberg, D. (2012). Trading wastes. *Journal of Environmental Economics and Management*, 64(1), 68–87. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2012.02.003>

Kellenberg, D. (2015). The economics of the international trade of waste. *Annual Review of Resource Economics*, 7(1), 109–125. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100913-012639>

Kellenberg, D., & Levinson, A. (2014). Waste of effort? International environmental agreements. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 1(1/2), 135–169. <https://doi.org/10.1086/676037>

Krueger, J. (1998). Prior informed consent and the Basel Convention: The hazards of what isn't known. *Journal of Environment & Development*, 7(2), 115–137. <https://doi.org/10.1177/107049659800700203>

Lai, Y.-B. (2026). Emission transfers, pollution havens, and environmental regulations. *International Tax and Public Finance*, 33(2), 635–667. <https://doi.org/10.1007/s10797-025-09922-8>

Larch, M., & Yotov, Y. V. (2016). *General equilibrium trade policy analysis with structural gravity* (CESifo Working Paper No. 6020).

Levinson, A. (2010). Offshoring pollution: Is the United States increasingly importing polluting goods? *Review of Environmental Economics and Policy*, 4(1), 63–83.

Li, K., Ward, H., Lin, H. X., & Tukker, A. (2024). Economic viability requires higher recycling rates for imported plastic waste than expected. *Nature Communications*, 15, 7578. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-51923-4>

Liang, Y., Tan, Q., Song, Q., & Li, J. (2021). An analysis of the plastic waste trade and management in Asia. *Waste Management*, 119, 242–253. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.049>

Limão, N., & Venables, A. J. (2001). Infrastructure, geographical disadvantage, transport costs, and trade. *The World Bank Economic Review*, 15(3), 451–479. <https://doi.org/10.1093/wber/15.3.451>

List, J.A., Co, C.Y. (2000). The effects of environmental regulations on foreign direct investment. *Journal of Environmental Economics and Management*, 40(1), 1-20.

London Metal Exchange. (2025). *Aluminium contract specifications*. <https://www.lme.com/metals/non-ferrous/lme-aluminium>

Martínez, J. H., Romero, S., Ramasco, J. J., & Estrada, E. (2022). The world-wide waste web. *Nature Communications*, 13, 1615. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28810-x>

Massari, S., & Manini, M. (2012). Scarce minerals and metal as by-products. *Resources, Conservation and Recycling*, 67, 1–8.

Material Recycling Association of India. (2024). *Aluminium scrap import duty: Industry submission to Finance Minister*. MRAI.

Mazzanti, M., & Zoboli, R. (2008). Waste generation, waste disposal and policy effectiveness: Evidence on decoupling from the European Union. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(10), 1221–1234. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.07.003>

Melitz, M. J. (2003). The impact of trade on intra-industry reallocations and aggregate industry productivity. *Econometrica*, 71(6), 1695–1725.

Melitz, M. J., & Ottaviano, G. I. P. (2008). Market size, trade, and productivity. *Review of Economic Studies*, 75(1), 295–316.

Millimet, D. L., & Roy, J. (2016). Empirical tests of the pollution haven hypothesis when environmental regulation is endogenous. *Journal of Applied Econometrics*, 31(4), 652–677. <https://doi.org/10.1002/jae.2451>

Morin, J.-F., Dür, A., & Lechner, L. (2018). Mapping the trade and environment nexus: Insights from a new data set. *Global Environmental Politics*, 18(1), 122–139. https://doi.org/10.1162/GLEP_a_00447

Núñez-Rocha, T. (2016). *Waste haven effect: Unwrapping the impact of environmental regulation* (CES Working Paper 2016.047). Centre d'Economie de la Sorbonne.

Nunn, N., & Qian, N. (2014). US food aid and civil conflict. *American Economic Review*, 104(6), 1630–1666. <https://doi.org/10.1257/aer.104.6.1630>

OECD. Extended Producer Responsibility: Updated Guidance for Efficient Waste Management. Paris: OECD Publishing, 2016. DOI: 10.1787/9789264256385-en.

Olden, A.; Møen, J. The triple difference estimator. *The Econometrics Journal*, v. 25, n. 3, p. 531-553, 2022. DOI: 10.1093/ectj/utac010.

Piermartini, R., & Yotov, Y. V. (2016). *Estimating trade policy effects with structural gravity* (WTO Staff Working Paper No. ERSD-2016-10). World Trade Organization.

Porter, M. E., & van der Linde, C. (1995). Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship. *Journal of Economic Perspectives*, 9(4), 97–118. <https://doi.org/10.1257/jep.9.4.97>

Pothen, F., & Hundt, C. (2024). *The gravity of steel scrap* (SSRN Working Paper). https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5067097

Rose, A. K. (2000). One money, one market: The effect of common currencies on trade. *Economic Policy*, 15(30), 7–45.

Roth, J., Sant'Anna, P. H. C., Bilinski, A., & Poe, J. (2023). What's trending in difference-in-differences? A synthesis of the recent econometrics literature. *Journal of Econometrics*, 235(2), 2218–2244.

Santos Silva, J. M. C., & Tenreyro, S. (2006). The log of gravity. *Review of Economics and Statistics*, 88(4), 641–658. <https://doi.org/10.1162/rest.88.4.641>

Santos Silva, J. M. C., & Tenreyro, S. (2011). Further simulation evidence on the performance of the Poisson pseudo-maximum-likelihood estimator. *Economics Letters*, 112(2), 220–222.

Seigné-Itoiz, E., Gasol, C. M., Rieradevall, J., & Gabarrell, X. (2014). Environmental consequences of recycling aluminum old scrap in a global market. *Resources, Conservation and Recycling*, 89, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.06.003>

Shapiro, J. S. (2021). The environmental bias of trade policy. *Quarterly Journal of Economics*, 136(2), 831–886. <https://doi.org/10.1093/qje/qjaa042>

Stiglitz, J.E., 2015. Leaders and followers: Perspectives on the nordic model and the economics of innovation. *J. Public Econ.* 127, 3–16.

Stein, E., & Daude, C. (2007). Longitude matters: Time zones and the location of foreign direct investment. *Journal of International Economics*, 71(1), 96–112.

Tanaka, S., Teshima, K., & Verhoogen, E. (2022). North-South displacement effects of environmental regulation: The case of battery recycling. *American Economic Review: Insights*, 4(3), 271–288. <https://doi.org/10.1257/aeri.20210201>

Thakur, P. (2026). Global impact of a unilateral waste trade regulation. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 13(1), 195–228. <https://doi.org/10.1086/736818>

Tinbergen, J. (1962). *Shaping the world economy: Suggestions for an international economic policy*. Twentieth Century Fund.

Tran, T., Goto, H., & Matsuda, T. (2021). The impact of China's tightening environmental regulations on international waste trade and logistics. *Sustainability*, 13(2), 987. <https://doi.org/10.3390/su13020987>

UN Comtrade. (2025). *United Nations Commodity Trade Statistics Database*. United Nations Statistics Division. <https://comtradeplus.un.org>

UNEP (2016). Global Material Flows and Resource Productivity. An Assessment Study of the UNEP International Resource Panel. H. Schandl, M. Fischer-Kowalski, J. West, S. Giljum, M. Dittrich, N. Eisenmenger, A. Geschke, M. Lieber, H. P. Wieland, A. Schaffartzik, F. Krausmann, S. Gierlinger, K. Hosking, M. Lenzen, H. Tanikawa, A. Miatto, and T. Fishman. Paris, United Nations Environment Programme

UNEP. (2019). *Amendments to Annexes II, VIII and IX to the Basel Convention*. United Nations Environment Programme.

UNEP. (2020). *Basel Convention plastic waste amendments*. United Nations Environment Programme.

Velis, C. A. (2014). *Global recycling markets: Plastic waste: A story for one player - China*. International Solid Waste Association. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2019.13842>

Wang, X., Zhang, C., & Zhang, Z. (2019). Pollution haven or Porter? The impact of environmental regulation on location choices of pollution-intensive firms in China. *Journal of Environmental Management*, 248, 109248. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.07.019>

Wendling, Z. A., Emerson, J. W., de Sherbinin, A., & Esty, D. C. (2020). *2020 Environmental Performance Index*. Yale Center for Environmental Law & Policy. <https://epi.yale.edu>

World Trade Organization. (2017). *Committee on Technical Barriers to Trade: Notification G/TBT/N/CHN/1211*. WTO.

Yotov, Y. V. (2025). *Unlocking New Methods to Estimate Country-Specific Effects and Trade Elasticities with the Structural Gravity Model*. *Journal of Applied Econometrics*, 40(6), 669–684.

Yotov, Y. V., Piermartini, R., Monteiro, J.-A., & Larch, M. (2016). *An advanced guide to trade policy analysis: The structural gravity model*. World Trade Organization. <https://doi.org/10.30875/abc0167e-en>

ANEXO A

Tabela A.1. Principais países importadores de sucata alumínio (Participação % no comércio mundial)

Importadores de alumínio	Participação (%)
China	19.67
Índia	13.32
Coreia do Sul	8.19
Alemanha	7.98
Estados Unidos	6.21
Itália	5.26
França	2.79
Áustria	2.39
Tailândia	2.25

Malásia	2.11
Hong Kong	1.94
Espanha	1.93
Polônia	1.92
Países Baixos	1.84
Bélgica	1.79
Luxemburgo	1.72
México	1.39
Romênia	1.24
Brasil	1.23
Canadá	1.23
Turquia	1.14
Taiwan	1.10
Reino Unido	1.07
Eslovênia	1.06
República Tcheca	0.98
Indonésia	0.95
Japão	0.82
Hungria	0.78
Grécia	0.78

Tabela A.2. Principais países exportadores de sucata de alumínio (Participação % no comércio mundial)

Exportadores de alumínio	Participação (%)
Estados Unidos	16.02
Alemanha	11.12
Canadá	5.41
Reino Unido	4.97
Países Baixos	4.79
França	4.16
Austrália	3.78
Malásia	3.05
Hong Kong	2.99
Bélgica	2.83
México	2.68
Espanha	2.33
Arábia Saudita	2.22
Emirados Árabes Unidos	2.20
Polônia	2.01
Japão	1.98
Tailândia	1.69

Áustria	1.64	
Suíça	1.30	
Itália	1.25	
Suécia	1.16	
Dinamarca	1.11	
Taiwan	1.00	
Hungria	0.99	
República Eslovaca	0.85	
Cingapura	0.74	
Israel	0.74	
República Tcheca	0.71	
África do Sul	0.61	
Filipinas	0.56	
Camboja	0.52	
Portugal	0.52	
Noruega	0.51	
Finlândia	0.45	
Eslovênia	0.40	
Nova Zelândia	0.40	
Kuwait	0.39	
Colômbia	0.38	
Bulgária	0.38	
Vietnã	0.36	
Marrocos	0.34	
China	0.33	
Coreia, Rep.	0.33	
Chile	0.33	
Guatemala	0.31	
Croácia	0.28	
Romênia	0.28	
Líbia	0.25	
Grécia	0.25	
Irlanda		0.22
Turquia		0.21
Líbano		0.21
Jordânia		0.21
Lituânia		0.20
Nigéria		0.19

Tabela A.3. Principais países importadores de plástico (Participação % no comércio mundial)

Importadores de plástico	Participação (%)
China	46.37

Hong Kong	11.61
Estados Unidos	4.67
Países Baixos	3.76
Alemanha	3.24
Taiwan	2.03
Malásia	1.95
Bélgica	1.91
Itália	1.78
Turquia	1.76
Vietnã	1.47
Canadá	1.43
Áustria	1.24
Índia	1.22
Indonésia	1.19
Espanha	1.17
França	1.14
Irlanda	1.09
Reino Unido	1.07
Polônia	0.88
Coreia do Sul	0.56
Tailândia	0.53
Portugal	0.49
Eslovênia	0.49
México	0.46
Romênia	0.44
República Tcheca	0.39
Bahamas	0.38
Dinamarca	0.35

Tabela A.4. Principais países exportadores de plástico (Participação % no comércio mundial).

Exportadores de plástico	Participação (%)
Estados Unidos	11.87
Alemanha	10.20
Japão	10.10
Hong Kong	7.49
França	4.37
Bélgica	4.21
Reino Unido	4.09
Países Baixos	3.85
Tailândia	3.67
México	3.07
Canadá	3.04

Filipinas	2.31
Malásia	2.23
Espanha	2.03
Itália	1.99
Taiwan	1.92
Coreia do Sul.	1.79
Austrália	1.76
Indonésia	1.58
Polônia	1.34
China	1.02
Vietnã	0.79
Macau	0.71
Eslovênia	0.69
República Tcheca	0.63
Áustria	0.62
Suécia	0.54
Arábia Saudita	0.52
Portugal	0.50
Dinamarca	0.45
Irlanda	0.43
Emirados Árabes Unidos	0.41
Suíça	0.40
Cingapura	0.38
República Eslovaca	0.37
Iêmen	0.36
Bangladesh	0.34
Noruega	0.33
Romênia	0.31
Paquistão	0.31
Grécia	0.31
Hungria	0.29
Tunísia	0.27
Equador	0.27
Nova Zelândia	0.23
Turquia	0.23
Honduras	0.21
Índia	0.21

ANEXO B

Tabela B.1. Modelo gravitacional PPML com a versão restrita da variável de acordo ambiental (resíduos perigosos)

	Alumínio(A)	Alumínio(B)	Plástico(A)	Plástico(B)
Diferencial	0,0169	-	0,1717	-
regulatório (asinh)	(0,3440)		(0,3064)	
DMI (log)	0,0400	-	1,3588***	-
	(0,2295)		(0,2717)	
Interação	0,2465*	0,0492	-0,6801***	0,2876**
	(0,1311)	(0,1169)	(0,1766)	(0,1332)
Tarifa (log)	0,0877	0,0128	-0,2056**	-0,0530
	(0,1275)	(0,1687)	(0,0973)	(0,0508)
Acordo ambiental	0,1092	0,4731	1,6777***	0,3080
(restrito)	(0,4537)	(0,3553)	(0,2546)	(0,2425)
Constante	18,1412***	18,2944***	16,2768***	17,0256***
	(0,1823)	(0,0605)	(0,4096)	(0,1307)
N	17.077	17.077	61.488	57.895
Pseudo R ²	0,9106	0,9409	0,8550	0,9560

*Elaboração própria. Erros-padrão entre parênteses, agrupados por par bilateral. * p<0,10; ** p<0,05; *** p<0,01.*

Elaboração própria. Erros-padrão entre parênteses, agrupados por par bilateral. * p<0,10, ** p<0,05, *** p<0,01. A variável de acordo ambiental restrita assume valor unitário quando o acordo em vigor entre as partes contém provisão de restrição à exportação, importação ou transporte de resíduos perigosos (código X10.24.01 da base TREND).

ANEXO C

Tabela C.1. Estimação em duas etapas: primeira etapa por PPML e segunda etapa do efeito da capacidade de processamento sobre a demanda estimada do importador.

	Alumínio	Plástico
Painel A. Primeira etapa (PPML; dependente: fluxo bilateral)		
Diferencial regulatório (asinh)	-1,9938** (0,8962)	-0,2494 (0,3827)
Tarifa (log)	0,0258 (0,1653)	-0,0518 (0,0490)
Acordo ambiental (amplo)	0,2239 (0,1849)	0,0372 (0,1258)
Efeitos fixos	Exp-ano; Imp-ano; Par	Exp-prod-ano; Imp-prod-ano; Par
N	18.250	62.759
R ²	0,9398	0,9547
Painel B. Segunda etapa (MQO; dependente: efeito fixo do importador)		
DMI (log, elasticidade)	0,3438 (0,2436)	0,5203** (0,2246)
Efeito fixo de ano	Sim	Sim
Agrupamento	Importador	Importador
N (importador-ano)	377	361

Elaboração própria. O Painel A traz a primeira etapa, estimada por PPML, com a tarifa, o diferencial regulatório e a variável de acordo ambiental como controles bilaterais, agrupada por par bilateral. O Painel B traz a segunda etapa, estimada por mínimos quadrados ordinários, tendo como variável dependente o efeito fixo do importador recuperado na primeira etapa, com efeito fixo de ano e erros-padrão agrupados por importador. No plástico, o efeito fixo de importador-produto-ano é agregado a importador-ano. Erros-padrão entre parênteses. * $p < 0,10$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$.

ANEXO D

As tabelas a seguir detalham os destinos das exportações de plástico e de alumínio antes e depois do *National Sword*, com a respectiva qualidade regulatória, e dão base à discussão da seção 4.3. Diferentemente do quadro apresentado naquela seção, que exclui a China por focar os destinos alternativos, estas tabelas a mantêm, de modo a exibir a magnitude da saída do mercado que se fechou.

Tabela D.1. Principais destinos das exportações de plástico, antes e depois do *National Sword*

País	Antes	Depois	Variação	Qual. reg.
Estados Unidos	2,8	10,9	+8,1	0,68
Países Baixos	2,6	9,2	+6,6	0,92
Malásia	0,8	6,8	+6,0	-0,18
Taiwan	0,9	6,6	+5,6	0,14
Alemanha	2,2	6,5	+4,3	0,75
Turquia	0,1	6,1	+6,0	-0,74
Vietnã	0,4	6,0	+5,6	-1,23
Bélgica	1,3	4,1	+2,8	0,32
Hong Kong	14,1	4,0	-10,1	1,17
Itália	1,3	3,8	+2,6	-0,12
Indonésia	0,6	3,4	+2,8	-0,90
Espanha	0,5	3,4	+2,8	-0,01
Canadá	1,2	3,3	+2,1	0,90
França	0,7	3,2	+2,5	0,26
Áustria	0,8	3,0	+2,2	0,56
Polônia	0,3	2,8	+2,5	-0,12
Reino Unido	0,7	2,5	+1,8	0,73
Tailândia	0,2	1,8	+1,6	-0,64
Irlanda	1,0	1,7	+0,7	0,80
Coreia do Sul	0,3	1,6	+1,3	0,38
Índia	1,1	1,5	+0,4	-1,14
China	64,0	0,2	-63,7	-1,04
Soma	98,2	92,7		

Elaboração própria, com base em dados de comércio bilateral da UN Comtrade e no indicador de Qualidade Regulatória do Banco Mundial. Participação de cada destino no valor total exportado do produto, em cada período. Antes corresponde a 2010-2016 e depois a 2018-2023, com 2017 omitido por ser o ano do anúncio da política. A qualidade regulatória do destino é centralizada por ano, de modo que valores negativos indicam regulação abaixo da média mundial. A lista reúne os destinos necessários para acumular cerca de 90% do valor exportado em pelo menos um dos períodos, ordenados pela participação no período posterior. “Taiwan” corresponde à categoria “Ásia, outros” da base de origem.

Tabela D.2. Principais destinos das exportações de alumínio, antes e depois do *National Sword*

País	Antes	Depois	Variação	Qual. reg.
Índia	10,0	16,6	+6,6	-1,07
China	32,5	14,6	-17,9	-1,05
Alemanha	7,8	8,5	+0,7	0,75
Coreia do Sul	8,8	8,4	-0,4	0,39
Estados Unidos	6,1	6,4	+0,3	0,67
Itália	5,4	5,8	+0,4	-0,12
Malásia	0,9	3,5	+2,5	-0,18
Hong Kong	0,3	3,4	+3,1	1,10

Áustria	1,5	3,3	+1,8	0,56
Tailândia	1,1	2,8	+1,7	-0,63
França	2,9	2,5	-0,4	0,27
Polônia	1,9	2,1	+0,3	-0,12
Bélgica	2,3	1,8	-0,5	0,32
Espanha	1,6	1,8	+0,3	-0,01
Luxemburgo	2,2	1,8	-0,5	0,73
Países Baixos	2,3	1,6	-0,6	0,92
Turquia	0,2	1,6	+1,4	-0,75
Brasil	0,6	1,5	+0,9	-0,70
Romênia	1,2	1,4	+0,2	-0,48
México	1,5	1,4	-0,1	-0,60
Canadá	1,6	1,2	-0,5	0,90
Taiwan	1,5	0,9	-0,5	0,14
Reino Unido	1,4	0,8	-0,6	0,73
Soma	95,5	93,8		

Elaboração própria, com base em dados de comércio bilateral da UN Comtrade e no indicador de Qualidade Regulatória do Banco Mundial. Participação de cada destino no valor total exportado do produto, em cada período. Antes corresponde a 2010-2016 e depois a 2018-2023, com 2017 omitido por ser o ano do anúncio da política. A qualidade regulatória do destino é centralizada por ano, de modo que valores negativos indicam regulação abaixo da média mundial. A lista reúne os destinos necessários para acumular cerca de 90% do valor exportado em pelo menos um dos períodos, ordenados pela participação no período posterior. “Taiwan” corresponde à categoria “Ásia, outros” da base de origem.