

AVALIAÇÃO DINÂMICA DO ÍNDICE GLOBAL DE INOVAÇÃO POR ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS E ÍNDICE DE MALMQUIST

Luiz Octávio Gavião

Escola Superior de Guerra (ESG)
Av. João Luiz Alves, s/nº - Urca – Rio de Janeiro-RJ - CEP: 22291-090
E-mail: luiz.gaviao67@gmail.com

Arthur Chagas dos Santos

Escola Superior de Guerra (ESG)
Av. João Luiz Alves, s/nº - Urca – Rio de Janeiro-RJ - CEP: 22291-090
E-mail: arthursantos50@yahoo.com.br

Márcio Cesar Monteiro

Escola Superior de Guerra (ESG)
Av. João Luiz Alves, s/nº - Urca – Rio de Janeiro-RJ - CEP: 22291-090
E-mail: ppgsid.marcio.cesar@esg.br

Sabrina de Oliveira Braga Carvalho

Escola Superior de Guerra (ESG)
Av. João Luiz Alves, s/nº - Urca – Rio de Janeiro-RJ - CEP: 22291-090
E-mail: sabrinadmru@gmail.com

RESUMO

O propósito desse artigo é aplicar a Análise Envoltória de Dados (DEA) e o Índice de Malmquist sobre a base de dados do Índice de Inovação Global (GII) da Organização Mundial da Propriedade Intelectual (WIPO), mostrando uma perspectiva diferente sobre o desempenho dos países em seus projetos e produtos de inovação e propriedade intelectual. Esse novo “olhar” sobre o GII permitiu, por exemplo, mostrar que países com desempenho isoladamente elevado não se destacam tanto quando analisados em conjunto e comparados a países com desempenhos mais modestos, e vice-versa. Em 2023, o GII analisou dados de 132 países, sendo aqui selecionada uma amostra de 33 países, incluindo o Brasil, que se encontram no mesmo nível de renda, segundo a WIPO. A avaliação com o DEA Malmquist explorou cinco *inputs* e dois *outputs* dos GII entre 2018 e 2023, utilizando aplicativos do software R para realizar os cálculos e produzir os gráficos.

PALAVRAS-CHAVE. Índice de Inovação Global; WIPO; DEA; Malmquist.

Tópicos: (1) DEA – Análise Envoltória de Dados; (2) POI – PO na Indústria;

ABSTRACT

The purpose of this article is to apply Data Envelopment Analysis (DEA) and the Malmquist Index on the World Intellectual Property Organization (WIPO) Global Innovation Index (GII) database, showing a different perspective on the performance of countries in their innovation and intellectual property projects and products. This new “look” at the GII made it possible, for example, to show that countries with high performance in isolation do not stand out as much when analyzed together and compared to countries with more modest performances, and vice versa. In 2023, the GII analyzed data from 132 countries, selecting a sample of 33 countries, including Brazil, which are at the same income level, according to WIPO. The evaluation with DEA Malmquist explored five inputs and two outputs of the GII between 2018 and 2023, using R software applications to perform the calculations and produce the graphs.

KEYWORDS. Global Innovation Index; WIPO; DEA; Malmquist.

1. Introdução

Modelos matemáticos simplificados são comuns nos relatórios de governos e de instituições internacionais, pois são facilmente interpretados pela sociedade e, de certa forma, podem explicar fenômenos complexos [Saari 1995]. Entretanto, os modelos mais simples nem sempre são capazes de captar determinados comportamentos ou resultados específicos dos mesmos fenômenos. Esse é o caso, por exemplo, do cálculo do Índice Global de Inovação (GII), organizado anualmente pela Organização Mundial da Propriedade Intelectual (WIPO). Os dados captados de múltiplos indicadores são organizados sob a forma de recursos (*inputs*) e produtos (*outputs*), relacionados à propriedade intelectual, sendo agregados de maneira simples para produzir um índice global [WIPO 2023].

Na Pesquisa Operacional, uma estrutura de dados similar a do GII sugere, de imediato, uma abordagem matemática com a Análise Envoltória de Dados (DEA). Desde 1978, os modelos DEA têm sido amplamente empregados e novas variantes geradas para a solução de problemas com dados assim caracterizados [Charnes et al. 1978]. Além disso, a disponibilidade de dados periodicamente coletados, ano a ano, permitem uma análise dinâmica, para captar a evolução das unidades entre períodos. Apesar dessa adequação dos dados do GII ao modelo DEA para análise dinâmica, a literatura científica é bastante escassa ao uso dessa abordagem com o GII.

Uma busca na base SCOPUS, inicialmente com as palavras chave “*intellectual property*”, que sintetiza o escopo do GII, retornou 39.679 documentos, considerando uma busca da expressão no título, resumo e palavras-chave das pesquisas daquela base. Em seguida, a pesquisa foi refinada, adicionando nos mesmos campos a palavra “WIPO”, reduzindo então para 545 documentos. O terceiro refinamento incluiu na busca as palavras “*data envelopment analysis*” ou “DEA”, nos mesmos campos (título, resumo e palavras chave), resultando em apenas dois artigos científicos. Por fim, a adição do termo “Malmquist”, relacionado à análise dinâmica, em todos os campos desses dois documentos, obteve retorno nulo. Em síntese, na base SCOPUS não foram detectados artigos científicos que tivessem utilizado o modelo DEA Malmquist para analisar o GII da WIPO, em consulta realizada em abril de 2024.

A busca na base SCOPUS com ênfase à modelagem de indicadores de inovação com outros modelos de apoio à decisão multicritério, incluindo a designação WIPO em qualquer parte do documento, retornou somente quatro artigos: [Silva et al. 2020] associaram o AHP, Borda e PROMÉTHÉE; [Silva, Gavião, et al. 2020] usaram o TOPSIS com o PROMÉTHÉE; [Silva, Lima, et al. 2019] exploraram integrais de Choquet com o SMARTS-TOPSIS; e [Silva, Gomes, et al. 2019] usaram o TOPSIS. Embora dividam com DEA as características gerais de um modelo multicritério, os algoritmos com base em programação linear, os resultados, a geração de fronteira de eficiência e a possibilidade de extensão ao índice de Malmquist são específicos do DEA.

Nesse contexto, o propósito desse artigo é aplicar o modelo DEA Malmquist sobre a base de dados do GII da WIPO, mostrando um novo “olhar” sobre o desempenho dos países em seus projetos e produtos de inovação e propriedade intelectual. Essa perspectiva diferente permite, por exemplo, mostrar que países com desempenho isoladamente elevado, nem sempre são tão eficientes quando o modelo matemático permite analisar o conjunto de dados e compá-los a países com desempenho mais modesto, e vice-versa. Assim, após a seção introdutória, a pesquisa revisou o GII da WIPO na 2ª Seção, descreveu o método DEA Malmquist na 3ª Seção, apresentou os resultados na 4ª Seção e concluiu a pesquisa na 5ª Seção.

2. Índice Global de Inovação (GII)

O GII foi lançado em 2007 com o objetivo de identificar e determinar métricas e métodos que pudessem capturar um quadro de inovação na sociedade o mais completo possível. As principais motivações à época decorreram de três aspectos: (1) da importância da inovação para impulsionar o progresso econômico e a competitividade nos países; (2) da maior abrangência conceitual de inovação, que se tornou mais geral e horizontal por natureza, incluindo aspectos sociais, de modelo de negócios e técnicos; (3) da necessidade de valorizar a inovação nos mercados emergentes para inspirar as pessoas, especialmente a próxima geração de empreendedores e inovadores. A avaliação contínua do GII ao longo desses anos fornece uma ferramenta fundamental para os decisores e uma base de dados rica para refinar as políticas de inovação [WIPO 2023].

O GII define inovação com base no Manual de Oslo, elaborado pelo Serviço de Estatística das Comunidades Europeias e pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). Em 2018, a 4ª edição do Manual de Oslo introduziu uma definição mais abrangente: “uma inovação é um produto ou processo novo ou melhorado (ou combinação deles) que difere significativamente dos produtos ou processos anteriores e que foi disponibilizado para usuários potenciais (produto) ou colocado em uso (processo)” (tradução nossa) [Gault 2023; WIPO 2023].

A capacidade de inovação também inclui a capacidade de explorar novas combinações tecnológicas, o conceito de inovação incremental e até mesmo o de “inovação sem pesquisa”. Esses novos conceitos estão presentes nas economias de baixo e médio patamares e podem ter impacto no desenvolvimento de suas sociedades. A estrutura da atividade de produção de conhecimento está mais complexa, colaborativa e geograficamente dispersa. As medidas oficiais diretas que quantificam os resultados da inovação continuam escassas, sendo um desafio encontrar métricas que captem a inovação tal como ela ocorre. Por exemplo, não existem estatísticas oficiais sobre a quantidade de atividade inovadora – definida como o número de novos produtos, processos ou outras inovações. A maioria dos indicadores também tem dificuldade em captar adequadamente os resultados da inovação de um espectro mais amplo de fatores que interferem na inovação, como os setores público e de serviços, ou setor informal, que é forte motor de inovação nos países em desenvolvimento [WIPO 2023].

O GII visa melhorar a medição da inovação, a fim de fornecer uma imagem mais completa dos ecossistemas de inovação no mundo. Explora regularmente novas métricas para refletir a natureza mutável da inovação e o campo cada vez mais extenso de novos indicadores de inovação. Desde a sua criação, o GII também tem feito um esforço especial para abranger resultados criativos, adotando uma nova visão da abordagem anteriormente mais restrita da inovação. Na opinião dos Editores do GII, inovação e criatividade são simplesmente “duas faces da mesma moeda”. O interesse em aplicar o quadro e os indicadores do GII para desenvolver índices de inovação subnacionais complementares e que se reforcem mutuamente também está amadurecendo entre os Estados membros da WIPO [WIPO 2023].

3. Modelo DEA Malmquist

O modelo DEA avalia a eficiência de unidades de decisão independente (DMU) que realizam determinada atividade produtiva, através da razão entre a soma ponderada dos produtos (*outputs*) e a soma ponderada dos insumos (*inputs*), utilizando a programação linear para obtenção dos resultados. O resultado do modelo é a construção de uma fronteira de produção, também denominada de fronteira eficiente, de tal forma que as DMU que possuírem a melhor relação “produto/insumo” serão consideradas mais eficientes e estarão situadas sobre esta fronteira e, as menos eficientes estarão situadas numa região inferior à fronteira, denominada “envelope” [Benício & Mello 2014].

Na Pesquisa Operacional, uma abordagem popular para avaliações dinâmicas de eficiência tem explorado o índice proposto por [Malmquist 1953]. [Caves et al. 1982] propuseram a utilização do mesmo índice para avaliar a evolução da produtividade e [Fare et al. 1994] desenvolveram a abordagem do índice de Malmquist com DEA, aplicando os algoritmos de programação linear do DEA ao cálculo da evolução da produtividade de Malmquist.

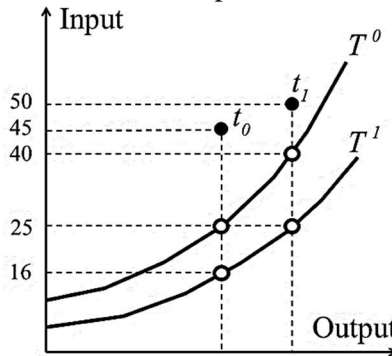
Com o tempo, os processos e os resultados da produção de conhecimento e inovação dos países se altera. É necessário utilizar medidas que captem essas mudanças da capacidade de produção e da evolução tecnológica, porque métodos, processos e sistemas se beneficiam desse progresso técnico e passam a produzir em melhor qualidade e com mais eficiência, que pode resultar em maior quantidade produzida para a mesma quantidade de insumos ou a mesma quantidade de produtos com menos insumos.

O conceito básico de [Fare et al. 1994] envolve o cálculo da razão entre as distâncias das eficiências de cada unidade que está sendo avaliada até a fronteira de produção em duas “janelas” temporais: a primeira representando a produção observada durante o período para o qual a fronteira é construída, e a outra representando a produção observada no período seguinte.

Um exemplo dessa dinâmica é apresentado na Figura 1, adaptada de [Bogetoft & Otto 2010, p. 42] ao contexto do problema aqui estudado. Dois períodos são identificados: o primeiro “ t_0 ” e o seguinte “ t_1 ”, indicando os respectivos estados de um país nos dois períodos. Da mesma forma, são genericamente

consideradas duas tecnologias “T”, relevantes para os dois períodos “ T_0 ” e “ T_1 ”. Vemos que o país melhorou no sentido em que, de “ t_0 ” para “ t_1 ”, se aproximou da tecnologia “ T_0 ”. Entretanto, a tecnologia também evoluiu para “ T_1 ” no período, oferecendo aos países uma produção menos dispendiosa em insumos ou mais produtiva com os mesmos recursos. Portanto, o país não melhorou tanto quanto se esperava de uma perspectiva de desenvolvimento tecnológico. No período “ T_1 ”, existem cinco unidades de insumo excedente, em relação ao período “ T_0 ” (50 contra 45).

Figura 1 – Dinâmica do desempenho e tecnologia no tempo



Fonte: adaptado de [Bogetoft & Otto 2010, p. 42].

O índice de Malmquist (M) com DEA pode ser calculado com a partir da Equação (1), que é composta por duas parcelas: a da Equação (2), que capta a mudança de eficiência (Eff) da DMU em determinado período, mostrando a variação de produtividade decorrente de seus esforços em processos e capacidade de melhorar (ou piorar) o uso dos insumos para sua produção e a parcela da Equação (3), que capta a mudança de tecnologia (Tech) do período, mostrando o quanto a DMU ampliaria ou reduziria sua eficiência por atuação exclusiva de uma evolução (ou não) da tecnologia aplicada ao processo produtivo [Bogetoft & Otto 2010].

Considerando a notação $E_A(t_0, t_1)$, que indica a eficiência da DMU “A” no período “ t_0 ”, com relação à tecnologia do período “ t_1 ”, temos as equações:

$$M(t_0, t_1) = \frac{E(t_1, t_1)}{E(t_0, t_0)} \sqrt{\frac{E(t_1, t_0)}{E(t_1, t_1)} \frac{E(t_0, t_0)}{E(t_0, t_1)}} \quad (1)$$

$$Eff(t_0, t_1) = \frac{E(t_1, t_1)}{E(t_0, t_0)} \quad (2)$$

$$Tech(t_0, t_1) = \sqrt{\frac{E(t_1, t_0)}{E(t_1, t_1)} \frac{E(t_0, t_0)}{E(t_0, t_1)}} \quad (3)$$

A eficiência dos países (E) é obtida em DEA por programação linear, conforme as equações do modelo (4), do DEA CRS orientado a *outputs*, que maximiza os *outputs*, mantendo inalterados os *inputs*, sendo o modelo explorado nessa pesquisa. As Equações (4) são denominadas de modelo do envelope, em que as variáveis de decisão são “ h_o ” e “ λ ”, as mesmas do modelo orientado a *inputs*. A variável “ h_o ” representa por quanto os *outputs* devem ser multiplicados, mantendo-se constantes os *inputs*, para a DMU “o” atingir a fronteira eficiente. Vê-se que “ h_o ”, então, deve ser maior que “1”, para gerar um incremento no valor dos *outputs*, e a eficiência “E”, é obtida por “ $1/h_o$ ”. No caso do modelo DEA CCR, as duas orientações (*inputs* e *outputs*) fornecem o mesmo valor de eficiência, embora os valores das variáveis “ λ ” sejam diferentes. O restante das notações matemáticas indicam as DMU “k”, os *inputs* “i” e os *outputs* “j”. Assim, x_{ik} e y_{jk} representam os *inputs* e *outputs* da DMU_k [Soares de Mello et al. 2005].

$$\begin{aligned}
 & \text{Max } h_o \\
 & \text{sujeito a} \\
 & x_{jo} - \sum_{k=1}^n x_{ik} \lambda_k \geq 0, \forall i \\
 & -h_o y_{jo} + \sum_{k=1}^n y_{jk} \lambda_k \geq 0, \forall j \\
 & \lambda_k \geq 0, \forall k
 \end{aligned} \tag{4}$$

3.1. Definição das variáveis

O modelo do GII utiliza cinco *inputs* e dois *outputs*, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 – Variáveis e indicadores do GII 2023

Tipo	Variável	Componentes da Variável	Fontes dos dados
Input 1	Instituições	1.1 Ambiente institucional (estabilidade operacional para negócios, efetividade governamental) 1.2 Ambiente regulatório (qualidade regulatória, Estado de Direito - “império da lei”, custo de demissão por redundância) 1.3 Ambiente de negócios (políticas facilitadoras, cultura e políticas corporativas)	S&P Global, Market Intelligence, conjunto de dados de risco país, Banco Mundial, Indicadores de Governança Mundial, Employing Workers Project
Input 2	Capital humano e pesquisa	2.1. Educação (despesas com educação, financiamento governamental por aluno do ensino médio, expectativa de vida escolar, escalas PISA em leitura, matemática e ciências, proporção aluno-professor do ensino médio) 2.2 Educação superior (matrículas no ensino superior, graduações em ciências e engenharia, mobilidade de entrada no ensino superior) 2.3 Pesquisa e desenvolvimento (P&D) (quantidade de pesquisadores, despesas brutas em P&D, investimentos corporativos globais em P&D, classificação das universidades no ranking QS)	Instituto de Estatística da UNESCO, OCDE (dados do PISA), Eurostat, OCDE (Principais Indicadores de Ciência e Tecnologia - MSTI), Rede Ibero-Americana e Interamericana de Indicadores de Ciência e Tecnologia (RICYT), QS Quacquarelli Symonds World University Rankings
Input 3	Infraestrutura	3.1 Tecnologias de informação e comunicação (TIC) (acesso às TIC, utilização das TIC, serviços online do governo, participação eletrônica) 3.2 Infraestrutura geral (produção de eletricidade, desempenho logístico, formação bruta de capital) 3.3 Sustentabilidade ecológica (PIB/unidade de utilização de energia, desempenho ambiental, ISO 14001 meio ambiente/bilhão PPP\$ PIB)	Organização Mundial da Propriedade Intelectual (www.wipo.int); e Banco de dados de indicadores mundiais de telecomunicações/TIC, Divisão para Instituições Públicas e Governo Digital (DPIDG) do Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais das Nações Unidas (UN DESA), Balanços Energéticos Mundiais da Agência Internacional de Energia (AIE), Banco Mundial (The Logistics Performance Index and its Indicators), Fundo Monetário Internacional – FMI, Centro de Legislação e Política Ambiental da Universidade de Yale, ISO 14001
Input 4	Sofisticação do mercado	4.1 Crédito (financiamento para <i>startups</i> e <i>scaleups</i> , crédito interno ao setor privado, empréstimos de instituições de microfinanças) 4.2 Investimento (capitalização de mercado, investimentos de capital de risco, destinatários de capital de risco, valor recebido de capital de risco) 4.3 Comércio, diversificação e escala de mercado (Taxa tarifária aplicada, diversificação da indústria nacional, escala do mercado interno)	Global Entrepreneurship Monitor (GEM), National Expert Survey (NES), Fundo Monetário Internacional, Banco Mundial, OCDE, Federação Mundial de Bolsas de Valores, Refinitiv (uma empresa do London Stock Exchange Group, Tabelas Tarifárias Consolidadas (CTS) da Organização Mundial do Comércio, Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (UNIDO), Classificação Industrial Padrão Internacional (ISIC) Revisão 3 (INDSTAT 2 2022)
Input 5	Sofisticação corporativa	5.1 Gestores de conhecimento (emprego em serviços intensivos em conhecimento, empresas que oferecem treinamento formal, despesas brutas realizadas em P&D por empresas, despesas brutas financiadas em P&D por	Organização Internacional do Trabalho (OIT), Banco Mundial, Instituto de Estatística da UNESCO (UIS), Eurostat, Rede Ibero-

Tipo	Variável	Componentes da Variável	Fontes dos dados
		empresas, empregos de mulheres com formação avançada) 5.2 Ligações de inovação (colaboração universidade-indústria em P&D, nível de desenvolvimento de <i>clusters</i> , despesas brutas em P&D financiadas pelo exterior, acordos de <i>joint ventures</i> ou alianças estratégicas, patentes depositadas) 5.3 Absorção de conhecimento (pagamentos pela utilização de propriedade intelectual, importações de alta tecnologia, importações de serviços de TIC, investimento direto estrangeiro, pesquisadores em empresas)	Americana e Interamericana de Indicadores de Ciência e Tecnologia (RICYT), Statistics Canada, Refinitiv (uma empresa do London Stock Exchange Group, Fundo Monetário Internacional, Organização Mundial da Propriedade Intelectual (WIPO), Organização Mundial do Comércio (OMC), Conferência das Nações Unidas sobre Comércio e Desenvolvimento, OCDE
Output 1	Resultados em conhecimento e tecnologias	6.1 Geração de conhecimento (pedidos de patentes residentes, pedidos de Tratado de Cooperação em matéria de patentes, pedidos de direito de patente, artigos científicos e técnicos, índice H de documentos citáveis) 6.2 Impacto do conhecimento gerado (crescimento da produtividade do trabalho, avaliação de unicórnios*, despesas com softwares, produção de alta tecnologia) 6.3 Difusão de conhecimento gerado (receitas de propriedade intelectual, complexidade da produção e exportação, exportações de alta tecnologia, exportações de serviços TIC, certificados ISO 9001 emitidos) * O termo “unicórnio” designa as startups avaliadas em, pelo menos, US\$ 1 bilhão antes de abrir seu capital em bolsas de valores. Além do crescimento acelerado, essas empresas têm como características centrais a inovação, escalabilidade e investimento em tecnologia	Fundo Monetário Internacional, Organização Mundial da Propriedade Intelectual (WIPO), Clarivate (Web of Science), SCImago – SJR (SCOPUS), The Conference Board Total Economy Database, CBInsights – Tracker, S&P Global - Inteligência de Mercado, Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (ONUDI), Base de Dados de Estatísticas Industriais INDSTAT, Organização Mundial do Comércio (OMC), Atlas of Economic Complexity, Growth Lab da Universidade de Harvard, Base de dados <i>Contrade</i> das Nações Unidas, Organização Internacional de Padronização (ISO)
Output 2	Resultados criativos	7.1 Ativos intangíveis (valor dos ativos intangíveis em relação ao valor total da empresa, pedidos de marcas registradas, valor global da marca, pedidos de desenhos industriais) 7.2 Bens e serviços criativos (exportações de serviços culturais e criativos, longas-metragens nacionais, mercado de entretenimento e mídia, exportações de bens criativos) 7.3 Criatividade on-line (domínios genéricos de primeiro nível, domínios de topo com código de país, GitHub recebidos e enviados, criação de aplicativos móveis)	<i>Brand Finance Global Intangible Finance Tracker</i> (GIFT™), Fundo Monetário Internacional, Organização Mundial da Propriedade Intelectual (WIPO), Base de Dados das Perspectivas Econômicas Mundiais, OMDIA, Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais das Nações Unidas, PwC - <i>Global Entertainment and Media Outlook</i> , Base de dados <i>Contrade</i> das Nações Unidas, ZookNIC Inc, GitHub, data.ia (anteriormente App Annie)

Fonte: [WIPO 2023].

3.2. Coleta dos dados

Os dados foram coletados dos GII de 2018 a 2023, última edição. Esses anos foram selecionados para equilibrar os períodos de anos anteriores e posteriores aos da pandemia (2020-2021). O GII 2023 classifica o Brasil no nível econômico médio-alto, juntamente com outros 32 países. Para manter a homogeneidade entre as unidades tomadoras de decisão (DMU) a serem modeladas pelo método DEA, manteve-se a lista de países desse nível no relatório de 2023 para a coleta de dados dos anos anteriores, mesmo que algum país tivesse sido avaliado acima ou abaixo do nível econômico. Além do Brasil, os demais países incluídos na modelagem foram: Albânia, Argentina, Armênia, Azerbaijão, Belarus, Bosnia Herzegovina, Botswana, Bulgária, China, Colômbia, Costa Rica, Rep. Dominicana, Equador, Geórgia, Guatemala, Jamaica, Jordânia, Kazaquistão, Malásia, Mauríus, México, Montenegro, Namíbia, Macedônia do Norte, Paraguai, Peru, Rep. Moldova, Rússia, Sérvia, África do Sul, Tailândia, Turquia [WIPO 2023].

A Tabela 1 apresenta um estrato dos dados do GII 2018 a 2023, para uma amostra de quatro países latino-americanos e quatro do bloco dos BRICS, à exceção da Índia, que está classificada em outro nível econômico pela WIPO.

Tabela 1 – estrato dos dados dos GII 2018 a 2023

Países	2018						
	Input 1	Input 2	Input 3	Input 4	Input 5	Output 1	Output 2
Argentina (Ar)	54,7	35,5	43,4	37,8	31,4	17,9	23,6

Brasil (Br)	55,3	34,9	45,1	43,4	38,3	22,8	24,2
China (Ch)	59,4	47,8	56,8	55,6	56,0	56,5	45,4
México (Mx)	62,3	33,8	48,0	48,0	29,5	23,5	29,2
Paraguai (Pr)	49,7	22,8	38,7	48,8	26,1	8,7	31,5
Rússia (Ru)	57,8	48,4	45,2	48,1	39,1	28,9	26,9
África do Sul (Af)	65,6	30,5	39,4	57,0	34,4	25,2	24,6
2019							
Argentina (Ar)	56,7	38,7	45,8	37,9	32,6	19,2	24,0
Brasil (Br)	58,9	36,0	46,8	44,2	37,6	23,0	22,8
China (Ch)	64,1	47,6	58,7	58,6	55,4	57,2	48,3
México (Mx)	62,8	33,4	48,3	49,9	29,4	25,5	29,2
Paraguai (Pr)	49,4	22,0	38,4	43,2	26,6	6,4	30,1
Rússia (Ru)	60,9	48,3	47,1	49,4	40,0	27,1	25,1
África do Sul (Af)	65,9	30,4	41,1	58,6	32,7	23,9	20,8
2020							
Argentina (Ar)	54,3	35,9	39,5	34,6	26,9	17,2	19,6
Brasil (Br)	58,5	35,8	41,8	42,7	35,8	23,3	18,6
China (Ch)	64,6	49,4	52,1	58,5	52,9	55,1	47,0
México (Mx)	61,3	32,1	43,0	48,4	27,1	23,4	26,2
Paraguai (Pr)	51,1	18,7	34,8	42,3	22,2	10,4	18,5
Rússia (Ru)	61,5	45,6	42,4	49,7	34,0	26,4	22,8
África do Sul (Af)	66,2	29,4	37,9	60,5	30,3	21,2	19,8
2021							
Argentina (Ar)	52,8	37,0	42,5	37,5	26,7	18,7	21,9
Brasil (Br)	60,6	37,5	41,2	44,9	36,0	25,3	23,5
China (Ch)	64,4	50,6	54,6	61,5	54,3	58,5	46,5
México (Mx)	61,0	33,2	41,8	48,8	27,2	24,8	28,5
Paraguai (Pr)	50,9	19,8	38,9	42,0	25,4	10,0	24,8
Rússia (Ru)	63,1	47,9	42,5	48,0	31,8	26,7	26,4
África do Sul (Af)	66,8	31,4	36,3	57,0	29,3	21,9	20,6
2022							
Argentina (Ar)	47,6	30,5	44,0	24,9	31,2	19,0	24,2
Brasil (Br)	46,7	36,2	43,9	37,2	37,9	24,8	24,5
China (Ch)	64,8	53,1	57,5	56,0	55,9	56,8	49,3
México (Mx)	48,2	33,6	44,2	36,3	25,2	24,3	24,7
Paraguai (Pr)	42,7	19,2	41,1	27,7	23,1	11,0	18,1
Rússia (Ru)	48,7	47,0	44,3	37,4	35,4	26,6	25,3
África do Sul (Af)	51,9	26,9	40,7	40,4	27,6	24,7	19,5
2023							
Argentina (Ar)	30,9	30,0	39,9	25,2	30,3	19,2	30,3
Brasil (Br)	38,5	33,5	43,5	38,1	37,6	26,8	31,2
China (Ch)	60,2	49,8	56,4	56,7	54,1	61,5	48,9
México (Mx)	34,8	31,7	40,4	37,2	25,4	24,7	31,7
Paraguai (Pr)	33,9	10,1	35,4	31,6	23,3	12,3	19,7
Rússia (Ru)	34,9	47,2	38,0	37,7	34,7	26,4	29,9
África do Sul (Af)	43,7	25,8	39,3	40,4	29,0	25,0	25,3

Fonte: [WIPO 2023].

3.3. Definição do modelo DEA

A escolha do modelo DEA que melhor se adequa ao problema de pesquisa é essencial para gerar resultados úteis. Inicialmente deve ser avaliada a orientação do modelo DEA, a *inputs* ou *outputs*. Diversos estudos de caso modelados com o DEA Malmquist buscam avaliar o comportamento das unidades com foco nas saídas do processo (*outputs*) [Alinezhad & Nasiri Sadeghloo 2016; Firsova & Chernyshova 2020; Shahverdi & Ebrahimnejad 2014]. No estudo do GII, buscou-se também realizar a orientação a *outputs*.

Outra importante escolha do modelo DEA se refere ao tipo de retornos de escala. Nesse contexto, os dois modelos clássicos são o CRS ou CCR [Charnes et al. 1978], que considera retornos de escala constantes e o modelo VRS ou BCC [Banker et al. 1984], que considera retornos variáveis de escala e não assume proporcionalidade entre inputs e outputs [Soares de Mello et al. 2003]. O conceito de retorno à escala pode ser aplicado à fronteira de produção eficiente e interpreta o que acontece com a produção quando a escala de produção é alterada. Assim, a adição de mais de um fator de produção, mantendo os demais constantes, produzirá retornos proporcionais ou não proporcionais, neste caso podendo ser crescentes ou decrescentes [Benicio & Mello 2019]. [Debreu 1959] definiu matematicamente esses conceitos de retornos constantes, crescentes e decrescentes de escala, conforme as respectivas Equações (5) a (7), para uma função “*f*” de produção para um conjunto de insumos “*x*”, alterados por um fator “*t*” :

$$f(tx) = tf(x), \text{ para } t \geq 0 \quad (5)$$

$$f(tx) > tf(x), \text{ para } t \geq 0 \quad (6)$$

$$f(tx) < tf(x), \text{ para } t \geq 0 \quad (7)$$

[Simar & Wilson 2002, 2011] propuseram testes estatísticos de retorno de escala para modelos DEA orientados a *input* ou a *output*, considerando a hipótese nula (H_0) de retornos constantes de escala versus a hipótese alternativa (H_1) de retornos variáveis de escala e, para definir que tipo de retornos variáveis, a hipótese nula de retornos não crescentes de escala versus a hipótese alternativa de retornos variáveis de escala. Esses testes usam procedimento *bootstrap* e simulação de Monte Carlo com razão de médias, média de razões ou média de razões menos unidade de pontuações DEA, indicadas, respectivamente, como estatísticas 4.5 e 4.6 em [Simar & Wilson 2002] e estatísticas 48 em [Simar & Wilson 2011]. A função *rts.test* do pacote “rDEA” do software R efetua os referidos testes [Simm & Besstremyannaya 2020]. A aplicação dessa função com as bases de dados do GII, para DEA orientado a *output*, está registrada na Tabela 2.

Tabela 2 – teste de hipótese para DEA CRS ou VRS

GII Ano	p-valor ($\alpha=0,05$)	Resultado do Teste	Retornos de Escala sugerido ao problema
2018	0,24	Não rejeição de H_0	Constante
2019	0,36	Não rejeição de H_0	Constante
2020	0,47	Não rejeição de H_0	Constante
2021	0,21	Não rejeição de H_0	Constante
2022	0,14	Não rejeição de H_0	Constante
2023	0,39	Não rejeição de H_0	Constante

O DEA Malmquist pode ser calculado em três pacotes do software R: “Benchmarking” [Bogetoft & Otto 2010], “deaR” [Coll-Serrano et al. 2023] e “productivity” [Desjeux 2022].

Essa pesquisa usou o pacote “deaR”, por sua versatilidade em oferecer outras variantes de modelos DEA Malmquist, com as designações propostas por seus autores: contemporâneo, de [Caves et al 1982], sequencial, de [Shestalova 2003], global ou circular, de [Pastor & Lovell 2005], generalizado, de [Grifell-Tatjé & Lovell 1999] e com as parcelas relativas à produção e à tecnologia, propostas por [Färe et al. 1994] e [Ray & Desli 1997]. A abordagem explorada foi o DEA Malmquist CRS, por conta do resultado do teste de hipótese, orientado a output por escolha aos resultados do processo de inovação do

GII, seguindo os modelos tradicionais de [Caves et al. 1982], que está definido no pacote “deaR” pelo parâmetro “cont” e de [Färe et al. 1994] pelo parâmetro “fgnz”.

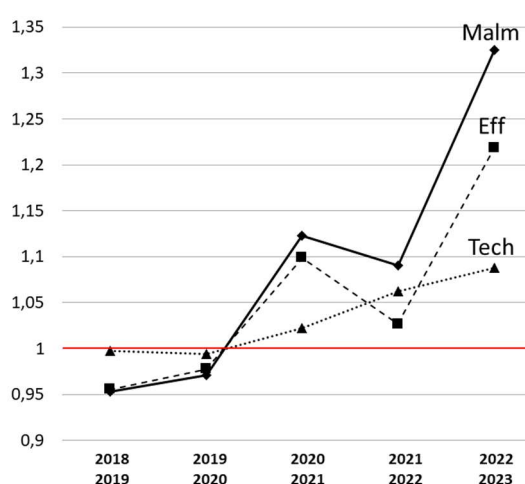
4. Resultados

A Tabela 3 apresenta os resultados da amostra de sete países, para o índice de Malmquist e suas duas parcelas, relacionadas à evolução da eficiência produtiva e à evolução da tecnologia de produção.

Tabela 3 – resultados do índice de Malmquist e suas parcelas

Índice de Malmquist (Malm)							
Período	Argentina	Brasil	China	México	Paraguai	Rússia	África do Sul
2018-2019	1,020	0,953	0,976	1,007	0,966	0,909	0,938
2019-2020	0,933	0,971	1,011	0,955	0,666	1,096	0,961
2020-2021	1,083	1,123	1,006	1,076	1,288	1,108	1,068
2021-2022	1,326	1,090	1,013	1,008	0,780	0,984	1,196
2022-2023	1,299	1,325	1,092	1,153	1,712	1,300	1,044
Evolução em eficiência (Eff)							
Período	Argentina	Brasil	China	México	Paraguai	Rússia	África do Sul
2018-2019	1,016	0,955	1,000	1,154	1,051	0,946	0,978
2019-2020	0,999	0,978	1,000	0,992	0,798	1,081	0,917
2020-2021	0,951	1,099	1,000	1,009	1,123	1,082	1,076
2021-2022	1,160	1,027	1,000	1,065	0,838	0,967	1,271
2022-2023	1,257	1,218	1,000	1,050	1,332	1,164	0,985
Evolução em tecnologia (Tech)							
Período	Argentina	Brasil	China	México	Paraguai	Rússia	África do Sul
2018-2019	1,004	0,997	0,976	0,872	0,919	0,961	0,959
2019-2020	0,934	0,994	1,011	0,962	0,834	1,013	1,048
2020-2021	1,138	1,022	1,006	1,067	1,146	1,024	0,992
2021-2022	1,143	1,062	1,013	0,947	0,931	1,017	0,941
2022-2023	1,034	1,088	1,092	1,098	1,285	1,117	1,060

Figura 2 – Índices de Malmquist do Brasil e suas parcelas

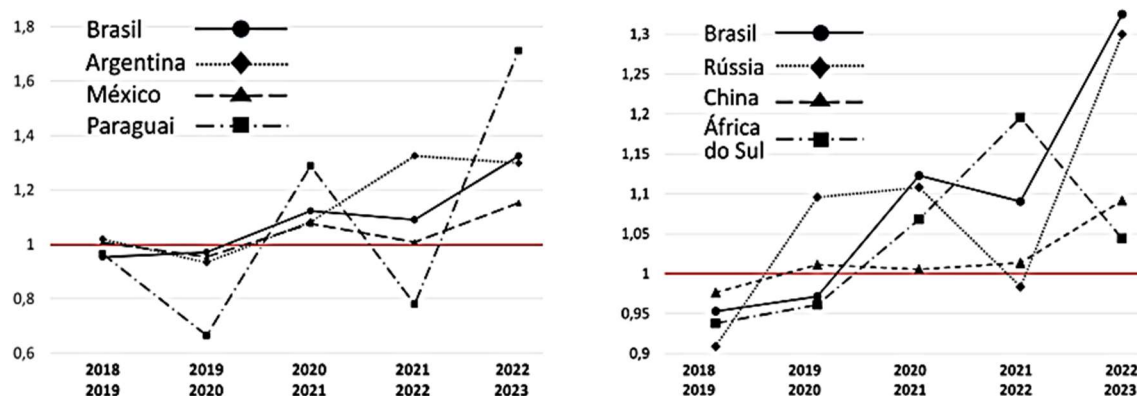


Na Figura 2, os índices do Brasil indicam ineficiência em inovação nos dois períodos antes da pandemia (2018/2019 e 2019/2020), pois estão abaixo da referência unitária. A tecnologia vigente à época foi responsável pela maior parcela de contribuição aos processos e produtos de inovação, medidos

pela WIPO. Essa parcela tecnológica se mantém em crescimento moderado e quase constante, enquanto os demais sobem significativamente após a pandemia, que teve seu ápice em 2021.

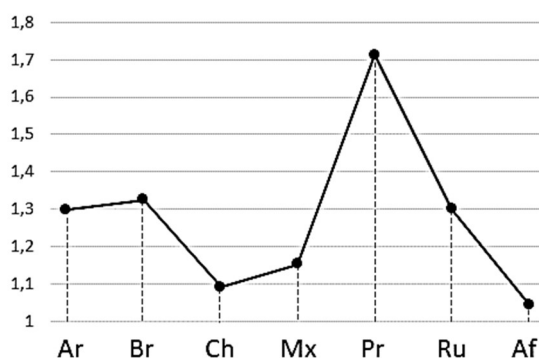
Esse crescimento acentuado do Brasil no Índice de Malmquist do último período, após uma queda natural durante a pandemia, foi explicado no relatório da WIPO. Em 2023, o Brasil (49^a) subiu cinco postos e melhorou significativamente seu desempenho no subíndice Produtos de inovação (49^a). O país ocupou a 22^a posição mundial em termos do valor de seus 16 unicórnios, representando 1,9% do PIB nacional em 2023, graças aos líderes QuintoAndar (comércio eletrônico), C6 Bank (fintech) e Credits (fintech) (Quadro 3). O país também melhorou em Ativos intangíveis (31^a), ocupando a 13^a posição mundial em Marcas, e em Valor global das marcas (39^a), alavancado por suas instituições bancárias Itaú, Bradesco e Banco do Brasil. O Brasil integra o grupo das 15 economias mais bem classificadas em Serviços governamentais online (14^a) e Participação eletrônica (11^a). O relatório ainda destacou que o Brasil apresentou pelo terceiro ano seguido resultados em inovação superiores aos esperados para o seu nível de desenvolvimento [WIPO 2023].

Figura 3 – Índices de Malmquist da amostra de países



O relatório de 2023 destacou que a Argentina (73^a) e o Paraguai (98^a), entre outros países, apresentaram resultados abaixo das expectativas na América Latina e Caribe, perdendo posições no GII de 2023. Entretanto cabe destacar a capacidade do modelo DEA em valorizar a eficiência dinâmica e relativa das DMU que, por vezes, não possuem valores de inputs e outputs elevados, porém produzem bem com o pouco que dispõem em insumos e são capazes de evoluir positivamente nos períodos analisados pelo Índice de Malmquist. Isto se observa com o Paraguai no último período (Figura 4), apesar de alternar um padrão “dente-de-serra” ao redor da referência unitária nos demais períodos.

Figura 4 – Índices de Malmquist 2022-2023



De fato, o índice de Malmquist é útil para compreender como os resultados mudam ao longo do tempo. Uma unidade produtiva que tenha implementado melhorias ao longo de um ano pode ficar frustrada ao identificar que, na verdade, está piorando numa análise dinâmica e relativa a outras unidades. A questão, entretanto, é que não é suficiente que uma unidade melhore em relação a si mesma, pois deve melhorar seus processos de produção em relação às demais e também se beneficiar do progresso tecnológico geral.

5. Conclusão

O artigo teve por finalidade apresentar um novo “olhar” para a modelagem dos indicadores do GII, produzido anualmente pela WIPO. As bases de dados daquela organização reúnem informações de 132 países, no caso do GII 2023, agrupadas sob a forma de *inputs* e *outputs*, que refletem recursos utilizados para a geração de produtos de inovação e propriedade intelectual. Essas avaliações ocorrem com periodicidade anual, permitindo a comparação de desempenhos entre os países. Entretanto, a aplicação do modelo DEA Malmquist para a análise da eficiência dinâmica dos países mostra resultados que a metodologia da WIPO não é capaz de produzir. O caso do Paraguai ilustrou os benefícios dessa nova abordagem, que poderia gerar práticas interessantes para avaliar através de estudo de caso, por exemplo.

A revisão da literatura, realizada na base SCOPUS em abril de 2024, mostrou que não havia aplicação similar do DEA Malmquist para avaliar os resultados do GII. Isto confere ineditismo à pesquisa. Cabe ainda ressaltar que a nova perspectiva desta pesquisa não nega ou compromete os cálculos mais simples do GII, porém complementa e traz novas possibilidades de análise, que podem colaborar com as políticas públicas dos países.

Em relação a futuras pesquisas, visualiza-se a possibilidade de uso de novas variantes existentes no pacote “deaR”, do software R, utilizado aqui para produzir os resultados dos modelos mais tradicionais do DEA Malmquist. Outra abordagem futura pode ser a comparação dos resultados aqui gerados com o modelo probabilístico do índice de Malmquist, proposto por [Sant’Anna 2015].

Agradecimento: o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 (PRO-DEFESA-V3092454P).

Referências

- Alinezhad, A., & Nasiri Sadeghloo, M. J. (2016). Application of Malmquist Index in Two-Stage DEA for Measurement of Productivity Growth. *Journal of Money and Economy*, 11(1), 31–51.
- Banker, R. D., Charnes, A., & Cooper, W. W. (1984). Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, 30(9), 1078–1092.
- Benício, J., & Mello, J. C. C. B. S. de. (2019). Different types of return to scale in DEA. *Pesquisa Operacional*, 39, 245–260.
- Benício, J., & Mello, J. C. C. B. S. de. (2014). Retornos de escala em DEA: críticas ao BCC e novo modelo. *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional - XLVI SBPO*, 1–15.
- Bogetoft, P., & Otto, L. (2010). *Benchmarking with DEA, SFA, and R* (1st ed., Vol. 157). Springer Science & Business Media.
- Caves, D. W., Christensen, L. R., & Diewert, W. E. (1982). The economic theory of index numbers and the measurement of input, output, and productivity. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1393–1414.
- Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429–444.
- Coll-Serrano, V., Bolós, V. J., & Benítez, R. (2023). *deaR: Conventional and Fuzzy Data Envelopment Analysis. R package* (1.4.1; p. 110). R Core Team. <https://cran.r-project.org/package=deaR>

- Debreu, G. (1959). *Theory of value: An axiomatic analysis of economic equilibrium* (Vol. 17). John Wiley & Sons.
- Desjeux, Y. (2022). *R package productivity* (1.1.0; p. 38). R Core Team. <https://cran.r-project.org/package=productivity>
- Fare, R., Grosskopf, S., & Lovell, C. A. K. (1994). *Production frontiers*. Cambridge University Press.
- Färe, R., Grosskopf, S., Norris, M., & Zhang, Z. (1994). Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries. *The American Economic Review*, 66–83.
- Firsova, A., & Chernyshova, G. (2020). Efficiency analysis of regional innovation development based on DEA Malmquist index. *Information*, 11(6), 294.
- Gault, F. (2023). The Oslo Manual and standards. In *Handbook of Innovation Indicators and Measurement* (pp. 12–17). Edward Elgar Publishing.
- Grifell-Tatjé, E., & Lovell, C. A. K. (1999). A generalized Malmquist productivity index. *Top*, 7, 81–101.
- Malmquist, S. (1953). Index numbers and indifference surfaces. *Trabajos de Estadística y de Investigación Operativa*, 4(2), 209–242.
- Pastor, J. T., & Lovell, C. A. K. (2005). A global Malmquist productivity index. *Economics Letters*, 88(2), 266–271.
- Ray, S. C., & Desli, E. (1997). Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries: comment. *The American Economic Review*, 87(5), 1033–1039.
- Saari, D. (1995). Mathematical complexity of simple economics. *Notices of the AMS*, 42(2), 222.
- Sant’Anna, A. P. (2015). *Probabilistic Composition of Preferences, Theory and Applications* (1st ed.). Springer.
- Shahverdi, R., & Ebrahimnejad, A. (2014). DEA and Malmquist productivity indices for measuring group performance in two periods. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 16(3), 382–395.
- Shestalova, V. (2003). Sequential Malmquist indices of productivity growth: an application to OECD industrial activities. *Journal of Productivity Analysis*, 19, 211–226.
- Silva, M. do C., Costa, H. G., & Gomes, C. F. S. (2020). Multicriteria decision choices for investment in innovative upper-middle income countries. *Innovation & Management Review*, 17(3), 321–347.
- Silva, M. do C., Gavião, L. O., Gomes, C. F. S., & Lima, G. B. A. (2020). Global Innovation Indicators analysed by multicriteria decision. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, 17(4), 1–17.
- Silva, M. do C., Gomes, C. F. S., & Costa Junior, C. L. da. (2019). The use of TOPSIS for Ranking WIPO’S Innovation Indicators. *Innovar*, 29(73), 133–147.
- Silva, M. do C., Lima, G. B. A., Gomes, C. F. S., Rangel, L. A. D., & Caiado, R. G. G. (2019). A SMARTS-Choquet’s approach for multicriteria decision aid applied to the innovation indexes in sustainability dimensions. *Soft Computing*, 23(16), 7117–7133.
- Simar, L., & Wilson, P. W. (2002). Non-parametric tests of returns to scale. *European Journal of Operational Research*, 139(1), 115–132.
- Simar, L., & Wilson, P. W. (2011). Inference by the m out of n bootstrap in nonparametric frontier models. *Journal of Productivity Analysis*, 36, 33–53.
- Simm, J., & Besstremyannaya, G. (2020). rDEA: Robust data envelopment analysis (DEA) for R. In *R package version* (1.2.8; p. 16). R Core Team. <https://cran.r-project.org/package=rDEA>
- Soares de Mello, J. C. C. B., Meza, L. A., Gomes, E. G., & Biondi Neto, L. (2005). Curso de Análise de Envoltória de Dados. *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional - XXXVII SBPO*, 37, 2520–2547.
- Soares de Mello, J. C. C. B., Meza, L. A., Gomes, E. G., Serapião, B. P., & Lins, M. P. E. (2003). Análise de envoltória de dados no estudo da eficiência e dos benchmarks para companhias aéreas brasileiras. *Pesquisa Operacional*, 23, 325–345.
- WIPO. (2023). *World Intellectual Property Organization (WIPO). Global Innovation Index 2023: Innovation in the face of uncertainty*. <https://doi.org/10.34667/tind.48220>.