

# ECONOFÍSICA E FINANÇAS: ESTUDO BIBLIOMÉTRICO NACIONAL E INTERNACIONAL

**Daniel Pereira Alves de Abreu**

Bacharel em Controladoria e Finanças (UFMG); especialista em Gestão de Negócios (Cege/Cepead/UFMG); mestre em Administração (Cepead/UFMG). Atualmente é doutorando em Administração (Cepead/UFMG).

*E-mail:* danielpabreu22@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-9820-8453>

**Marcos Antônio de Camargos**

Bacharel em Administração (UFMG); especialista em Finanças (Cege/Cepead/UFMG); mestre em Administração (CEPEAD/UFMG); doutor em Administração (Cepead/UFMG). Atualmente é professor do Departamento de Ciências Administrativas na Universidade Federal de Minas Gerais e do Centro Universitário (Ibmec-BH).

*E-mail:* marcosac@face.ufmg.br

 <https://orcid.org/0000-0002-3456-8249>



Este artigo está licenciado com uma Licença Creative Commons - Atribuição-NãoComercial 4.0

Internacional

### **Aureliano Angel Bressan**

Bacharel em Economia (UFRJ); doutor em Economia Aplicada pela UFV (2001). Atualmente é professor titular do Departamento de Ciências Administrativas na Universidade Federal de Minas Gerais.  
E-mail: aureliano@ufmg.br

 <https://orcid.org/0000-0002-9333-3394>

**Como citar este artigo:** Abreu, D. P. A. de Camargos, M. A. de, & Bressan, A. A. (2025). Econofísica e finanças: Estudo bibliométrico nacional e internacional. *Revista de Economia Mackenzie*, 22(2), 37-67.  
doi: 10.5935/1808-2785/rem.v22n2p.37-67

**Recebido em:** 8 de setembro de 2024

**Aprovado em:** 9 de setembro de 2025

## **Resumo**

O objetivo deste artigo é analisar, por meio de um estudo bibliométrico, os trabalhos publicados no campo da econofísica, uma adaptação das modelagens da física para a análise financeira. O levantamento bibliográfico foi realizado em duas importantes bases, Scopus e Web of Science, sendo a análise realizada em 2.351 artigos, publicados entre 1900 e 2024, por meio do pacote Bibliometrix do software livre RStudio. Os resultados apontam que os Estados Unidos e a China são países com maiores publicações sobre o tema, embora o Brasil tenha um volume relevante de publicações. Ademais, a maioria dos estudos é publicada em revistas de Física Aplicada, com grande enfoque nos aspectos metodológicos, com tendências atuais para publicações sobre incerteza, entropia e dinamismo. Por fim, verificaram-se a expansão do volume de trabalhos publicados e o desenvolvimento de novos estudos, sinalizando assim a ascensão dessa vertente, bem como seu potencial para avanços e aplicações na área de finanças.

**Palavras-chave:** Econofísica; econometria; estudo bibliométrico; finanças; fractais.

Classificação JEL: G140.

## **INTRODUÇÃO**

O termo econofísica foi usado pela primeira vez na Conferência International de Estatística Física, realizada em Kolkata, em 1995, por meio da união das palavras “economia” e “física” (Chakraborti et al., 2011). De acordo com

Mantegna e Kertész (2011), a aproximação entre o campo da física e o de finanças não é recente, com diversas analogias já feitas em estudos anteriores, tais como o modelo de passeio aleatório de Bachelier (1900) e o modelo de precificação de Black e Scholes (1973). Os autores destacam que, antes da década de 1990, essas associações ainda eram esporádicas, porém trabalhos atuais já reconhecem a aplicabilidade de elementos oriundos das ciências naturais na área financeira.

A evolução dos sistemas financeiros resultou no incremento da sua complexidade e dinamicidade. Em paralelo, os avanços tecnológicos proporcionaram uma maior disponibilidade de dados sobre as transações do mercado financeiro (por exemplo, intradiários), ampliando o escopo e aprofundando a capacidade de análise das pesquisas acadêmicas na área de finanças. Tais mudanças impactaram as modelagens utilizadas na área, que passaram a analisar dados de alta frequência (com distribuição contínua), comuns nas modelagens da física. Dessa forma, muitos físicos passaram a se interessar pela área financeira (Chakraborti et al., 2011; Mantegna & Kertész, 2011).

Adicionalmente, o mercado financeiro teve sua complexidade aumentada também no que tange ao número de agentes participantes de produtos. Como resultado, o aumento nas interações entre agentes acarreta mudanças nas suas macropropriedades que podem ser interpretadas como regularidades estatísticas (McCauley, 2004). Nesse sentido, o campo da econofísica trata tais regularidades por meio de leis de potências, as quais podem ser interpretadas como resultado agregado (macro) do comportamento de diversas interações realizadas em nível individual (micro) (Kwapień & Drożdż, 2012).

De acordo com Jovanovic e Schinckus (2013), a econofísica possui ainda o potencial de complementar a literatura econômica clássica, ao passo que, diferentemente desta, a modelagem baseada na econofísica não se prende a pressupostos e teorias *a priori*, preocupando-se mais em modelar empiricamente os dados para que seja identificada a melhor teoria para descrever um fenômeno *a posteriori*. Nesse aspecto, diferentemente das correntes econômicas e financeiras tradicionais, que utilizam como base a distribuição gaussiana, os econofísicos rejeitam a prevalência de apenas uma distribuição como adequada para descrever fenômenos econômicos e financeiros.

Inserido nesse contexto de transformação no mercado financeiro, o objetivo deste trabalho é analisar a evolução das pesquisas no campo temático da econofísica, visando destacar sua evolução e suas contribuições para o entendimento das movimentações do mercado financeiro, por meio de uma análise bibliométrica das literaturas nacional e internacional. O levantamento bibli-

gráfico foi realizado em duas importantes bases, Scopus e Web of Science, sendo a análise realizada em 2.351 artigos, publicados entre 1990 e 2024, com auxílio do pacote Bibliometrix do *software* livre RStudio.

O presente artigo está estruturado em mais quatro seções, além desta introdução. Na segunda seção, constam os fundamentos da econofísica como campo de conhecimento. A terceira seção apresenta o percurso metodológico do estudo, e a quarta mostra os resultados do estudo bibliométrico realizado nas literaturas nacional e internacional. As principais possibilidades de pesquisa no tema e suas possíveis implicações para a academia e o mercado são indicadas nas considerações finais.

## 1

# ECONOFÍSICA

## ■ 1.1 Fundamentos

Backhouse e Morgan (2000) afirmam que a econofísica rejeita a ideia de normalização, log-normalização e mineração de dados, cujo objetivo é a eliminação de dados anormais com baixa frequência observada. Assim, considera-se que não existem dados anormais, mas sim dados com baixa frequência, os quais não podem ser de forma alguma descartados, visto que podem se apresentar como peça-chave para compreensão de um fenômeno (Hoover & Perez, 2000). Dessa forma, conforme Rickles (2007), a econofísica se concentra em estruturar modelos com base em dados empíricos, e não com base em um mercado ideal com pressupostos afastados da realidade, tal como ocorre na literatura clássica de economia e finanças.

Pode-se acreditar que, a princípio, a econofísica e as teorias econômicas e de finanças são opostas e contraditórias. Porém, conforme expõe Schinckus (2016), trata-se de visões complementares. Enquanto as duas últimas partem da premissa de um estado de equilíbrio de mercado, a econofísica pode ser vista como expansão da análise para momentos de desequilíbrio. Assim, o equilíbrio é visto como um dos possíveis estados dos mercados, e não um pressuposto, de forma que os modelos físicos convergem para os modelos tradicionais quando são detectadas as condições de equilíbrio nos dados (McCauley, 2006), reforçando a ideia de que ambas as vertentes são válidas e complementares para as análises financeiras.

Os estudos de Mandelbrot (1963, 1967) identificaram que os preços não seguiriam o processo browniano, mas sim os processos estáveis de Lévy (1924). Entretanto, conforme expuseram Akgiray e Booth (1988) e Blattberg e Gonedes (2010), uma dificuldade desse processo está em sua variabilidade infinita, o que não apenas inviabiliza análises para verificar a magnitude do risco, como também vai contra a evidência empírica para séries temporais longas. Nesse aspecto, uma adaptação da física de processos da termodinâmica consegue ser aplicada para solucionar o problema da variância (Jovanovic & Schinckus, 2013).

Na teoria financeira tradicional, são assumidos pressupostos de ausência de autocorrelação para séries de retornos independentes e identicamente distribuídos, o que torna adequada a utilização de uma distribuição normal (gaussiana) para descrever os retornos financeiros. Entretanto, vários estudos empíricos demonstram que tal distribuição não é observada em diversas situações (Calvet & Fisher, 2012; Rickles, 2007; Mandelbrot & Hudson, 2004). Uma alternativa utilizada pelos pesquisadores da econofísica para lidar com esse problema foi a adoção dos processos estáveis de Lévy para as distribuições analisadas, os quais usam uma lei de potência  $\alpha$ -estável do tipo  $P(X > x) = x^{-\alpha}$  (Mantegna, 1991).

Trata-se de um processo caracterizado como estocástico que possui incrementos estacionários independentes denominados *càdlàge paths*. Nesse aspecto, a distribuição de probabilidade de incrementos depende apenas do comprimento do intervalo, de forma que a distribuição de intervalos de mesmo comprimento será distribuída de forma idêntica, sendo denominada, portanto, de *jump process*.

Quanto ao parâmetro  $\alpha$ , trata-se de um coeficiente que varia entre 1 e 2. No caso de  $\alpha = 2$ , a distribuição assume o comportamento gaussiano; com  $\alpha = 1$ , há a distribuição de Cauchy; e, com  $\alpha = 3/2$ , obtém-se uma distribuição de Pareto (Jovanovic & Schinckus, 2013). Desse modo, pode-se perceber que os processos estáveis de Lévy são uma generalização da distribuição gaussiana, o que ao mesmo tempo corrobora a validação de modelagens financeiras modernas em determinados cenários e, simultaneamente, não limita a análise a uma única distribuição para descrever fenômenos financeiros.

Entretanto, tais processos assumem a independência das mudanças de preço, uma vez que estudos como os de Dacorogna et al. (1993) e Ding et al. (1993) demonstraram a existência de autocorrelações nas séries temporais. Assim, conforme defenderam Calvet e Fisher (2012), as séries temporais financeiras não são exatamente autossimilares, mas apresentam distribuição

com caudas mais grossas e são mais pontiagudas na média em horizontes temporais curtos. Tais conclusões corroboram as hipóteses econômicas de que os preços dos ativos variam de acordo com o volume de novas informações. Assim, os processos de autossimilaridade não são perfeitamente aplicáveis para modelagens de retornos de ativos financeiros.

Com base em estudos que comprovam a existência de caudas grossas nas distribuições dos preços e na existência de memória de longo prazo, isto é, processos de manutenção ou reversão da média de longo prazo, trabalhos como os de Mandelbrot et al. (1997) e Calvet e Fisher (2002) passaram a analisar as propriedades multifractais das séries temporais financeiras.

## ■ 1.2 Fractais em séries temporais financeiras

O estudo de Mandelbrot (1963) demonstrou que a geometria euclidiana era inadequada para analisar formas irregulares, pois ela desconsidera o efeito de escala. A partir desse estudo, surgiu a geometria fractal, a qual permite a representação de elementos com características irregulares. Desse modo, fractais constituem padrões cujas partes ressoam no todo, isto é, são objetos geométricos que podem ser divisíveis infinitamente em partes menores, porém ainda semelhantes ao todo.

A modelagem fractal usa princípios de invariância para descrever de forma parcimoniosa objetos em múltiplas escalas, o que já se mostrou importante para o ramo da matemática e das ciências naturais. Entretanto, essa métrica pode ser aplicada também na área de finanças, sobretudo na modelagem de séries de preços de ativos, na identificação de risco de portfólios e na gestão de exposição ao risco de instituições (Calvet & Fisher, 2012).

Mandelbrot e Hudson (2004) destacam que, nos mercados financeiros, a variação dos preços é um fator-chave para as análises, visto que ela se relaciona tanto com o nível de exposição ao risco quanto com o potencial de ganhos, o que torna necessárias análises de séries históricas de ativos financeiros para compreender esses dois pontos. Entretanto, conforme expõem os autores, o tempo não é uniforme para os investidores. Nesse sentido, a variação da frequência das séries históricas ( $\Delta t$ ) é relevante para a modelagem correta do risco.

Com avanços tecnológicos e computacionais, os estudos de Mandelbrot (1963, 1967) analisaram os testes das hipóteses de Bachelier (1990). Como conclusão, foram destacados desvios da distribuição das séries dos preços de

ativos, *commodities* e câmbio com a distribuição browniana, sobretudo quanto às caudas. Assim, o autor identificou que preços extremos eram a chave para a compreensão da totalidade das séries temporais analisadas, que a distribuição browniana não conseguia captar, o que enviesava as análises que se baseiam apenas na média e variância.

Conforme apontado por Rickles (2011), três características das distribuições das séries temporais financeiras não são compatíveis com os pressupostos das modelagens financeiras tradicionais que assume a normalidade. A primeira delas refere-se às caudas. Embora a distribuição se assemelhe a uma distribuição normal em seu centro, a curtose observada é superior ao esperado, de forma que a probabilidade de eventos extremos acaba sendo subestimada em análises que assumem um processo browniano.

Um segundo ponto seria a existência de *clusters* de volatilidade, isto é, a existência de momentos de maiores/menores mudanças de preços. Por fim, o terceiro ponto é a persistência de volatilidade, a qual se relaciona com a existência de memória de longo prazo. Desse modo, o autor conclui que as variações dos preços possuem um padrão muito mais ordenado do que o esperado em um processo browniano. Assim sendo, as séries financeiras precisavam ser modeladas por um processo estocástico mais específico tendo em mente a hipótese de autossimilaridade.

Uma função de preços com variabilidade temporal  $p(t)$ ,  $t \in R_+$  é tida como autossimilar com índice  $H$ , denominado de expoente de Hurst, se, para todo parâmetro  $c > 0$ ,  $n > 0$  e  $t_1, \dots, t_n \in R$ , o vetor  $p(ct)_1, \dots, p(ct)_n$  tiver a distribuição igual a  $c^H p(t_1), \dots, c^H p(t_n)$ . Especificamente para o processo browniano, a autossimilaridade ocorre com  $H = 1/2$ . O processo estável de Lévy (1924) também possui características de autossimilaridades, com incrementos independentes e caudas parentianas descritas pela probabilidade  $P\{|p(t + \Delta t) - p(t)| > x\} \sim K_{1/H} \Delta t x^{-1/H}$ , com  $x \rightarrow +\infty$ ,  $1/H \in (0; 2)$  e  $K_{1/H}$  uma constante positiva (Calvet & Fisher, 2012).

Como conclusões, foram detectadas evidências de que os momentos da mudança absoluta dos preços  $p(t)$ , isto é,  $E\{|p(t + \Delta t) - p(t)|^q\} = c_q \Delta t^{\tau(q)+1}$ , sendo  $\tau(q)$  a função de escalonamento em função de um parâmetro  $q$ , poderiam ser escalonadas como potências de  $\Delta t$ , dando origem posteriormente à criação de famílias de difusões multifractais em finanças (Bacry et al., 2001). Em geral, tem-se que caso  $p(t)$  seja multifractal, então  $\tau(q)$  será uma função estritamente côncava e se igualará a  $Hq - 1$ , caso seja autossimilar, sendo  $H$  o índice de autossimilaridade (Ghashghaie et al., 1996; Vandewalle & Ausloos, 1998).

Estudos como os de Grech (2016), Jiang et al. (2019) e Schadner (2021) são exemplos de trabalhos empíricos que corroboram a existência de propriedades fractais nas séries temporais de mercados acionários. Nesse aspecto, os autores destacam que, embora existam momentos em que as séries se comportem de forma semelhante a um passeio aleatório, variando escalas de tempo e ampliando horizonte de análises, é possível identificar padrões fractais. Desse modo, pode-se verificar a existências de janelas de possibilidades para arbitragem, bem como a validação de estratégias de investimentos que se baseiam na análise gráfica e de indicadores (Dima et al., 2021; Kristoufek & Vosvrda, 2013).

### ■ 1.3 Hipótese de mercados fractais

Segundo Peters (1994), a teoria dos fractais remete a uma relação de aleatoriedade local com um determinismo global. A hipótese de mercados fractais (HMF) propõe então que o mercado assume movimentos aleatórios no curto prazo, mas mantém uma estrutura geral semelhante ao se expandir temporalmente. Além disso, a teoria afirma também que o mercado assume padrões de longo prazo similares aos de médio e curto prazos.

Um dos estudos pioneiros a verificar a HMF foi o de Elliot (1938), o qual analisou o comportamento do mercado de capitais utilizando a teoria dos fractais. Ao final, o autor identificou um ciclo de cinco ondas, as quais apresentavam padrões de autossimilaridade típicos de um fractal. Com base nessa teoria, o autor verificou um padrão para movimentos oscilatórios de altas e baixas em cinco ondas, adotando uma determinada tendência, seguido de três ondas oscilatórias em um movimento contra a tendência. A partir desse trabalho, diversos estudos passaram a analisar o mercado financeiro sob a ótica um fractal (Kotyrba et al., 2013).

A aplicabilidade da HMF em trabalhos empíricos vem sendo utilizada sobretudo para verificar níveis de eficiência de mercado. Eis os estudos que aplicaram essa teoria no mercado acionário: os de Lima e Oliveira (2020), Nekrasova et al. (2018), Caporale et al. (2016), Kristoufek e Vosvrda (2013, 2014) e Dubovikov et al. (2004).

Do ponto de vista teórico, a HMF vai de encontro à hipótese da eficiência de mercado (HEM) ao caracterizar as variações dos preços de ativos não como um movimento puramente aleatório, uma vez que é possível identificar tendências dessas variações (Peters, 1994). Assim, em um primeiro momento,

pode-se caracterizar tal corrente como concorrente à teoria proposta por Fama (1970). Entretanto, conforme afirmam Karp e Van Vuuren (2019), as duas correntes podem ser vistas como complementares, uma vez que a HMF não rejeita necessariamente a existência de momentos de eficiência de mercado, apenas não se limita a esta. Dessa forma, a econofísica é uma expansão da corrente moderna, que não se limita a analisar o mercado apenas em momentos de equilíbrio, mas sim em quaisquer estados possíveis, inclusive estado de eficiência. É interessante ressaltar que o estudo de Fama (1991) corrobora essa visão, uma vez que reconhece tendências esporádicas no mercado como possíveis, porém o fato de elas não se sustentarem no longo prazo converge para um estado de eficiência.

## ■ 1.4 Novas vertentes da econofísica

De acordo com Schinckus (2016), a econofísica pode ser subdividida em duas vertentes: a econofísica baseada em estatística e a econofísica baseada em agentes. Quanto à primeira vertente, trata-se de uma abordagem que visa analisar fenômenos macro e identificar seus padrões por meio de modelagens que sejam condizentes com sistemas complexos, sendo os principais fundamentos desses estudos os descritos nas seções anteriores deste artigo. Tal abordagem foi a pioneira entre os estudos da área, cujo enfoque era, sobretudo, testar modelos que captam as caudas leptocúrticas, heterocedasticidade da variância e estrutura de correlação/autocorrelação das distribuições empíricas dos retornos de ativos.

Por sua vez, a econofísica baseada em agentes tem uma ligação com abordagens voltadas para compreensão de fenômenos microeconômicos associando-os com o comportamento de estruturas moleculares e partículas. Essa vertente de análise teve origem na necessidade e no interesse em avançar com teorias econômicas do ponto de vista micro, incorporando elementos multidisciplinares em suas análises (Jovanovic & Schinckus, 2013). O Quadro 1 sintetiza as principais características dessas três correntes da econofísica.

As análises *bottom-up* partem dos fenômenos micro, e, por meio de analogias com fenômenos da física, são propostos modelos que possam ser expandidos para além da amostra, seguindo um raciocínio dedutivo. Já a vertente *top-down* define que micropadrões observados em fenômenos devem seguir algum macropadrão determinado. Nesse aspecto, as interações micro dos agentes são calibradas para ser possível replicar um comportamento descrito por teorias existentes (Schinckus, 2016).

### Quadro 1

#### Principais características das correntes atuais da econofísica

	Econofísica estatística	Econofísica baseada em agentes <i>bottom-up</i>	Econofísica baseada em agentes <i>top-down</i>
Metodologia	Fenomenológica	<i>Bottom-up</i>	<i>Top-down</i>
Produtos	Macropadrões estatísticos	Macropadrões	Interações microcompatíveis com macropadrões
Objetivo	Propósitos descritivos	Reprodução de dados para previsões	Propósitos preditivos e descritivos
Mecanismos	Processos estatísticos	Processos algorítmicos	Processos estatísticos e algorítmicos

Fonte: Adaptado de Schinckus (2016, p. 3.309).

Embora a econofísica estatística seja a mais conhecida e utilizada como foco em trabalhos da área e finanças, as análises das tradições baseadas em agentes vêm crescendo nos últimos anos. Assim como na primeira abordagem, as outras duas possuem o potencial de modelar os dados de maneira mais acurada, se comparado com os modelos clássicos, o que demonstra uma ponte entre os modelos microeconômicos e físicos, embora esta não seja a princípio intuitiva. Estudos como os de Zhou e Sornette (2007), Sornette (2014) e Berger et al. (2021) são exemplos de trabalhos que demonstram a convergência dessas correntes com as teorias clássicas.

## 2

### METODOLOGIA

Como método de pesquisa foi selecionada a análise bibliométrica, a qual se caracteriza por ser uma modalidade de pesquisa cujo enfoque é analisar a produção acadêmica sobre determinado tema, visando tanto analisar o volume de produção acadêmica e citações quanto mapear o cenário de publicações e redes de parcerias (Noyons et al., 1999).

Na consecução da pesquisa, utilizou-se uma adaptação do protocolo proposto por Thomé et al. (2016), sendo a metodologia final composta de cinco etapas:

1) *Planejamento da pesquisa e os enfoques das análises*: O objetivo do estudo é analisar a evolução das publicações da econofísica e identificar o atual estado da produção nacional e internacional sobre o tema.

2) *Busca na literatura*: Nessa etapa, foi definida a seleção das bases de pesquisa. Para examinar os trabalhos mais relevantes sobre a temática, analisaram-se as publicações em duas bases amplamente reconhecidas no meio acadêmico: Web of Science e Scopus (Chadegani et al., 2013). Elas são produzidas pela Clarivate Analytics e Elsevier, respectivamente, e constituem as bases de dados bibliográficas de maior impacto acadêmico em nível internacional (Powell & Peterson, 2017; Trajtel et al., 2017). Além disso, ambas são compatíveis com a ferramenta de análise bibliométrica Bibliometrix (Aria & Cuccurullo, 2017).

3) *Coleta de dados*: Foram coletados dados de publicações efetivadas até 13 de agosto de 2024. Os códigos utilizados para a busca encontram-se no Quadro 2.

## Quadro 2

### Códigos utilizados no estudo bibliométrico

BASE	CÓDIGO
Scopus	TITLE-ABS-KEY (((“Hurst” OR “Dimensão Fractal” OR “Fractal”) AND (“Econofísica” OR “Finanças” OR “Hipótese de Mercados Fractais”) OR “Hipótese de Mercados Fractais” OR “Econofísica”) OR ((“Hurst” OR “Fractal Dimension” OR “Fractal”) AND (“Econophysics” OR “Finance” OR “Fractal Market Hypothesis”) OR “Fractal Market Hypothesis” OR “Econophysics”)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, “ar”) OR LIMIT-TO (DOCTYPE, “ch”) OR LIMIT-TO (DOCTYPE, “bk” ))
Web of Science	(TS=( (((“Hurst” OR “Dimensão Fractal” OR “Fractal”) AND (“Econofísica” OR “Finanças” OR “Economia” OR “Hipótese de Mercados Fractais”) OR “Hipótese de Mercados Fractais” OR “Econofísica”) OR ((“Hurst” OR “Fractal Dimension” OR “Fractal”) AND (“Econophysics” OR “Finance” OR “Economics” OR “Fractal Market Hypothesis”) OR “Fractal Market Hypothesis” OR “Econophysics”))) ) Índices=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, ESCI Tempo estipulado=Todos os anos

Fonte: Elaborado pelos autores.

4) *Avaliação da qualidade*: Na avaliação dos dados coletados, eliminaram-se os artigos em duplicidade, e realizaram-se ajustes para a unificação de nomes e siglas de autores e países.

5) *Análise de dados:* Após a unificação das duas bases, os dados foram analisados no ambiente R por meio do pacote Bibliometrix. Com esse *software*, realizou-se a análise sistemática, com destaque para volume de publicações e citações, periódicos, trabalhos e autores mais relevantes para a área, estado da arte das temáticas e dispersão geográfica dos autores e de suas redes de parcerias.

### 3

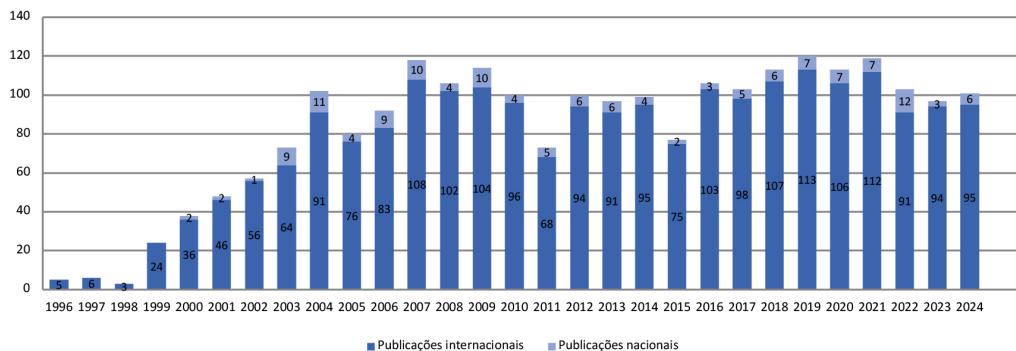
## ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA PRODUÇÃO NACIONAL E INTERNACIONAL SOBRE ECONOFÍSICA

Dentre os trabalhos identificados nas bases de dados, 549 foram encontrados na base Scopus e 2.115 na base Web of Science. Dentre os trabalhos coletados, 313 estavam presentes nas duas bases, de forma que o total de estudos analisados foi de 2.351 artigos. Iniciando as análises sobre o volume de publicação, os estudos da econofísica passaram a ter um incremento significativo a partir de 1998, passando de três publicações por ano em média para 24 em 1999, e em 2023 o total de publicações alcançou o patamar de 97. Embora nos últimos oito anos possa ser observada uma tendência de crescimento de publicações em torno de 2,93%, desde 2022 houve uma reversão dessa tendência, o que corrobora a taxa de aumento de 4% do volume de publicações em 2024, totalizando 101 publicações. A Figura 1 ilustra o volume de crescimento de publicações. Ressalva-se que foram encontradas publicações sobre a temática a partir de 1916, porém, como até 1990 a média de publicações oscilava entre 1 e 0, optou-se por desconsiderar as publicações anteriores a essa data.

Destaca-se também que 98,14% dos trabalhos foram publicados em inglês. O segundo idioma mais publicado é o chinês, o equivalente a 0,95%. Além disso, com relação às publicações com autores nacionais, nota-se que seu início se deu em 2000, e apenas em 2003 o volume de publicações ultrapassou o limite de dois artigos por ano. Nos últimos cinco anos, a média de publicações nacionais foi de 6,2 por ano, refletindo os 6,31% do volume global de publicações nessa temática.

**Figura 1**

Volume de publicações em econofísica entre 1990 e 2024

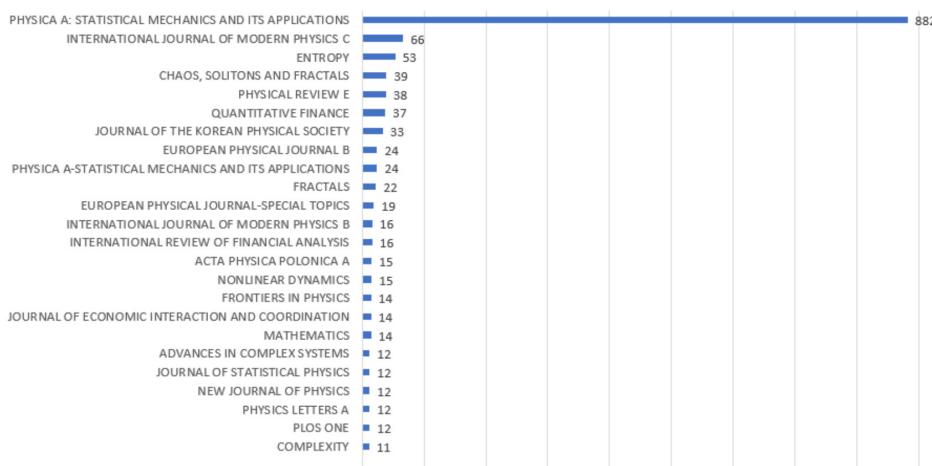


Fonte: Elaborada pelos autores.

A Figura 2 apresenta os veículos de publicação mais relevantes na temática, em que se destaca o periódico *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* que detém a maior concentração de estudos da temática publicados, cerca de 37,52% dos artigos analisados. O segundo maior volume se concentra no *International Journal of Modern Physics C*, com cerca de 2,81%.

**Figura 2**

**Volume de publicações por periódicos**



Fonte: Elaborada pelos autores.

No caso das publicações nacionais, percebe-se uma repetição do padrão internacional: dos 141 artigos brasileiros, 55,61% foram publicados na *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* e 7,09% na *International Journal of Modern Physics C*. Dessa forma, chama a atenção o fato de que as publicações cuja corrente de análise é a econofísica ocorrem em maior frequência em revistas de Física e não de Administração, Economia ou Finanças, o que revela indícios de que essa vertente de análise ainda não está disseminada entre os principais periódicos de Ciências Sociais aplicadas.

Uma análise complementar diz respeito do Índice de Hirsch ou *H-Index*, que consiste em uma métrica que originalmente mesura o impacto da produção de um autor (Hirsch, 2005), porém posteriormente a métrica foi adaptada para qualificar também periódicos científicos (Braun et al., 2006). Desse modo, um periódico possui um *H-Index* de X caso tenha publicado X artigos com pelo menos X citações.

Com relação ao *H-Index* dos periódicos, a *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* é a que mais se destaca, com um valor de 71. Já quanto às demais revistas com índice superior a 10, identificam-se as seguintes: *Physica*

Review E, *Quantitative Finance, International Journal of Modern Physics C, Chaos, Solitions and Fractals* e *European Physical Journal B*, com valores, respectivamente, de 19, 17, 15, 12 e 11.

Na análise dos termos mais relevantes para os trabalhos selecionados, foi gerada uma nuvem de palavras de suas *keywords plus*. Conforme as análises, observou-se que os termos mais recorrentes nos estudos analisados são: *dynamics*, que aparece 223 vezes, o equivalente a 7,51% dos 20 termos mais utilizados; seguido dos termos *model* (214 contabilizações), *finance* (205 contabilizações), *econophysics* (186 contabilizações) e *fractals* (184 contabilizações).

Com base nessa constatação, pode-se afirmar que o *design* de modelagens dinâmicas dos retornos e as volatilidades são os temas mais trabalhados, o que é condizente com as constatações teóricas descritas nas seções anteriores. Além disso, é interessante perceber uma alta frequência de *keywords* voltadas para metodologias de análises, tais como *fractals*, *distributions* e *time series*.

Ressalta-se que, dada a concentração de publicações em revistas de Física Aplicada, a presença de termos gerais como *finance*, *economics*, *stock-market* e *financial markets* se justificam na medida em que sinalizam para os leitores que tais artigos têm como escopo a aplicabilidade da física no campo de finanças. De forma semelhante, os artigos publicados em revistas da área de administração trazem, em geral, *keywords* que deixam evidente a utilização de modelagens da Física Aplicada em séries temporais financeiras.

Dada essa natureza mais técnica das *keywords plus*, optou-se por reestimar os termos mais relevantes após a exclusão das palavras mais genéricas. O resultado encontra-se na Figura 3. Com base nos ajustes feitos, é possível destacar temáticas envolvendo aspectos como volatilidade, distribuição empírica dos retornos de ativos e características que vão de encontro à eficiência de mercados, tais como memória de curto/longo prazos, e que são as mais relevantes nos estudos dessa área.

**Figura 3**

Nuvem de palavras-chave



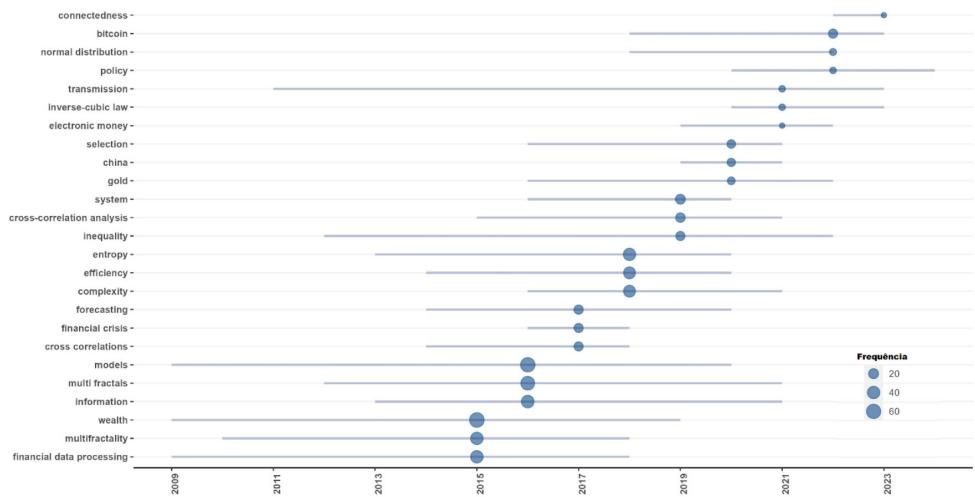
Fonte: Elaborada pelos autores.

Adicionalmente foi feita uma análise das tendências dessas temáticas ao longo dos últimos dez anos considerando o filtro de termos feito anteriormente (ver Figura 4).

Pode-se perceber que aspectos envolvendo conectividade de mercados, criptomoedas e desenvolvimento de políticas financeiras são alguns dos tópicos que recentemente têm retido a atenção de pesquisadores que utilizam a Física Aplicada em finanças. Além disso, é interessante destacar a existência de um foco temático envolvendo análise dos preços do ouro, do mercado chinês e das crises financeiras, embora esses temas tenham tido seus picos entre 2017 e 2021.

**Figura 4**

**Evolução das temáticas das publicações**



Fonte: Elaborada pelos autores.

Quando se realizou uma análise semelhante considerando apenas os artigos nacionais, observou-se uma manutenção do padrão encontrado com os artigos internacionais. Entretanto, alguns tópicos como mercados emergentes e propensão à poupança apareceram como relevantes no início dos anos 2000.

Por fim, para finalizar as análises das *keywords*, foi gerado um gráfico de coocorrência dos termos mais utilizados nos artigos selecionados, apresentando na Figura 5. Primeiramente, percebe-se a existência de sete *clusters*. O mais relevante aparece como o *cluster* rosa, indicando alto nível de coocorrência entre as expressões *Hurst exponent*, análise de intervalo redimensionado (*r/s*), *detrended fluctuation analysis* e *fractal market hypothesis*. Essa observação acaba por ser coerente, uma vez que o expoente de Hurst é a métrica mais utilizada em estudos embasados na HMF, e as outras duas expressões referem-se às métricas comumente utilizadas para calculá-lo.

Por sua vez, o *cluster* laranja indica uma coocorrência entre volatilidade e memória de longo prazo, que se relacionam sobretudo com trabalhos cujo enfoque é a gestão de risco financeiro. Outro *cluster* interessante é verde, o qual liga dois conceitos relacionados à intersecção entre a teoria dos jogos e a

mecânica quântica, sendo utilizados sobretudo para explorar problemas de otimização e tomada de decisões.

**Figura 5**

*Framework de coocorrência*



Fonte: Elaborada pelos autores.

Os *clusters* vermelho e marrom se relacionam sobretudo com a questão da distribuição de riquezas, uma das preocupações da macroeconomia. O *cluster* azul sinaliza mais uma vez que o tema criptoativos é um dos focos relevantes de estudos em econofísica. Finalmente, o agrupamento roxo reflete a existência de um *cluster* com trabalhos voltados à compreensão do processo de tomada de decisão envolvendo vários agentes.

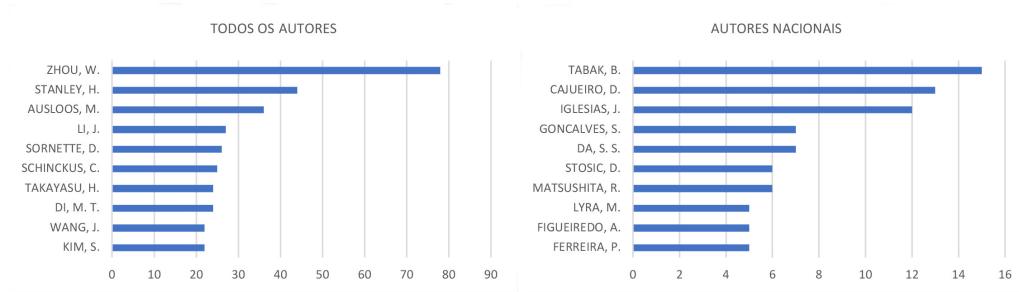
Em suma, a partir das análises feitas sobre os temas de estudos das econofísica, podem-se destacar três pontos. Primeiramente, os estudos em econofísica destacam-se por abordarem temas como volatilidade dos ativos financeiros, distribuição empírica dos retornos e eficiência dos mercados, focando aspectos como memória de curto e longo prazos. Além disso, as pesquisas recentes têm se concentrado em tópicos emergentes, como conectividade de mercados, criptomoedas e crises financeiras. Finalmente, destaca-se que a abordagem da econofísica estatística é predominante em comparação com as demais.

Com relação aos autores mais relevantes da área, os três mais profícuos são Wei-Xing Zhou (78 trabalhos), Harry Eugene Stanley (44 trabalhos) e Marcel

Ausloos (36 trabalhos). Quanto aos autores nacionais, Benjamin Miranda Tabak (15 trabalhos) e Daniel Oliveira Cajueiro (13 trabalhos) são autores que mais se destacam. A Figura 6 apresenta uma síntese dessa análise.

**Figura 6**

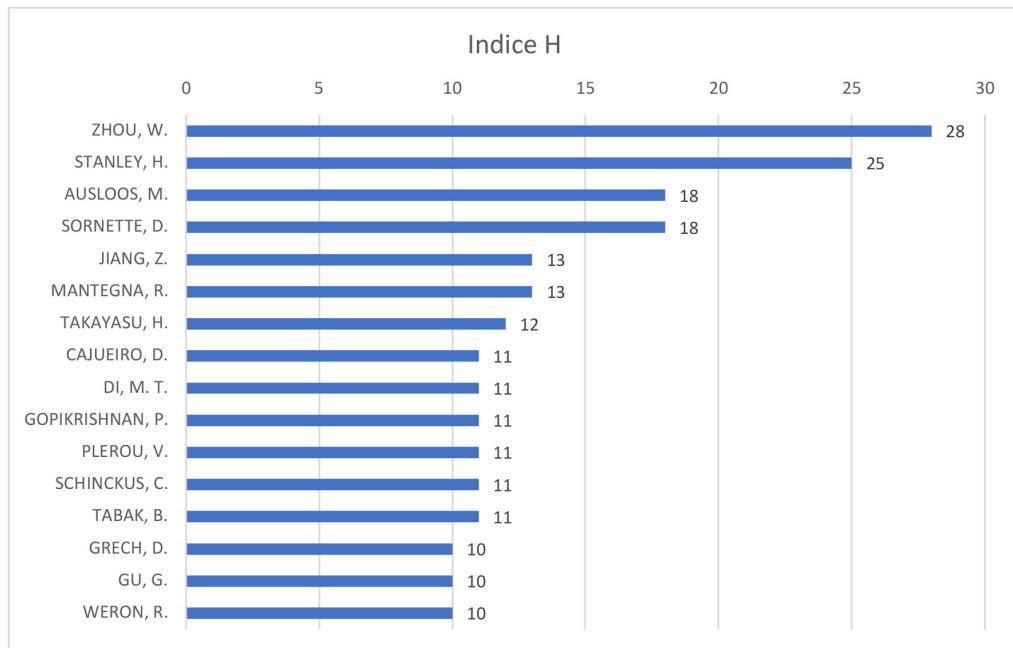
**Autores mais profícuos**



Fonte: Elaborada pelos autores.

Complementando os dados anteriores, a Figura 7 traz a relação dos autores com seus respectivos *H-Index*. A partir dessas informações, corrobora-se a relevância dos três autores mais publicados. Além disso, percebe-se que Benjamin Miranda Tabak e Daniel Oliveira Cajueiro, autores nacionais que se destacam na área, possuem um índice de valor igual a 11.

**Figura 7**  
**H-Index dos autores**

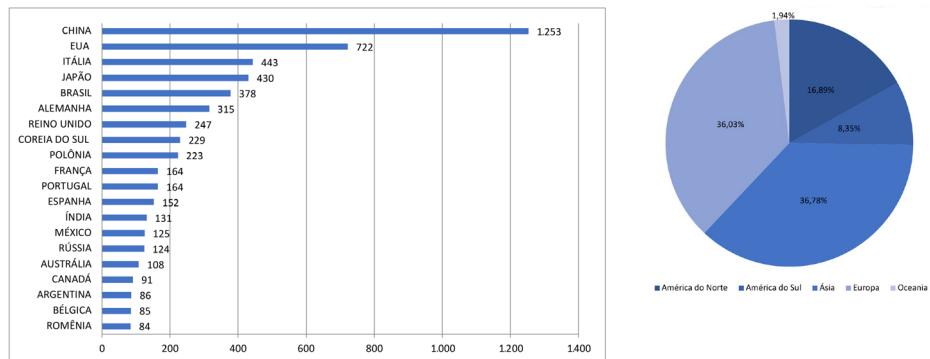


Fonte: Elaborada pelos autores.

Ademais, de acordo com as informações sobre a volume de citações, 22,56% dos estudos citados possuem autores chineses, ao passo que 13,00% são oriundos dos Estados Unidos, 7,98%, da Itália, 7,98%, do Japão e 6,81%, do Brasil. Dessa forma, corrobora-se que o Brasil é um importante produtor de estudos financeiros que utilizam técnicas de análise derivadas da Física Aplicada. O rank dos 20 países com maior produção da área encontra-se na Figura 8.

**Figura 8**

**Distribuição geográfica das citações**



Fonte: Elaborada pelos autores.

Desse modo, pode-se concluir primeiramente que, na literatura da econofísica, há uma predominância de pesquisadores norte-americanos, chineses e italianos tanto no quesito volume de publicação quanto no número de citações dos estudos. Além disso, verifica-se uma grande concentração de citações provenientes de estudos europeus, cerca de 36% do total. No que tange aos trabalhos de autores brasileiros, eles possuem uma representatividade relevante em nível internacional, com dois autores com *H-Index* superior a 10 e 5,61% das publicações globais, o que leva o Brasil a estar entre os cinco países que mais publicam sobre a temática, representando cerca de 80% das publicações da América do Sul.

Para complementar as discussões realizadas anteriormente, foram analisados os trabalhos mais citados dentro da temática. A Tabela 1 apresenta a lista dos 20 trabalhos mais citados. Primeiramente, é interessante destacar que, dentre eles, cinco foram publicados na *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. Além disso, um dos estudos de Daniel Oliveira Cajueiro, autor nacional, compõe o *ranking*, reforçando assim a presença de autores brasileiros na literatura sobre o tema.

**Tabela 1**

**Estudos mais citados nos artigos analisados**

PUBLICAÇÕES	TOTAL DE CITAÇÕES	CITAÇÕES MÉDIAS POR ANO
Campbell, J.Y., 2012, The Econometrics of Financial Markets	2.835	218,08
Dorogovtsev, S.n., 2002, Advances in Physics	2.052	89,22
Baillie, R.T., 1996, Journal of Econometrics	1.053	36,31
Batty, M., 2008, Science	649	38,18
Zhou W.X., 2008, Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics	528	31,06
Scalas, E., 2000, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications	524	20,96
Podobnik, B., 2009, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America	519	32,44
Riedi, R.H., 1999, IEEE Transactions on Information Theory	458	17,62
Cheah Et, 2015, Economics Letters	427	42,7
Preis T, 2013, Scientific Reports	368	30,67
Mainardi, F., 2000, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications	362	14,48
Zanin, M., 2012, Entropy	352	27,08
Dragulescu, A., 2001, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications	347	14,46
Roberto, M., 2002, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications	333	14,48
Yakovenko, V.M., 2009, Reviews of Modern Physics	312	19,5
Beran, J., 2013, Long-Memory Processes: Probabilistic Properties and Statistical Methods	269	22,42
Hu, Y., 2003, Infinite Dimensional Analysis, Quantum Probability and Related Topics	267	12,14
Cajueiro, D.O., 2004, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications	266	12,67
Weron, R., 2002, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications	246	10,7

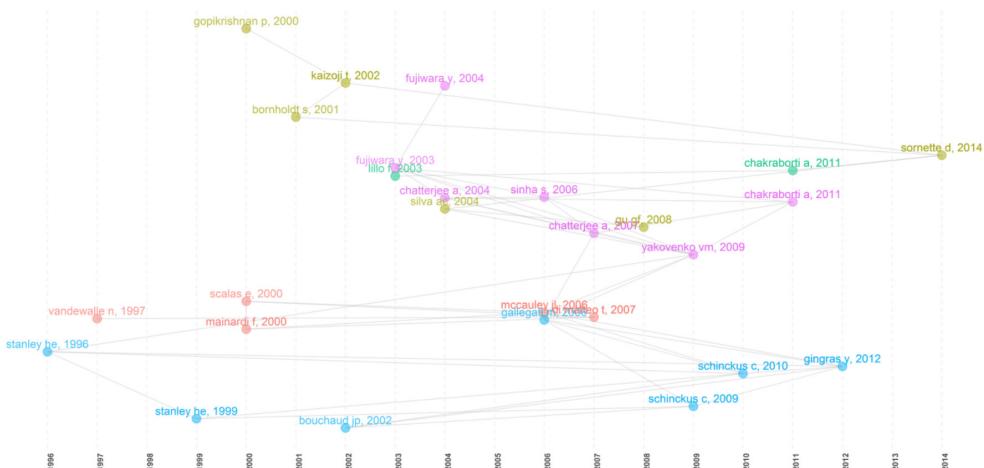
Fonte: Elaborada pelos autores.

Além disso, foi gerado também um histográfico ilustrando a rede de citações diretas. O resultado, exposto na Figura 9, aponta a existência de cinco estruturas intelectuais, isto é, redes de citação. A rede azul traz estudos cujo enfoque está em apresentar e discutir aspectos introdutórios da econofísica.

As redes em bege e rosa, por sua vez, possuem relação com estudos voltados para a econofísica baseada em agentes segundo as abordagens *top-down* e *bottom-up*, respectivamente. Por fim, a rede em vermelho está associada a estudos voltados para as primeiras análises das propriedades multifractais das séries temporais financeiras. Para a rede verde, não foi identificada nenhuma concentração de tema nos trabalhos.

**Figura 9**

**Histográfico e redes de citações diretas**



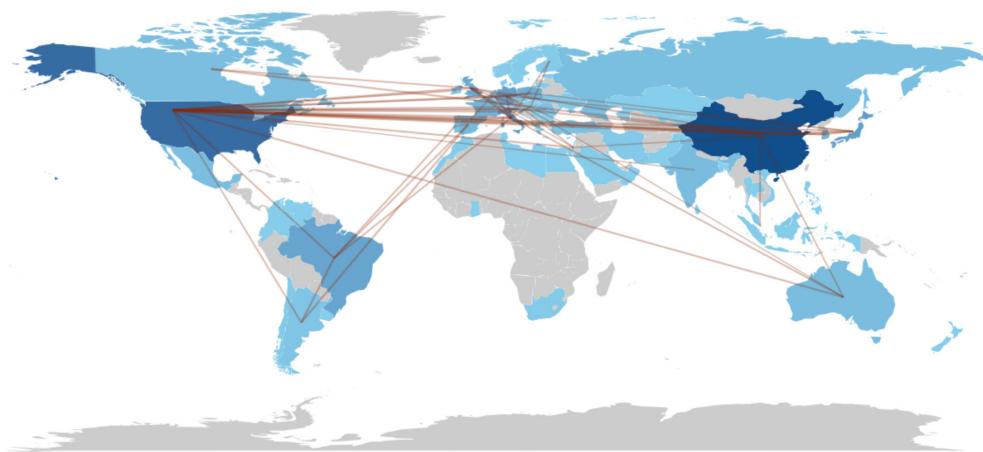
Fonte: Elaborada pelos autores.

Por fim, foi gerada também uma análise sobre a rede de colaboração internacional dos autores, e isso está disposto na Figura 10. Nela, quanto mais escura a tonalidade azul, maior o volume de publicação; a cor cinza indica ausência de publicações oriundas do país. Desse modo, verifica-se que a China é o país cujos autores mais publicam sobre a temática, com 1.095 trabalhos. Estados Unidos, Itália, Japão e Brasil completam os cinco maiores.

A partir dos resultados, foram identificados 212 trabalhos norte-americanos com colaborações internacionais, com destaque para China (13,68%), França (9,43%), Alemanha (7,55%), Itália (7,08%), Japão e Reino Unido (5,19%). Já quanto à China, as colaborações internacionais mais relevantes totalizam 94 estudos; e além das colaborações com os Estados Unidos (30,85%), podem-se destacar também as parcerias com o Canadá (8,51%), a Suíça (7,45%), a França e o Reino Unido (6,38%), e a Austrália e o Japão (5,32%).

**Figura 10**

Mapa de colaboração interacional dos autores



Fonte: Elaborada pelos autores.

No caso específico do Brasil, das 46 colaborações realizadas, dez foram com autores da Argentina, sete com autores de Portugal, da Espanha e da Itália, e cinco com autores norte-americanos. As demais colaborações, com autores da China, da Austrália, do Canadá, do Chile, da Croácia, da França e da Suíça, ocorreram em uma frequência de uma ou duas por artigo. Desse modo, verifica-se uma rede de colaboração forte com a Argentina e alguns países da Europa, o que sinaliza oportunidades para os autores nacionais encontrarem margens para internacionalizar projetos e estudos na temática.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O campo das finanças passou por mudanças significativas desde o surgimento das finanças modernas no século XX, baseadas na teoria econômica neoclássica, na racionalidade dos investidores e na maximização da utilidade esperada. Esse modelo, porém, tem sido questionado por sua capacidade de explicar a irracionalidade dos agentes, especialmente com o desenvolvimento das finanças comportamentais. A econofísica surge como uma alternativa, tratando o mercado financeiro como um sistema complexo e adotando modelagens matemáticas oriundas das ciências naturais para explicar o comportamento de objetos de pesquisas econômicos.

A partir de um estudo bibliométrico das literaturas nacional e internacional, foi possível identificar que há uma prevalência de publicações de trabalhos voltados para a econofísica em revistas da área de Física, sobretudo nos periódicos *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* e *International Journal of Modern Physics C*. Esse fato pode refletir uma resistência de periódicos de Administração, Economia e Finanças em aceitar estudos dessa vertente, seja pelo maior enfoque em aspectos metodológicos e de modelagens com base em estudos da Física, ou pela ausência de uma teoria subjacente que dê suporte aos modelos utilizados nas análises empíricas.

Quanto às principais temáticas, os estudos em econofísica exploram questões como a volatilidade dos ativos financeiros, a distribuição empírica dos retornos e a eficiência dos mercados, com destaque para a memória de curto e longo prazos. Nos últimos anos, tópicos emergentes como conectividade de mercados, criptomoedas e crises financeiras têm ganhado relevância, enquanto o expoente de Hurst e a HMF permanecem centrais. Além disso, a pesquisa se expande para a gestão de risco financeiro, a aplicação de teoria dos jogos e mecânica quântica, e a análise da distribuição de riquezas e dos processos de tomada de decisão por múltiplos agentes.

Do ponto de vista global, o maior volume de publicações advém de artigos chineses e norte-americanos. Cerca de 7% dos estudos são oriundos do Brasil, e dois autores nacionais se encontram entre os 15 mais relevantes nas bases analisadas. Cabe destacar ainda que um dos estudos nacionais se situa dentro do grupo de trabalhos mais citados pela literatura. Por fim, as análises relevaram a existência de uma rede de colaboração dos autores brasileiros com a Argentina, Portugal, a Espanha e a Itália. Essa rede pode ser explorada por autores nacionais que visam tanto internacionalizar seus estudos como também dar mais robustez teórica e metodológica nos artigos mediante visões advindas de fora do país.

Ademais, destaca-se que a área da econofísica está em expansão em níveis nacional e global, porém ainda é pouco conhecida, e sua institucionalização como vertente de análise ainda é questionada por periódicos fora da área de Física Aplicada. Dessa forma, se, por um lado, isso se mostra como um fator inibidor da sua expansão, especialmente no Brasil, por outro, possibilita um vasto campo para pesquisas em que a econofísica pode ser explorada, o que abre oportunidades para que uma grande gama de estudos seja realizada tanto por pesquisadores brasileiros quanto por estrangeiros.

Desse modo, espera-se que o estudo proposto auxilie pesquisadores em finanças em duas frentes. Primeiramente, contribuir para uma maior divulgação da aplicabilidade de métodos da Física Aplicada dentro do contexto financeiro-econômico por meio de uma revisão da literatura-base para a compreensão da teoria por trás dessa vertente de análise, a qual, conforme apontado nos estudos, ainda é incipiente no Brasil. Quanto à segunda contribuição, trata-se de um mapeamento das publicações no campo que permite ao leitor uma compreensão mais pragmática sobre as tendências de publicações, de modo que se espera que o estudo sirva como um guia para os pesquisadores de finanças e economia que desejem explorar essa vertente de análise.

Como limitação de pesquisa, deve ser destacado seu foco em apenas duas bases científicas. A ampliação da análise a mais bases talvez agregasse mais dados aos resultados, mas certamente não promoveria grandes mudanças nas constatações a que se chegou. Fica esse desafio como sugestão para pesquisas futuras que promovam atualização e ampliação do escopo de análise diante do fluxo de publicações e do potencial de expansão apresentado pelo campo da econofísica, considerando, por exemplo, bases de artigos publicados em congressos e simpósios.

E por fim, por se tratar de um estudo bibliométrico de um tema pouco conhecido na literatura nacional em Administração, permeado por diferentes abordagens, as análises e discussões ora apresentadas não tiveram o propósito de esgotá-lo, mas sim ampliar sua compreensão, despertar/ampliar o interesse da comunidade acadêmica, a fim de gerar novas oportunidades de pesquisas e contribuir para a ampliação e consolidação desse campo do conhecimento.

## ECONOPHYSICS AND FINANCE: NATIONAL AND INTERNATIONAL BIBLIOMETRIC REVIEW

### Abstract

This study aims to analyze, through a bibliometric review, papers published in the field of econophysics, an adaptation of physics modeling for financial analysis. The bibliographical survey was carried out in Scopus and Web of Science, and the analysis was performed on 2,351 articles published between 1900 and 2024, using the Bibliometrix package of the R software. The results show that the United States and China are countries with the largest number of publications on the subject, although Brazil has a relevant volume of publications. Furthermore, most studies are published in applied physics journals, with a strong focus on methodological aspects, with current trends for publications on uncertainty, entropy and dynamism. Finally, it was verified the expansion of the volume of published works and the development of new studies, thus signaling the rise of this aspect as well as its potential for advances and applications in the area of finance.

**Keywords:** Bibliometric review; econometrics; econophysics; finance; fractals.

### Referências

- Akgiray, V., & Booth, G. G. (1988). The siable-law model of stock returns. *Journal of Business & Economic Statistics*, 6(1), 51-57. <https://doi.org/10.1080/07350015.1988.10509636>
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959-975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Bachelier, L. (1900). Théorie de la spéculation. *Annales Scientifiques de l'École Normale Supérieure*, 17, 21-86. <https://doi.org/10.24033/asens.476>
- Backhouse, R. E., & Morgan, M. S. (2000). Introduction: Is data mining a methodological problem? *Journal of Economic Methodology*, 7(2), 171-181. <https://doi.org/10.1080/13501780050045065>
- Bacry, E., Delour, J., & Muzy, J. F. (2001). Modelling financial time series using multifractal random walks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 299(1), 84-92. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(01\)00284-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(01)00284-9)
- Berger, W., Hokamp, S., & Seibold, G. (2021). Dynamic behavioural changes in an agent-based econophysics tax compliance model: Bomb crater versus target effects and efficient audit strate-

gies. *Journal of Public Finance and Public Choice*, 36(1), 3-24. <https://doi.org/10.1332/251569120X15840237292628>

Black, F., & Scholes, M. (1973). The pricing of options and corporate liabilities. *Journal of Political Economy*, 81(3), 637-654.

Blattberg, R. C., & Gonedes, N. J. (2010). A Comparison of the stable and student distributions as statistical models for stock prices. In G. M. Allenby, *Perspectives on promotion and database marketing* (pp. 25-61). World Scientific. [https://doi.org/10.1142/9789814287067\\_0003](https://doi.org/10.1142/9789814287067_0003)

Braun, T., Gläzel, W., & Schubert, A. (2006). A Hirsch-type index for journals. *Scientometrics*, 69(1), 169-173. <https://doi.org/10.1007/s11192-006-0147-4>

Calvet, L., & Fisher, A. (2002). Multifractality in asset returns: Theory and evidence. *The Review of Economics and Statistics*, 84(3), 381-406. <https://doi.org/10.1162/003465302320259420>

Calvet, L. E., & Fisher, A. J. (2012). *Extreme risk and fractal regularity in finance* [SSRN Scholarly Paper 2126466]. Social Science Research Network. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2126466>

Caporale, G. M., Gil-Alana, L., Plastun, A., & Makarenko, I. (2016). Long memory in the Ukrainian stock market and financial crises. *Journal of Economics and Finance*, 40(2), 235-257. <https://doi.org/10.1007/s12197-014-9299-x>

Chadegani, A. A., Salehi, H., Yunus, M. M., Farhadi, H., Fooladi, M., Farhadi, M., & Ebrahim, N. A. (2013). A comparison between two main academic literature collections: Web of Science and Scopus databases. *Asian Social Science*, 9(5), Article 5. <https://doi.org/10.5539/ass.v9n5p18>

Chakraborti, A., Toke, I. M., Patriarca, M., & Abergel, F. (2011). Econophysics review: I. Empirical facts. *Quantitative Finance*, 11(7), 991-1012. <https://doi.org/10.1080/14697688.2010.539248>

Dacorogna, M. M., Müller, U. A., Nagler, R. J., Olsen, R. B., & Pictet, O. V. (1993). A geographical model for the daily and weekly seasonal volatility in the foreign exchange market. *Journal of International Money and Finance*, 12(4), 413-438. [https://doi.org/10.1016/0261-5606\(93\)90004-U](https://doi.org/10.1016/0261-5606(93)90004-U)

Dima, B., Dima, S. M., & Ioan, R. (2021). Remarks on the behaviour of financial market efficiency during the covid-19 pandemic. The case of VIX. *Finance Research Letters*, 43, 101967, p.1-9. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2021.101967>

Ding, Z., Granger, C. W. J., & Engle, R. F. (1993). A long memory property of stock market returns and a new model. *Journal of Empirical Finance*, 1(1), 83-106. [https://doi.org/10.1016/0927-5398\(93\)90006-D](https://doi.org/10.1016/0927-5398(93)90006-D)

Dubovikov, M. M., Starchenko, N. V., & Dubovikov, M. S. (2004). Dimension of the minimal cover and fractal analysis of time series. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 339(3), 591-608. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2004.03.025>

Elliot, R. N. (1938). The wave principle. In R. R. Prechter, *Elliot's masterworks* (pp. 83-150). New Classics Library.

- Fama, E. F. (1970). Efficient capital markets: A review of theory and empirical work. *The Journal of Finance*, 25(2), 383-417. <https://doi.org/10.7208/9780226426983-007>
- Fama, E. F. (1991). Efficient capital markets: II. *The Journal of Finance*, 46(5), 1575-1617. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.1991.tb04636.x>
- Ghashghaie, S., Breymann, W., Peinke, J., Talkner, P., & Dodge, Y. (1996). Turbulent cascades in foreign exchange markets. *Nature*, 381(6585), artigo 6585. <https://doi.org/10.1038/381767a0>
- Grech, D. (2016). Alternative measure of multifractal content and its application in finance. *Chaos, Solitons & Fractals*, 88, 183-195. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2016.02.017>
- Hirsch, J. E. (2005). An index to quantify an individual's scientific research output. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(46), 16569-16572. <https://doi.org/10.1073/pnas.0507655102>
- Hoover, K. D., & Perez, S. J. (2000). Three attitudes towards data mining. *Journal of Economic Methodology*, 7(2), 195-210. <https://doi.org/10.1080/13501780050045083>
- Kotyrba, M., Volna, E., Janousek, H., & Brazina, D. (2013). Methodology for Elliott waves pattern recognition. *Ratio*, 34(55), 1-6.
- Jiang, Z.-Q., Xie, W.-J., Zhou, W.-X., & Sornette, D. (2019). Multifractal analysis of financial markets: A review. *Reports on Progress in Physics*, 82(12), 125901, 1-106. <https://doi.org/10.1088/1361-6633/ab42fb>
- Jovanovic, F., & Schinckus, C. (2013). The emergence of econophysics: A new approach in modern financial theory. *History of Political Economy*, 45(3), 443-474. <https://doi.org/10.1215/00182702-2334758>
- Karp, A., & Van Vuuren, G. (2019). Investment implications of the fractal market hypothesis. *Annals of Financial Economics*, 14(01), 1950001, 1-27. <https://doi.org/10.1142/S2010495219500015>
- Kristoufek, L., & Vosvrda, M. (2013). Measuring capital market efficiency: Global and local correlations structure. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 392(1), 184-193. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2012.08.003>
- Kristoufek, L., & Vosvrda, M. (2014). Measuring capital market efficiency: Long-term memory, fractal dimension and approximate entropy. *The European Physical Journal B*, 87(7), 162, 1-14. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2014-50113-6>
- Kwapien, J., & Drożdż, S. (2012). Physical approach to complex systems. *Physics Reports*, 515(3), 115-226. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2012.01.007>
- Lévy, P. (1924). Théorie des erreurs. La loi de Gauss et les lois exceptionnelles. *Bulletin de la Société Mathématique de France*, 52, 49-85. <https://doi.org/10.24033/bsmf.1046>
- Lima, L. S., & Oliveira, S. C. (2020). Two-dimensional stochastic dynamics as model for time evolution of the financial market. *Chaos, Solitons & Fractals*, 136, 109792, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.109792>

- Mandelbrot, B. (1963). New methods in statistical economics. *Journal of Political Economy*, 71(5), 421-440. <https://doi.org/10.1086/258792>
- Mandelbrot, B. (1967). The variation of some other speculative prices. *The Journal of Business*, 40(4), 393-413.
- Mandelbrot, B. B., Fisher, A. J., & Calvet, L. E. (1997). *A Multifractal model of asset returns* [SSRN Scholarly Paper 78588]. Social Science Research Network. <https://papers.ssrn.com/abstract=78588>
- Mandelbrot, B. B., & Hudson, R. L. (2004). *The (mis)behaviour of markets: A fractal view of risk, ruin and reward*. Profile Books.
- Mantegna, R. N. (1991). Lévy walks and enhanced diffusion in Milan stock exchange. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 179(2), 232-242. [https://doi.org/10.1016/0378-4371\(91\)90061-G](https://doi.org/10.1016/0378-4371(91)90061-G)
- Mantegna, R. N., & Kertész, J. (2011). Focus on Statistical physics modeling in economics and finance. *New Journal of Physics*, 13(2), 025011, 1-7. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/13/2/025011>
- McCauley, J. L. (2004). *Dynamics of markets: Econophysics and finance*. Cambridge University Press.
- McCauley, J. L. (2006). Response to “worrying trends in econophysics”. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 371(2), 601-609. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2006.05.043>
- Nekrasova, I., Karnaughova, O., & Sviridov, O. (2018). Fractal properties of financial assets and forecasting financial crisis. In: In Nekrasova, I., Karnaughova, O., & Christiansen, B. (Eds.). (2018). *Fractal approaches for modeling financial assets and predicting crises* (pp. 23-41). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-3767-0.ch002>
- Noyons, E. C. M., Moed, H. F., & Luwel, M. (1999). Combining mapping and citation analysis for evaluative bibliometric purposes: A bibliometric study. *Journal of the American Society for Information Science*, 50(2), 115-131. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4571\(1999\)50:2<115::AID-ASI3>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4571(1999)50:2<115::AID-ASI3>3.0.CO;2-J)
- Peters, E. E. (1994). *Fractal market analysis: Applying chaos theory to investment and economics*. Wiley.
- Powell, K. R., & Peterson, S. R. (2017). Coverage and quality: A comparison of Web of Science and Scopus databases for reporting faculty nursing publication metrics. *Nursing Outlook*, 65(5), 572-578. <https://doi.org/10.1016/j.outlook.2017.03.004>
- Rickles, D. (2007). Econophysics for philosophers. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 38(4), 948-978. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2007.01.003>
- Rickles, D. (2011). Econophysics and the complexity of financial markets. In C. Hooker (Org.), *Philosophy of complex systems* (Vol. 10, pp. 531-565). North-Holland. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52076-0.50019-5>

- Schadner, W. (2021). On the persistence of market sentiment: A multifractal fluctuation analysis. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 581, 126242, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.126242>
- Schinckus, C. (2016). 1996-2016: Two decades of econophysics: Between methodological diversification and conceptual coherence. *The European Physical Journal Special Topics*, 225(17), 3299-3311. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2016-60099-y>
- Sornette, D. (2014). Physics and financial economics (1776-2014): Puzzles, Ising and agent-based models. *Reports on Progress in Physics*, 77(6), 062001, 1-29. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/77/6/062001>
- Thomé, A. M. T., Scavarda, L. F., & Scavarda, A. J. (2016). Conducting systematic literature review in operations management. *Production Planning & Control*, 27(5), 408-420. <https://doi.org/10.1080/09537287.2015.1129464>
- Trajtel, E., Tomkova, V., & Kružlík, P. (2017). Journals in the field “Language and Literature” indexed in Web of Science and Scopus databases. Verification of results of the scientific research in publishing technique. *X Linguae*, 10(4), 245-249. <https://doi.org/10.18355/XL.2017.10.04.20>
- Vandewalle, N., & Ausloos, M. (1998). Multi-affine analysis of typical currency exchange rates. *The European Physical Journal B – Condensed Matter and Complex Systems*, 4(2), 257-261. <https://doi.org/10.1007/s100510050376>
- Zhou, W.-X., & Sornette, D. (2007). Self-organizing Ising model of financial markets. *The European Physical Journal B*, 55(2), 175-181. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2006-00391-6>