57º SBPO
SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
Gramado • RS
DE 5 A 9 DE OUTUBRO DE 2025

CAUSALIDADE E CONTÁGIO ENTRE ÍNDICES DE LUCRATIVIDADE DE MERCADORIAS E DE AÇÕES E AS COTAÇÕES DE CRÉDITOS DE CARBONO NEGOCIADOS NOS MERCADOS INTERNACIONAIS

André Assis de Salles
Escola Politécnica
Universidade Federal do Rio de Janeiro
as@ufrj.br

Renato Barros Lima
Escola Politécnica
Universidade Federal do Rio de Janeiro
relima222@poli.ufrj.br

RESUMO

As atividades associadas ao desenvolvimento econômico utilizando combustíveis fosseis tem provocado uma crescente concentração de gases de efeito estufa na atmosfera e por conseguinte um descontrole climático global. Uma das medidas recentes para atenuar o problema foi a implementação de mercados de créditos de carbono. A elevação dos preços dos créditos de carbono têm um efeito negativo nos preços das ações de firmas intensivas em emissões de carbono e por conseguinte nos seus valores. Assim, deve existir uma relação entre os preços dos créditos de carbono e os preços dos mercados internacionais de commodities e de ações. Este trabalho tem como propósito investigar a interação das cotações de créditos de carbono como os preços praticados nos mercados internacionais de commodities e de ações, através de inferências da causalidade, da cointegração, de modelos vetoriais autoregressivos e de modelos de volatilidade, para se verificar o contágio de volatilidade entre os mercados selecionados.

PALAVRAS CHAVE. Crédito de Carbono, Mercado de Capitais, Contágio de Volatilidade.

Tópicos: GF – Gestão Financeira. EN&PG - PO na Área de Energia, Petróleo e Gás.

ABSTRACT

Activities associated with economic development using fossil fuels have caused an increasing concentration of greenhouse gases in the atmosphere and, consequently, a global climate out of control. One of the recent measures to mitigate the problem was the implementation of carbon credit markets. The increase in carbon credit prices hurts the equity prices of carbon-intensive firms and, consequently, their values. Thus, a relationship between carbon credit prices and prices in international commodity and stock markets must exist. This paper investigates the interaction between carbon credit prices and prices in international commodity and stock markets, using inferences of causality, cointegration, vector autoregressive models, and volatility models to verify volatility contagion between the selected markets.

KEYWORDS. Carbon Credit. Capital Markets. Spillover Volatility.

Paper topics: Financial Management. OR in Energy, Oil & Gas.

1. Introdução

As atividades associadas ao desenvolvimento econômico, principalmente, as que se utilizam de fontes de energia provenientes de combustíveis fosseis tem provocado uma crescente concentração de gases de efeito estufa na atmosfera. Este crescimento, como observado por [Stern 2007], está diretamente relacionado ao aquecimento global e às mudanças climáticas.

Assim, para enfrentar este problema representantes de todos os países do mundo se uniram na Cúpula da Terra, no Rio de Janeiro em 1992, e acordaram um tratado com o objetivo de desacelerar as emissões de gases de efeito estufa. Dentre outras decisões relevantes para atenuar o problema do descontrole climático global, a União Europeia (UE) implementou um mercado de créditos de carbono, ou direitos de emissão de carbono. Assim, em janeiro de 2005, foi implementado o Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia (EU ETS), primeiro sistema internacional de comércio de créditos de carbono operando no modelo de *cap-and-trade*, que considera os níveis de emissão de carbono limitados e permite aos participantes do sistema comprar ou vender permissões de emissão de carbono conforme o necessário. A negociação de créditos de carbono se destina a limitar as emissões de carbono ao atribuírem um custo à emissão de gases de efeito estufa. Desse modo, os preços mais altos dos créditos de carbono devem elevar os custos de produção das atividades intensivas em emissão de carbono provocando um recrudescimento dessas atividades.

A interação entre os preços dos créditos de carbono e a atividade econômica também é influenciada por fatores externos ou indicadores macroeconômicas, tais como taxa de inflação e taxa de juros entre outros, podem afetar os custos das atividades econômicas, através do custo de produção de energia e de outros fatores de produção. Pode-se inferir que o sistema financeiro através dos mercados financeiros e, principalmente, através do mercado de capitais tem um papel crucial na transição para uma economia de baixo carbono. Uma vez que, em uma economia de mercado, é através do mercado de capitais global e dos mercados de capitais das economias nacionais que acontece o financiamento das atividades produtivas. Assim, através desses mercados pode-se verificar os fatores determinantes para o redirecionamento de investimentos de atividades econômicas fortemente poluentes para projetos econômicos "limpos" e ambientalmente sustentáveis. Com os custos de emissão de carbono mais elevados, o preço das licenças de emissão de CO_2 está se torna relevante para a avaliação das firmas ou dos projetos produtivos. Se o mercado de ações penaliza grandes emissores e recompensa pequenos emissores em resposta às mudanças no preço do carbono, tem-se a eficácia da política climática em redirecionar o financiamento para atividades economicamente sustentáveis. Os primeiros estudos empíricos sobre a relação entre o desempenho das ações das empresas e o preço do carbono foram publicados alguns anos após a implementação do EU ETS. Dentre esses estudos pode-se destacar o de [Oberndorfer 2009] e de [Mo et al. 2012]. Outros trabalhos subsequentes relevantes, com ampliação de amostras, foram apresentados por [Oestreich e Tsiakas 2015] e [Tian et al. 2016]. Nesses trabalhos, e em alguns outros apreciados, os resultados obtidos diferem, assim como suas amostras. O mesmo acontece com a direção da relação entre as variações dos preços dos créditos de carbono e das ações negociadas nos diversos mercados de capitais estudados. Um dos resultados análogos obtidos nas pesquisas sobre o tema mostra que a interação entre variações dos preços tanto das ações quanto dos créditos de carbono não se mostra estável ao longo dos períodos estudados. Estudos e pesquisas recentes têm mostrados evidências da influência dos retornos das cotações dos créditos de carbono nos retornos dos preços das ações das firmas listadas nos mercados acionários internacionais. Dentre esses, pode-se mencionar o trabalho de [Ramelli et al. 2018] mostrando que os investidores recompensaram firmas norte-americanas emissoras de CO_2, dada uma mudança repentina para uma política climática menos rigorosa implementada em 2016. Por outro lado, os trabalhos de [Bolton e Kacperczyk 2021(a)] e [Bolton e Kacperczyk 2021(b)] mostraram a presença de um prêmio de sustentabilidade, dado pela diminuição das emissões de carbono, ou seja os investidores exigem retornos maiores das firmas com maior exposição ao risco de carbono. Além disso, os resultados do estudo empírico apresentado por [Hengge et al. 2023] mostram evidências de que anúncios de políticas que elevação dos preços dos créditos de carbono têm um efeito negativo nos preços das

ações de firmas intensivas em emissões de carbono e por conseguinte nos seus valores. Assim, deve existir uma relação entre os preços dos créditos de carbono e os preços dos mercados internacionais de commodities e de ações.

Este trabalho tem como propósito investigar a interação das cotações de créditos de carbono como os preços praticados nos mercados internacionais de *commodities* e de ações, procurando obter inferências sobre a hipótese de causalidade, cointegração, assim como outras advindas das estimativas de modelos vetoriais autoregressivos e modelos de volatilidade bivariados que permitam se obter inferências sobre o contágio de volatilidade entre os mercados selecionados.

Além dessa introdução, este trabalho está organizado da seguinte forma. A seguir, a Seção 2 descreve abordagem metodológica utilizada, destacando testes estatísticos das hipóteses de causalidade e de cointegração, assim como os modelos vetoriais autoregressivos e de volatilidade bivariados. Enquanto, na Seção 3 é apresentada a amostra utilizada e na Seção 4 são apresentados e comentados os resultados obtidos com a aplicação da metodologia aos dados utilizados. Por fim, na Seção 5 são mostrados comentários finais deste trabalho.

2. Abordagem Metodológica Aplicada

Inicialmente foram realizados testes da hipótese de causalidade entre os retornos das cotações de créditos de carbono e os retornos de cada um dos indicadores dos mercados de commodities e dos mercados acionários selecionados. Esses testes foram feitos de modo bidimensional. Esses procedimentos são baseados em um trabalho seminal de Granger (1969), no qual apresenta um teste causalidade, renomado na literatura econométrica, que pode ser sumarizado da seguinte forma: dadas duas séries temporais X_t e Y_t, a questão a ser considerada é se X_t "causa" Y_t, ou se Y_t "causa" X_t. É assumido que a informação relevante para a predição dessas variáveis está contida inteiramente em suas séries de tempo. Para um maior detalhamento do teste de causalidade de Granger pode-se recorrer a [Gujarati e Porter 2011] e [Wooldridge 2017]. De uma maneira simplificada o procedimento realizado para o teste de causalidade de Granger, se dá a partir da estimação de um modelo vetorial autoregressivo (VAR) apresentado na literatura econométrica por [Sims 1988] a partir de uma generalização natural de modelos autoregressivos univariados. O modelo VAR em sua forma bivariada com apenas duas variáveis endógenas $y_{1,t}$ e $y_{2,t}$, cada um dos valores atuais depende de diferentes combinações dos *k* valores anteriores das duas as variáveis adicionadas a um termo estocástico pode ser descrito conforme modelo formado pelas equações (1) e (2), adiante:

$$y_{1t} = \beta_{10} + \beta_{11}y_{1t-1} + \cdots + \beta_{1k}y_{1t-k} + \alpha_{11}y_{2t-1} + \cdots + \alpha_{1k}y_{2t-k} + u_{1t} \quad (1)$$

$$y_{2t} = \beta_{20} + \beta_{21}y_{2t-1} + \cdots + \beta_{2k}y_{2t-k} + \alpha_{21}y_{1t-1} + \cdots + \alpha_{2k}y_{1t-k} + u_{2t} \quad (2)$$

Onde u_{it} é um termo estocástico da equação e com $E(u_{it}) = 0 \mid i = (1,2)$. Por simplicidade, supõe-se que $E(u_{it}u_{2t}) = 0$, para que os resíduos não sejam correlacionados, é comum e mais realista permitir que eles sejam correlacionados, ou seja, $Cov(u_{1t}, u_{2t}) = \sigma_{12}$.

Além dos testes da hipótese de causalidade entre os retornos das cotações dos créditos de carbono e os retornos dos índices de lucratividade dos mercados selecionados, foram realizados testes da hipótese de cointegração entre os retornos mencionados. Dessa forma, verificamos se é possível inferir que os retornos das cotações dos créditos de carbono compartilham as mesmas propriedades estocásticas no longo prazo com os retornos dos indicadores macroeconômicos selecionados. Dentre os testes da hipótese de cointegração disponíveis na literatura econométrica, dois devem ser citados: [Engle e Granger 1987] e [Johansen e Juselius 1990]. O teste de Engle e Granger, conforme descrito em [Gujarati e Porter 2011], baseia-se em testes de raiz unitária, em particular nos testes de estacionariedade de Dickey e Fuller ou de Dickey e Fuller aumentado para a combinação linear de duas séries de temporais não estacionárias, uma vez que o teste de cointegração sugerido por [Johansen e Juselius 1990] permite verificar a hipótese de cointegração para séries temporais estacionárias, características das séries temporais dos retornos das variáveis envolvidas neste trabalho. Assim, neste trabalho, o teste utilizado para verificar a hipótese de cointegração das séries temporais dos retornos das cotações dos créditos de carbono e os retornos

das variáveis de interesse foi o teste apresentado em [Johansen 1991] e [Johansen e Juselius (1990], dada sua robustez para os dados utilizados. Para um melhor detalhamento do teste de cointegração pode-se recorrer a [Salles e Alves 2025] ou a [Hansen 2022].

O contágio de volatilidade que acontece entre os mercados, em geral, se verifica através da estimação dos modelos de volatilidade condicionais heteroscedásticos. Introduzidos por [Engle 1982], os modelos Autoregressivos Condicionais Heteroscedásticos (ARCH) abordam o problema da estimativa da volatilidade de dados de séries temporais de ativos financeiros, que não são constantes ao longo do tempo. Embora os modelos ARCH tenham melhorado significativamente a modelagem da volatilidade variável no tempo, eles têm limitações, como a necessidade de um grande número de parâmetros para modelar processos de memória longa. Essa limitação levou ao desenvolvimento dos modelos de Heterocedasticidade Condicional Autorregressiva Generalizada (GARCH), ver [Bollerslev e Engle 1986]. Os modelos GARCH estendem a estrutura ARCH incorporando valores defasados tanto da variância condicional quanto dos termos de erro ao quadrado. Um modelo GARCH (p, q) pode ser expresso da seguinte forma:

$$\sigma_t^2 = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{q} \alpha_i \varepsilon_{t-i}^2 + \sum_{j=1}^{p} \beta_j \sigma_{t-j}^2 \quad (3)$$

Onde σ_t^2 é a variância condicional no tempo *t;* α_0 uma constante; α_i são os coeficientes para os termos dos erros; ε_{t-i} são os termos de erro defasados; β_j são os coeficientes para as volatilidades condicionais defasadas. A principal vantagem dos modelos GARCH é sua capacidade de modelar a volatilidade persistente com uma parametrização parcimoniosa. Ao incluir variâncias condicionais defasadas, os modelos GARCH podem representar as dependências de longo prazo na volatilidade, que são frequentemente observadas em dados de séries temporais financeiras. Essa característica torna os modelos GARCH particularmente úteis em aplicações financeiras, onde o agrupamento de volatilidade é proeminente. Além disso, os modelos GARCH podem ser estendidos para incorporar características adicionais, como efeitos assimétricos e distribuições caudas pesadas, aumentando sua flexibilidade e aplicabilidade em diversos contextos, como mostra o excelente glossário elaborado por [Bollerslev 2008].

Dentre os modelos de volatilidade mais amplamente utilizados para a verificação da hipótese de contágio de volatilidade estão, principalmente, os model multivariados da família ARCH. Assim, neste trabalho foram estimados modelos multivariados VECH-GARCH propostos por [Bollerslev et al. 1988]. Este modelo é uma generalização direta do modelo GARCH univariado, onde cada variância e covariância condicional é uma função de todas as variâncias e covariâncias condicionais defasadas bem como da defasagem dos resíduos. O modelo VECH-diagonal apresentado por [Bollerslev et al. 1988] consiste em estimar a equação 10 proposta por [Ding e Engle 2001], como descrita na equação (5), a seguir. Neste trabalho foram estimados os modelos bivariados para o modelo GARCH(1,1) que pode ser representado pela fórmula (6), mostrada adiante. As matrizes de coeficientes podem ser parametrizadas de diferentes maneiras: sem restrições, matrizes indefinidas; com restrições, matrizes de posto completo, para garantir que a matriz de variância-covariância seja positiva semi-definida; e com restrições de matrizes diagonais. Para um maior aprofundamento dessas restrições pode-se ver [Ding e Engle 2001].

$$H_t = C + D \bullet e_{t-1} e_{t-1}' + G \bullet H_{t-1} \quad (5)$$

$$\begin{vmatrix} h_{11,t} \\ h_{21,t} \\ h_{22,t} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} c_{11} \\ c_{21} \\ c_{22} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{vmatrix} \bullet \begin{vmatrix} e_{1,t-1}^2 \\ e_{2,t-1} e_{1,t-1} \\ e_{1,t-1}^2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{vmatrix} \bullet \begin{vmatrix} h_{11,t-1} \\ h_{21,t-1} \\ h_{22,t-1} \end{vmatrix} \quad (6)$$

3. Amostra - Dados Utilizados

Os dados primários utilizados são das cotações semanais de fechamento, em US$, para o período de julho 2012 até setembro de 2023, totalizando 548 observações, das oito variáveis de

interesse: cotações do crédito de carbono do EU ETS, designado adiante por CARB; cotação do Índice de Commodities Global, divulgado pela London Stock Exchange Group, designado aqui por CRY; cotações do Índice de Lucratividade do Mercado Acionário Global -- All Country World, calculado e divulgado pela Morgan Stanley Corporate Investiments (MSCI), designado por ACW; cotações do Índice de Lucratividade do Mercado Europeu de Ações -- MSCI Europe, calculado e divulgado pela MSCI, aqui designado por ACEU; cotações do Índice de Lucratividade do Mercado Ações Norte-Americano -- S&P500, calculado e divulgado pela agência Standard & Poor. Na Tabela 2, estão listadas as variáveis coletadas com seus respectivos códigos de identificação e a fonte de coleta das variáveis.

Tabela 1 – Variáveis Utilizadas - Códigos e Fontes

	Variável Coletadas	Código	Fonte
1.	*Preço do Crédito de Carbono*	**CARB**	Investing.com
2.	*Índice de Commodities Global*	**CRY**	Investing.com
3.	*Índice de Lucratividade do Mercado Global de Ações*	**ACW**	Investing.com
4.	*Índice de Lucratividade do Mercado Europeu de Ações*	**ACEU**	Investing.com
5.	*Índice de Lucratividade do Mercado de Ações Norte-Americano*	**SP500**	Investing.com

Fonte: Elaboração Própria.

A Tabela 3 apresenta um sumário estatístico das séries temporais das variáveis da amostra. Deve-se se observar as limitações da análise da Tabela 3 no que se refere e que as diferenças de ordens de grandeza entre os valores das cotações, principalmente, no que se refere a dispersão ou a variabilidade das variáveis. Dessa maneira, a dispersão deve ser analisada em termos relativos através do coeficiente de variação. No caso da variável CARB tem-se a série temporal das cotações com o maior coeficiente de variação, ou seja com a série temporal das cotações com a maior dispersão entre séries temporais das cotações estudadas apesar de não ter a maior dispersão absoluta, seguindo-se das cotações do índice SP500 e dos indicadores CRY, ACW e ACEu. Todas as séries temporais das cotações possuem assimetria maior do que zero, indicando que a cauda direita da função densidade de probabilidade empírica é maior, com maior concentração de valores acima da média. As cotações das variáveis CARB e a ACEu tem o coeficiente de curtose mais próxima de 3, sendo mais próximas da distribuição normal. Assim, no que se refere a hipótese de normalidade das observações, o teste da hipótese de normalidade sugerido por Jarque e Bera, designado doravante por teste JB, possibilita se verificar se as séries temporais de interesse se ajustam a uma distribuição normal. O teste JB realizado mostra que nenhuma das séries temporais das cotações se ajustam a uma distribuição de probabilidade normal, uma vez que os *p* valores dos testes JB são próximos de zero.

Tabela 2 - Sumário Estatístico das Séries das Cotações e dos Retornos das Variáveis

	Cotações					Retornos				
Estatística	CARB	CRY	ACW	ACEu	SP500	CARB	CRY	ACW	ACEu	SP500
Média	30,00	223,63	502,96	453,08	2781,25	0,004	-0,000	0,001	0,001	0,002
Mediana	12,69	200,70	490,11	453,28	2637,65	0,007	0,000	0,003	0,002	0,004
Máximo	110,40	325,81	757,13	571,04	4766,18	0,233	0,126	0,105	0,092	0,131
Mínimo	3,97	112,75	309,40	323,95	1356,78	-0,418	-0,128	-0,132	-0,228	-0,162
D. Padrão	30,60	52,37	115,46	48,19	947,05	0,072	0,023	0,022	0,026	0,024
Assimetria	1,17	0,26	0,52	0,26	0,48	-0,907	-0,629	-0,842	-1,515	-0,796
Curtose	2,91	1,71	2,21	2,83	2,02	7,407	7,949	9,797	15,399	11,055
Teste JB	124,58	44,38	38,83	6,86	42,98	517,56	594,36	1117,61	3713,06	1536,75
Valor p (JB)	0,000	0,000	0,000	0,032	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Valor p ADF	0,950	0,483	0,747	0,221	0,924	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
No. Obs.	548	548	548	548	548	547	547	547	547	547

Fonte: Elaboração Própria.

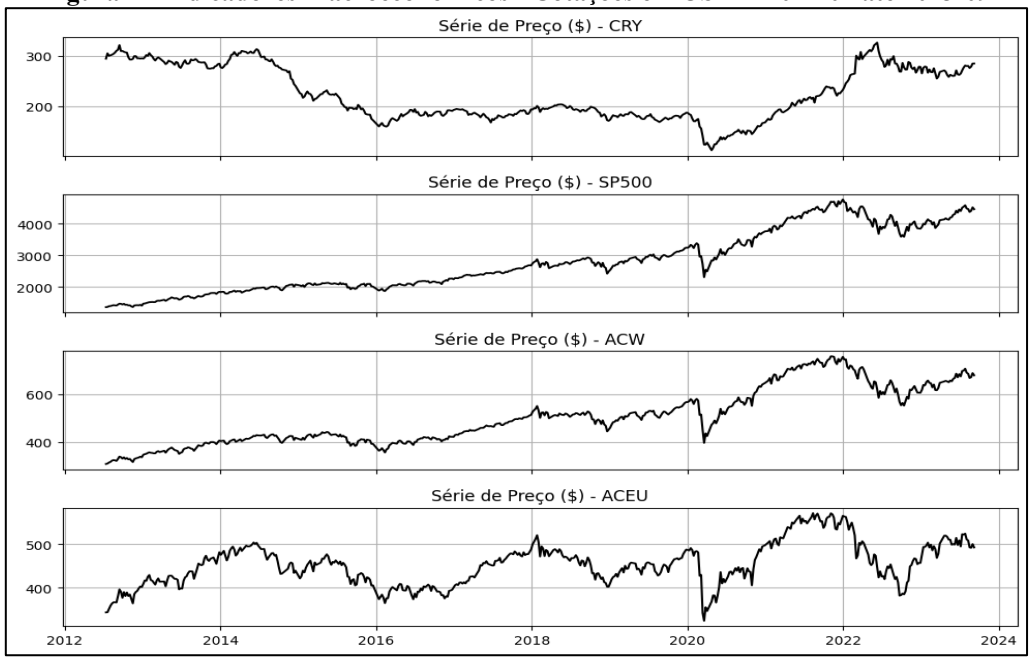
Quanto ao pressuposto de estacionariedade das séries temporais das cotações da variáveis, os testes da hipótese de estacionariedade de Dikey e Fuller aumentado ou testes ADF realizados

apontam para não rejeição da hipótese de não estacionariedade para nenhuma das séries de cotações uma vez que os valores das estatísticas de testes foram altos apresentando valores p muitos distantes de zero.

Figura 1 – Créditos de Carbono – Cotações em USD -- 2012-07 até 2023-09



Figura 2 - Indicadores Macroeconômicos - Cotações em USD -- 2012-07 até 2023-09



A Figura 1 e a Figura 2, mostradas anteriormente, apresentam as representações gráficas das variáveis utilizadas. Pode-se observar que, destarte a brusca queda que ocorre quando da decretação da pandemia de Covid 19, além das cotações dos créditos de carbono os índices de lucratividade dos mercados acionários selecionados ações mostram uma tendência de crescimento no longo prazo. Diferente do comportamento dessas variáveis, o indicador do preço das commodities apresenta um declínio até o período que marca o início da pandemia. Apesar dessa diferença na tendência de longo prazo, observam-se semelhanças no comportamento de todas as variáveis estudadas no período entre março de 2020 e o início de 2022, quando ocorre uma correção simultânea em todos os mercados. Ao final do período estudado, entre janeiro de 2023 e setembro de 2023, também pode-se destacar a associação negativa entre as cotações dos créditos de carbono e as cotações da variável CRY. Em todos os gráficos pode-se verificar o efeito da decretação da pandemia de Covid-19 em março de 2020.

A seguir, na Seção 5 são apresentados e analisados os resultados obtidos com a aplicação da abordagem metodológica deste trabalho aos dados da amostra aqui descrita.

4. Análise dos Resultados Obtidos

Nesta seção são apresentados e comentados os resultados obtidos com a estimação dos modelos estocásticos descritos anteriormente e aplicados neste trabalho. Inicialmente foram obtidos os resultados dos testes estatísticos das hipóteses de causalidade de Granger e de

cointegração entre as séries temporais dos retornos das cotações dos créditos de carbono e dos retornos dos indicadores selecionados. Em seguida, são apresentadas as estimativas dos modelos vetoriais autoregressivos bivariados e as estimativas dos modelos de volatilidade GARCH bivariados que possibilitaram inferências referentes ao contágio de volatilidade entre os retornos das variáveis de interesse.

A verificação da existência de causalidade de Granger, doravante simplesmente causalidade, permitiu se inferir sobre o poder preditivo e ou a influência de uma variável sobre outra. Tendo como hipótese nula a existência de causalidade, foram realizados testes estatísticos para se verificar essa hipótese entre as séries temporais dos retornos das cotações de créditos de carbono e os retornos das cotações das demais variáveis selecionadas, para defasagens de 1 a 12 semanas. Os resultados das estatísticas de testes ou dos testes F estão listados, com seus respectivos p valores na Tabela 3, para os testes de causalidade entre os retornos das variáveis CARB e CRY, e na Tabela 4, para os demais testes de causalidade realizados. Antes de se observar os resultados dos testes de causalidade da Tabela 3, cabe notar que dentre as principais *commodities* negociadas nos mercados internacionais tem-se combustíveis fósseis e as *commodities* alimentares. A Tabela 3 mostra que para as defasagens, ou *lags*, de até 8 semanas os p valores associados as estatísticas de teste permitem se inferir, com um nível de significância abaixo de 10%, que o indicador CRY causa os retornos das cotações dos créditos de carbono, ou seja a variação dos preços das commodities no mercado internacional tem influência direta nas variações nas cotações dos créditos de carbono. O mesmo não se pode inferir para defasagens mais elevadas e para causalidade na direção contrária, ou seja os resultados apontam para não aceitação da hipótese nula da existência de causalidade dos retornos dos créditos de carbono nos retornos do indicador de lucratividade das *commodities* negociadas nos mercados globais, dada pela variável CRY.

Tabela 3. Resultados Testes Hipótese Causalidade Bidirecional Variável CRY

	CRY −› CARB		CARB −› CRY			CRY −› CARB		CARB −› CRY	
lag	*F stat*	*p-value*	*F stat*	*p-value*	*lag*	*F stat*	*F stat*	*F stat*	*p-value*
1	8,323	0,004	0,114	0,736	*7*	1,935	0,062	0,937	0,477
2	4,571	0,011	0,193	0,825	*8*	1,752	0,084	1,018	0,422
3	3,367	0,018	0,443	0,722	*9*	1,590	0,115	0,979	0,456
4	2,661	0,032	0,930	0,446	*10*	1,428	0,164	0,875	0,556
5	2,329	0,042	0,862	0,506	*11*	1,322	0,209	0,836	0,604
6	2,129	0,049	0,697	0,652	*12*	1,317	0,205	0,843	0,606

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4. Resultados Testes Hipótese Causalidade Bidirecional Variáveis – ACW, ACEu e SP500

lag	ACW −› CARB		CARB −› ACW		ACEu −› CARB		CARB −› ACEu		CARB −› SP500		CARB −› SP500	
	F stat	*p-value*	*F stat*	*p-value*	*F stat*	*p-alue*	*F stat*	*p-value*	*F stat*	*F stat*	*F stat*	*p-value*
1	0,008	0,008	0,995	0,319	2,675	0,105	8,055	0,005	0,597	0,440	2,407	0,121
2	0,101	0,101	0,609	0,544	2,555	0,079	3,957	0,020	0,984	0,375	2,003	0,136
3	1,856	1,856	0,434	0,728	3,934	0,009	3,426	0,017	1,8255	0,141	2,159	0,092
4	1,400	1,400	4,746	0,000	2,828	0,024	2,333	0,055	1,275	0,279	1,464	0,212
5	1,127	1,127	3,972	0,001	2,520	0,029	1,880	0,096	1,023	0,403	1,075	0,374
6	1,120	1,120	3,380	0,002	2,264	0,036	1,810	0,095	1,045	0,395	0,911	0,487
7	0,832	0,832	3,763	0,000	2,018	0,051	2,056	0,047	0,870	0,530	1,102	0,361
8	0,704	0,704	3,345	0,001	2,035	0,041	1,780	0,079	0,814	0,591	1,257	0,264
9	0,683	0,683	3,010	0,001	1,940	0,045	1,625	0,105	0,880	0,543	1,201	0,292
10	0,754	0,754	3,088	0,000	1,939	0,038	1,605	0,102	0,807	0,622	1,080	0,376
11	0,788	0,788	3,062	0,000	1,824	0,047	1,443	0,150	0,760	0,680	1,005	0,441
12	0,755	0,755	2,819	0,000	1,653	0,074	1,279	0,227	0,973	0,474	0,917	0,530

Fonte: Elaboração do autor.

A Tabela 4 mostra os resultados dos testes das hipóteses de causalidade da variável CARB e das variáveis relacionadas com o mercado europeu (ACEu) e norte-americano (SP500). No que concerne ao índice de ações global (ACW) pode-se inferir que para defasagem de uma semana existe uma relação de causalidade dos retornos do índice de lucratividade do mercado global de ações, ou seja, no curtíssimo prazo os retornos das cotações dos créditos de carbono são influenciadas pelos retornos do índice ACW. Por outro lado com defasagens maiores de um mês pode-se inferir que os retornos das cotações de créditos de carbono tem influência nos retornos do mercado acionário global. A partir dos resultados dos indicadores de lucratividade dos mercados acionários europeu, dado pela variável ACEu, observa-se uma relação de causalidade bidirecional, talvez pela proximidade dos mercados. Enquanto, no que concerne ao mercado norte-americano de ações não se observa nos resultados dos testes estatísticos de causalidade nenhuma influência ou efeito das variações de cada um das variáveis na outra ou vice-versa. Desses resultados deve-se destacar a rapidez com que os mercados de créditos de carbono e de ações negociadas nos mercados acionários europeus apresentam causalidade no período estudado.

Além da realização dos testes de hipóteses de causalidade foram realizados testes da hipótese de cointegração entre os retornos das cotações de créditos de carbono e os retornos dos indicadores de lucratividade dos mercados de *commodities* e acionários internacionais selecionados: global, europeu e norte-americano. A existência de cointegração pode ser interpretada como uma relação de longo prazo entre séries temporais. A hipótese nula enunciada é a não existência de cointegração. Os resultados podem ser sumarizados com a estatística de teste dado pelo traço da matriz de cointegração. A estatística de teste para a relação de cointegração entre os retornos das variáveis CARB e CRY foi de 6,372. Com isto pode-se inferir que a hipótese nula não pode ser rejeitada. Enquanto os resultados das estatísticas de testes de cointegração entre os retornos das variáveis CARB e os retornos das variáveis ACW, ACEu e SP500 foram, respectivamente, de 18,551, 19,987 e 13,766 o que permite a não aceitação da hipótese nula com um nível de significância de 1% para o caso da variável ACW e ACEu e de 10% para SP500. Em suma, os resultados mostram que no longo prazo os retornos dos créditos de carbono compartilham as mesmas propriedades estocásticas com os retornos dos mercados de ações internacionais selecionados. Por outro lado, o mesmo não ocorre em relação aos mercados internacionais de *commodities*.

A partir dos resultados apresentados, anteriormente, pode-se inferir a existência de relações de curto e longo prazo entre os créditos de carbono e as demais variáveis. Para se estimar relações entre as séries temporais de retornos das cotações dos créditos de carbono e cada uma das séries de retornos estudadas foram estimados modelos VAR ou modelos VAR com mecanismos de correção de erros, designados como modelos VECM.

Tabela 5. Equações dos Modelos VAR e VECM Estimados

	Variável	*Eq.*	*Modelos Estimados*
1.	CRY	*Eq1* *Eq2*	$CARBret_t = \beta_0 + \beta_1\, CARBret_{t-1} + B_2\, CRYret_{t-1}$ $CRYret_t = \beta_3 + \beta_4\, CRYret_{t-1} + B_5\, CARBret_{t-1}$
2.	ACW	*Eq1* *Eq2*	$CARBret_t = \beta_0 + \beta_1\,(CARB_{t-1} - 5.334\, ACW_{t-1} + 30.165) + \beta_2\, CARBret_{t-1} + \beta_3\, ACWret_{t-1}$ $ACWret_t = \beta_4 + \beta_5\,(CARB_{t-1} - 5.334\, ACW_{t-1} + 30.165) + \beta_6\, ACWret_{t-1} + \beta_7\, CARBret_{t-1}$
3.	ACEu	*Eq1* *Eq2*	$CARBret_t = \beta_0 + \beta_1\,(CARB_{t-1} - 25.783\, ACEu_{t-1} + 154.668) + \beta_2\, CARBret_{t-1} + \beta_3\, ACEuret_{t-1}$ $ACEuret_t = \beta_4 + \beta_5\,(CARB_{t-1} - 5.334\, ACEu_{t-1} + 30.165) + \beta_6\, ACEuret_{t-1} + \beta_7\, CARBret_{t-1}$
4.	SP500	*Eq1* *Eq2*	$CARBret_t = \beta_0 + \beta_1\,(CARB_{t-1} - 3.392\, SP500_{t-1} + 23.818) + \beta_2\, CARBret_{t-1} + \beta_3\, SP500ret_{t-1}$ $SP500ret_t = \beta_4 + \beta_5\,(CARB_{t-1} - 3.392\ \ SP500_{t-1} + 23.818) + \beta_6\, SP500ret_{t-1} + \beta_7\, CARBret_{t-1}$

Assim, após a estimação de vários desses modelos envolvendo as variáveis de interesse, selecionou-se quatro modelos tendo a série temporal de retornos da variável CARB e cada série temporal dos retornos das demais variáveis selecionadas, utilizando-se do critério de seleção de modelos de Akaike ou AIC. Na Tabela 5, mostrada anteriormente, estão listados os modelos estimados tendo como variáveis endógenas as séries temporais dos retornos da variável CARB e cada uma das séries temporais dos retornos das quatro variáveis selecionadas: CRY, ACW, ACEu e SP500. Enquanto na Tabela 6 são apresentadas as estimativas dos modelos vetoriais autoregressivos.

No que refere as variáveis endógenas CARB e CRY, dados os valores para a estatística F, pode-se inferir que apenas o CARB pode ser representado pelo modelo. Com a variável endógena, na equação 2, o parâmetro β_2 mostra que os retornos passados do índice de *commodities* influenciam positivamente os retornos futuros dos créditos de carbono. Além disso, pode-se inferir que os retornos futuros do índice de *commodities* não são afetados por choques advindos do mercado de créditos de carbono.

Tabela 6. Resultados das Estimativas dos Modelos Vetoriais Autoregressivos

variável	CRY		ACW		ACEu		SP500	
parâmetro	*estimativa*	*d. padrão*	*estimativa*	*d. padrão*	*estimativa*	*d. padrão*	*estimativa*	*d. padrão*
β_0 (seβ_0)	0,005	(0,003)	0,004	(0,003)	0,004	(0,003)	0,004	(0,003)
β_1(seβ_1)	-0,063	(0,043)	-0,020	(0,006)	-0,003	(0,001)	-0,021	(0,006)
β_2(seβ_2)	0,385	(0,133)	-0,067	(0,044)	-0,074	(0,045)	-0,054	(0,044)
β_3(seβ_3)	-0,000	(0,001)	0,143	(0,144)	0,182	(0,125)	0,068	(0,135)
β_4(seβ_4)	0,044	(0,043)	0,002	(0,001)	0,001	(0,001)	0,003	(0,001)
β_5(seβ_5)	-0,005	(0,014)	0,002	(0,002)	0,002	(0,001)	0,001	(0,002)
β_6(seβ_6)	-	-	-0,011	(0,045)	0,052	(0,044)	-0,094	(0,044)
β_7(seβ_7)	-	-	-0,026	(0,014)	-0,040	(0,016)	-0,022	(0,014)
Metrica Eq1	*Estatistica F = 4,683*		*Estatistica F = 5,120*		*Estatistica F = 2,569*		*Estatistica F = 4,114*	
Metrica Eq2	*Estatistica F = 0,537*		*Estatistica F = 2,204*		*Estatistica F = 6,165*		*Estatistica F = 3,287*	
Metrica	*CRD = 2,70E-06*		*CRD = 2,26E-06*		*CRD = 3,01E-06*		*CRD = 2,61E-06*	

Com respeito ao mercado acionário global, o modelo VECM estimado mostra que a equação 1 estimada apresenta uma estatística F de aproximadamente 5,12, com baixo p valor, enquanto o mesmo não acontece para a equação 2. Assim, os resultados deste modelo devem ter suas inferências vistas com reservas. Da Equação 1, o coeficiente β_1 mostra que aproximadamente 2% do desequilíbrio de curto prazo é corrigido pelos retornos dos créditos de carbono na semana seguinte. O sinal negativo do parâmetro β_1 representa que quando os erros na regressão forem positivos, o retorno futuro dos créditos de carbono será levemente negativo. No curto prazo, devido ao coeficiente β_3 não ser estatisticamente significante, não se pode afirmar se existem efeitos causados pelo índice mundial de ações nos retornos dos créditos de carbono.

Da estimação do modelo VECM, tendo como variáveis endógenas os retornos das variáveis CARB e ACEu pode-se observar que relação aos efeitos de longo prazo, dada a estimativa do parâmetro β_1 na equação 1, mostra que a velocidade de correção de erros é lenta, de apenas 0,26% dos desvios serão corrigidos na semana seguinte. O sinal negativo indica que quando o resíduo da regressão entre as variáveis for positivo, tem-se um impacto negativo nos retornos de créditos de carbono. Enquanto a estimativa do coeficiente β_5 na equação 2 indica uma correção de erros ainda mais lenta, de cerca de 0,15% por semana, mostrando como os resíduos positivos irão impactar positivamente os retornos futuros do ACEu. Em relação aos efeitos de curto prazo entre as variáveis, verifica-se que os retornos passados de créditos de carbono possuem impacto nos retornos futuros do índice de ações. O que não se verifica na direção contrária dada a não

significância estatística da estimativa do parâmetro em questão. Dada a estimativa do parâmetro β_7, que indica o impacto dos créditos de carbono no índice de ações no curto prazo, ter um sinal negativo pode-se inferir que uma variação positiva nos créditos de carbono implica em um impacto negativo no índice de lucratividade do mercado acionário europeu. Pode-se inferir que a intensidade dessa relação é fraca, uma vez que a cada 1% de variação dos créditos de carbono é esperado uma variação de -0,039% do índice de lucratividade do mercado acionário europeu.

Por fim, as estimativas do modelo VECM tendo como variáveis endógenas os retornos das variáveis CARB e SP500 mostra, dada a estimativa do parâmetro β_1, que os efeitos de longo prazo tem uma correção de erros é lenta, apenas 2,08% dos desvios serão corrigidos na semana seguinte e o sinal negativo indica que quando o resíduo da regressão entre as variáveis tem um impacto negativo nos retornos das cotações dos créditos de carbono. A não significância estatística da estimativa do parâmetro β_5 mostra que as variações do índice de ações norte-americano não terá contribuição significativa no longo prazo nas variações das cotações dos créditos de carbono. No curto prazo, não há relação de causalidade entre as variáveis, ou seja, o retorno passado do índice de ações norte-americano não afeta os retornos futuros das cotações dos créditos de carbono.

Dentro de uma mesma classe de ativos as variações são correlacionadas. Dessa forma as estimativas dos modelos de volatilidade bivariados permitem a feitura de inferências relativas ao contágio de volatilidade entre os retornos das variáveis de interesse e entre seus mercados. Dessa maneira, procedeu-se a estimação de quatro modelos de volatilidade bivariados para os retornos da variável CARB e cada uma das variáveis representativas da lucratividade dos mercados de *commodities* e de ações selecionados. Foram estimados modelos VECH Diagonal-GARCH, conforme descrição da abordagem metodológica deste trabalho. As três matrizes do modelo foram parametrizadas como indefinidas e a distribuição de probabilidade considerada foi a normal. O contágio de volatilidade, ou *spillover volatility*, entre os dois mercados é representado pelas estimativas do coeficientes das matrizes *C*, *D* e *G*, descritos anteriormente.

Os resultados das estimativas dos modelos VECH-Diagonal, apresentado anteriormente, estão sumarizados nas medidas resumo listadas na Tabela 7 adiante. Além de indicar a presença ou ausência de contágio de volatilidade entre os mercados analisados, na Tabela 7 são apresentadas as medidas resumo dadas pela média dos coeficientes de correlação dinâmica semanais estimados para o período estudado, a média e os percentis das correlações entre as variáveis de interesse.

A análise dos percentis revela que essas correlações variam significativamente ao longo do tempo. Algumas variáveis, como SP500 e ACW, apresentam uma amplitude maior entre os percentis, indicando que a força de sua relação com a variável CARB é mais volátil e pode mudar consideravelmente em diferentes períodos. Em certos momentos, observam-se correlações mínimas negativas, como no caso de SP500 e ACW, o que sugere que as variações desses indicadores se comportam de forma oposta as variações das cotações dos créditos de carbono em algumas situações, embora a média geral permaneça positiva. A variável ACEu, por sua vez, exibe a correlação mais estável e forte com o CARB, dada a menor dispersão da correlação condicional.

Tabela 3. Correlação e Contágio de Volatilidade – Resumo Resultados

Correlação CARB	*Média*	*5%*	*25%*	*50%*	*75%*	*95%*	*Contágio*
CRY	0.1915	0.0139	0.1412	0.1970	0.2546	0.3427	Sim
ACW	0.2094	-0.0028	0.1349	0.2211	0.2822	0.3941	Sim
ACEu	0.2624	0.1192	0.2250	0.2755	0.3080	0.3596	Sim
SP500	0.1645	-0.0462	0.0945	0.1583	0.2458	0.3988	Sim

Fonte: Elaboração do autor.

Por fim, deve-se destacar que para todos os retornos dos indicadores de lucratividade selecionados apresentam contágio de volatilidade com os retornos das cotações de créditos de carbono, ou seja se observa no período estudado o fenômeno de transbordamento de volatilidade.

5. Comentários Finais

Este trabalho teve como propósito analisar a relação dinâmica entre as cotações dos créditos de carbono e as cotações de indicadores dos mercados internacionais de commodities e de capitais: índice de commodities global; índice de lucratividade do mercado acionário global; índice de lucratividade do mercado acionário europeu; e um índice de lucratividade do mercado acionário norte-americano. Para atingir os objetivos deste trabalho foi implementada uma abordagem metodológica baseada na econometria financeira, incluindo testes de causalidade e de cointegração entre as variações das variáveis de interesse, além da implementação de modelos vetoriais autoregressivos e de modelos de volatilidade bivariados.

Os resultados dos testes de hipótese realizados evidenciaram a existência de relações significativas de curto e longo prazo entre cotações dos créditos de carbono e as cotações de variáveis representativas dos mercados de commodities e de capitais selecionados. No entanto, a relação de causalidade de Granger não se mostrou consistente em todas as variáveis estudadas. A causalidade foi observada no curto prazo, em até 8 semanas, dos retornos do indicador CRY em direção aos retornos dos créditos de carbono. Deve-se destacar a não rejeição da hipótese de causalidade bi-direcional entre os retornos do indicador de lucratividade das ações negociadas no mercado europeu e os retornos dos preços dos créditos de carbono. O mesmo não acontece em relação ao mercado norte-americano. Enquanto os testes da hipótese de cointegração realizados revelaram a existência de uma relação de longo prazo entre as cotações dos créditos de carbono e dos mercados de commodities e de ações selecionados. Assim pode-se inferir que o comportamento dos mercados acionários, e por conseguinte do valor das firmas, têm influência direta das cotações dos créditos de carbono e das políticas de sustentabilidade implementadas no âmbito da economia internacional e das economias nacionais. A volatilidade dos créditos de carbono, como demonstrado pelos modelos GARCH bivariados estimados, depende da volatilidade dos mercados de commodities e de ações, ou seja, existe o efeito de contágio ou de transbordamento entre as volatilidades desses mercados.

Este trabalho contribui para a compreensão das interações do mercado de créditos de carbono e os indicadores macroeconômicos relacionados aos mercados de ativos financeiros. A partir do desenvolvimento desta pesquisa pode-se aprofundar os conhecimentos sobre a efetiva contribuição dos mercados de créditos de carbono, implementados ao redor do planeta, para as políticas de sustentabilidade que visam um controle da variação climática do planeta. Outros trabalhos poderão aprimorar a compreensão das interações entre o mercado de créditos de carbono e variáveis e setores econômicos não considerados aqui de maneira específica. Outras amostras e metodologias econométricas poderão permitir se obter inferências que possam apoiar resultados obtidos ou trazer novos resultados significativos para o esforço científico de se ampliar o conhecimento sobre a relevância do mercado de direitos de emissão de carbono na efetividade da mitigação do problema advindo crescimento desproporcional do aquecimento global.

Referências

Bollerslev, T. e Engle, R. F. (1986). Modelling the persistence of conditional variances. Econometric Reviews, 5(1), 1–50. https://doi.org/10.1080/07474938608800095

Bollerslev, T., (2008) Glossary to ARCH - CREATES Research Paper 2008-49, http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1263250

Bolton, P. e M. Kacperczyk (2021a), Global Pricing of Carbon-Transition Risk, VoxEU.org, 24 March.

Bolton, P. e M. Kacperczyk (2021b). Do Investors Care about Carbon Risk? Journal of Financial Economics 142(2): 517–549.

Ding, Zhuanxin e Engle, R. F. (2001). Large Scale Conditional Covariance Matrix Modeling, Estimation and Testing (May 2001). NYU Working Paper No. S-DRP-01-07, Available at SSRN: https://ssrn.com/abstract=1296437

Engle, R. (1982). Autoregressive Conditional Heteroskedasticity with Estimates of the Variance of United Kingdom Inflation. Econometrica, 50(4), 987-1007. https://doi.org/10.2307/1912773

Engle, R. F., e Granger, C. W. (1987). Co-integration and error correction: representation, estimation, and testing. Econometrica: journal of the Econometric Society, 251-276.

Granger, C. (1969). Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-spectral Methods. Econometrica, 37(3), 424-438. https://doi.org/10.2307/1912791

Gujarati, D., & Porter, D. (2011). Basic Econometrics. 5th Edition. McGraw-Hill, New York.

Hansen, B. (2022). Econometrics. Princeton University Press.

Hengge, M, U. Panizza e R. Verghese (2023). Carbon policies and stock returns: Signals from financial markets. VoxEU.org, 6 June.

Johansen, S., e Juselius, K. (1990). Maximum likelihood estimation and inference on cointegration with applications to the demand for money. Oxford Bulletin of Economics and Statistics, 52(2), 169–210. https://doi.org/10.1111/j.1468-0084.1990.mp52002003

Mo, J-L, L Zhu e Y, Fan (2012). The Impact of the EU ETS on the Corporate Value of European Electricity Corporations. Energy, 45(1), 3-11. https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.037

Oberndorfer, U. (2009). EU Emission Allowances and the Stock Market: Evidence from the Electricity Industry, Ecological Economics, 68(4), 1116-1126. doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.07.026

Oestreich, A. M., e Tsiakas. I. (2015). Carbon emissions and stock returns: Evidence from the EU Emissions Trading Scheme. Journal of Banking & Finance, 58, 294-308. https://doi.org/10.1016/j.jbankfin.2015.05.005

Ramelli, S, A F Wagner, R Zeckhauser e A Ziegler (2018). Stock price rewards to climate saints and sinners: Evidence from Trump's election, VoxEU.org, 29 October.

Salles, A. A., e Alves, D. V. (2025). Performance of the ESG Investments: The Risk and Return Difference in Capital Markets of Developed and Emerging Economies, Revista Mexicana de Economía y Finanzas, 20(3), 1-16, e966. https://doi.org/10.21919/remef.v20i3.966

Sims, C. A. (1980) Macroeconomics and Reality. Econometrica, 48, 1-48. https://doi.org/10.2307/1912017
Stern, N. (2007). The Economics of Climate Change: The Stern Review, 1st Ed., New York, Cambridge University Press.

Tian, Y, A Akimov, E Roca e V Wong (2016). Does the carbon market help or hurt the stock price of electricity companies? further evidence from the EU ETS context. Journal of Cleaner Production, 112, 1619–1626.

Wooldridge, J. M. (2016). Introductory Econometrics: A Modern Approach 6rd ed. Cengage learning.