



GT - MÉTODOS QUANTITATIVOS APLICADOS À ECONOMIA

## **MUDANÇAS ESTRUTURAIS NOS PREÇOS DO PETRÓLEO E A GUERRA NA UCRÂNIA: uma análise de séries temporais**

Joel Carlos Caúla Lima <sup>1</sup>, Vagner dos Santos Torres <sup>2</sup>, Janaina da Silva Alves <sup>3</sup>

### RESUMO

A recente invasão da Ucrânia pela Rússia está no epicentro da explicação para a forte alta nos preços dos títulos de negociação de contratos futuros de petróleo WTI, rompendo as faixas de 60 - 80 dólares por barril, desencadeando forte aumento dos custos energéticos, um consequente aumento de custos de produção e dos próprios produtos e dos serviços em geral. A resistência estabelecida em um patamar um pouco acima dos 85 dólares foi fortemente rompida em 24 de fevereiro de 2022, quando os preços têm um forte disparo, saindo de 90 dólares e indo até a marca de 130 dólares por barril em poucos dias, um aumento de mais de 40% nos preços dos contratos. A instabilidade trazida pelo conflito afetou diretamente a cadeia mundial de suprimentos, agravando um cenário que já não se mostrava favorável há algum tempo. Esse artigo investiga a tendência altista dos preços do petróleo, verificando que houve quebra estrutural na série estudada através dos testes de Chow, Quandt-Andrews e Bai-Perron, todos identificando a data de 27 de fevereiro de 2022 como o ponto de mudança estrutural na série de dados analisada.

**Palavras-chave:** Petróleo. Preços. Guerra. Séries Temporais. Mudanças Estruturais.

### ABSTRACT

The recent invasion of Ukraine by Russia is at the epicenter of the explanation for the sharp rise in prices of trading futures contracts for WTI crude oil, breaking through the range of 60 to 80 dollars per barrel, triggering a significant increase in energy costs, a consequent rise in production costs, as well as the costs of goods and services in general. The resistance established at a level just above 85 dollars was strongly breached on February 24, 2022, when prices experienced a sharp spike, jumping from 90 dollars to the mark of 130 dollars per barrel in a few days, an increase of over 40% in contract prices. The instability brought about by the conflict directly affected the global supply chain, exacerbating a scenario that had already not been favorable for some time. This article investigates the bullish trend of oil prices, verifying that there was a structural break in the studied series through Chow, Quandt-Andrews, and Bai-Perron tests, all identifying the date of February 27, 2022, as the point of structural change in the analyzed data series.

**Keywords:** Oil. Prices. War. Time Series. Structural Changes.

---

<sup>1</sup> Mestrando em Economia na Universidade Federal do Rio Grande do Norte

<sup>2</sup> Mestrando em Economia na Universidade Federal do Rio Grande do Norte

<sup>3</sup> Doutora em Economia. Professora na Universidade Federal do Rio Grande do Norte



## 1 INTRODUÇÃO

O petróleo figura entre os recursos naturais (finitos e, portanto, escassos), mais importantes do mundo e do próprio *way of life* das sociedades modernas. Sua utilização vai desde a produção de alimentos até à própria produção de outras *commodities*, desde o transporte de pessoas e mercadorias à fabricação de medicamentos, fertilizantes, plásticos, cosméticos e uma infinidade de outros produtos. Desde o início de sua produção comercial em Baku, no Azerbaijão, em 1846, o petróleo é alvo de inúmeros conflitos, e seu jorrar<sup>4</sup> em um país ou região pode representar tanto prosperidade econômica como ser fonte de intensas disputas por poder e riquezas, ou seja, profundas desigualdades entre aqueles que detêm o acesso aos recursos em relação àqueles sem tais condições (LIMA, 2021).

Segundo dados do BP (2021) e do GEM (2023), no cenário mundial pós-Covid-19, a utilização do petróleo tem representado cerca de 30% da sua matriz energética (um volume por volta de 100 milhões de barris são consumidos diariamente, sendo processados por cerca de 700 refinarias e transportados por mais de 13.150 *oil carriers* e também através de 782 oleodutos, cujo comprimento combinado é de mais de 290 mil km), estimado para durar aproximadamente 50 anos, aos níveis atuais de consumo e considerando as recentes reservas provadas e os níveis de produção e aproveitamento. Assim, o elevado nível de dependência das cadeias mundiais de suprimento por petróleo e seus derivados despande redobrados esforços dos mais variados agentes, desde analistas de mercado até gestores de *hedge funds*, passando pelas grandes corporações e pelos governos em geral, em atenção aos preços internacionais praticados, face às diversas implicações decorrentes de sua oscilação.

A recente invasão da Ucrânia pela Rússia está no epicentro da explicação para a perda dos limites estimados por Lima (2021) para os preços dos títulos de negociação de contratos futuros de petróleo WTI, entre as faixas de 60 - 80 dólares por barril de óleo equivalente (na esteira da pressão inflacionária deflagrada pela colossal expansão

---

<sup>4</sup> Dados mundiais de petróleo podem conter informações sobre petróleo bruto, óleo de xisto, areias betuminosas, condensados (condensados de arrendamento ou condensados de gás que requerem maior refino) e NGLs (líquidos de gás natural – etanol, GLP e nafta separados da produção de gás natural). Excluem combustíveis líquidos de outras fontes, como biocombustíveis e derivados sintéticos de carvão e gás natural, fatores de ajuste de combustível líquido, como ganho de processamento de refinaria e xisto betuminoso/querogênio extraído na forma sólida.



monetária provocada pelo FED na tentativa de conter os efeitos da pandemia), desencadeando forte aumento dos custos energéticos, e o conseqüente aumento de custos de produção, dos produtos e dos serviços em geral. De fato, o aumento dos preços do petróleo tende a contribuir para a valorização das empresas do setor, porém acrescenta pressão adicional à inflação e produção mundial.

Na Europa, os preços do gás natural já haviam subido em torno de 400% desde o início de 2021. O presidente da Rússia, Vladimir Putin, afirmava que o país estava preparado para ajudar a estabilizar o mercado mundial de energia<sup>5</sup>, sendo um dos principais fornecedores de gás natural para a Europa e Ásia. A resistência estabelecida em um patamar um pouco acima dos 85 dólares foi fortemente rompida em 24 de fevereiro de 2022, quando então, os preços têm um forte disparo, saindo de 90 dólares e indo até a marca de 130 dólares por barril em poucos dias, um aumento de mais de 40%. A instabilidade trazida pelo conflito afetou diretamente a cadeia mundial de suprimentos, agravando um cenário geoeconômico já desgastado. A invasão Russa buscava mais do que apenas anexar territórios: a soberania energética estava novamente no epicentro da disputa mundial por poder e influência.

Assim, a série escolhida inicia-se em dezembro de 2021, sob os rumores de invasão e escalada armamentista, estendendo-se até junho de 2022, quando os efeitos iniciais da guerra sobre os preços já estavam sedimentados. Esse trabalho de pesquisa referencial e bibliográfica com análise de dados tem por objetivo principal compreender se houve quebra estrutural na série de dados dos preços dos contratos futuros de petróleo WTI no período selecionado e, como objetivos específicos, contribuir na discussão sobre a construção de modelos preditivos para contratos futuros de petróleo, possibilitando inferir sobre a relevância de determinados eventos históricos e na análise sobre seus efeitos em relação a certas variáveis econômicas.

O trabalho conta, além dessa introdução, com a primeira seção apresentando a revisão da literatura, dividida entre a primeira parte com o andamento da pesquisa acerca da construção de testes e a segunda parte com aplicações dos testes a séries de petróleo.

---

<sup>5</sup> Óleo e Gás estão agrupados na produção e na comercialização, e os poços perfurados podem fornecer ambos os elementos. Convertendo m<sup>3</sup> em boe, cerca de 60 milhões de barris de óleo equivalente de gás são consumidos diariamente, representando pouco mais de 20% da matriz energética mundial, transportados por mais de 1050 navios gaseiros (GLP e GNL) e através de 1600 gasodutos, que totalizam 957 mil km de tubulações ao redor do mundo.



Já a segunda seção vem expor a metodologia utilizada nessa pesquisa, com a descrição do método econométrico, contando ainda com a terceira seção, onde são apresentados o resultado e as hipóteses analisadas e, por último, a quarta seção apresenta as conclusões do trabalho.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA SOBRE MUDANÇAS ESTRUTURAIS

---

### 2.1 Testes de Quebras Estruturais

Entre os primeiros estudos a utilizar testes para estimar quebra estrutural em modelos econométricos está o de Chow (1960), que testou a mudança de nível a partir de uma data pré-estabelecida e utilizando uma estatística F do teste Wald, tornando-se referência sobre o tema. Em seguida, Quandt (1960) modificou a estrutura de Chow ao considerar a estatística F de maior valor, o teste SupF. Já no trabalho de Fisher (1970), foi aplicado o teste de Chow para uma série de dados não tão grande para se estimar regressões separadas, o teste de Chow preditivo, que estende o modelo restrito para um pequeno subperíodo (COSTA, 2016).

Assim, Banerjee, Lumsdaine e Stock (1992) investigaram a possibilidade de as séries temporais serem caracterizadas como estacionárias em torno do ponto exato da mudança estrutural, tratando a data da quebra, *a priori*, como não conhecida, tema também abordado por Chu e White (1992). Uma extensão no estudo das séries que sofrem quebras nas médias foi realizada por Perron e Vogelsang (1992) posteriormente.

Avanços para um teste de quebra estrutural com possível datação foram apresentados por Hansen (1991, 1992), que compara a distribuição de grandes amostras usando o teste LM de Nyblom para a determinação da instabilidade dos parâmetros, especificando corretamente os problemas da verossimilhança, contra várias alternativas de interesse no contexto de cointegração dos modelos de regressão, notando que a distribuição assintótica depende da natureza do processo de regressão; isto é, dos regressores serem de tendência determinística ou estocástica, aprimorado por Gregory e Hansen (1996), e muito utilizado. Já o aprimoramento do teste de Quandt, foi efetuado por Andrews (1993), com testes para a instabilidade dos parâmetros e quebra estrutural em um ponto desconhecido, cujo resultados são empregados em ampla classe de modelos de parâmetros apropriados para estimação, via método dos



momentos generalizados (GMM), aplicável tanto para pontos de quebra conhecidos, quanto totalmente desconhecidos, complementado por Zivot e Andrews (1992) e Andrews e Ploberger (1994) em seus artigos.

Bai (1994), buscava localizar um ponto de deslocamento desconhecido em um processo linear, estimando-o pelo método dos mínimos quadrados, sendo posteriormente, estendido a múltiplos pontos de quebra estrutural por Bai e Perron (1998), introduzindo os estimadores por mínimos quadrados (LS) da localização de um único ponto de mudança na média de um processo linear sob algumas hipóteses de regularidade, adindo uma nova classe de testes de quebra estrutural. Além disso, nesse período, destacam-se também os trabalhos de Yao (1988), Banerjee, Lumsdaine e Stock (1992), Garcia e Perron (1996), Lumsdaine e Papell (1997), Clemente, Montañés e Reyes (1998) e Pesaran e Timmermann (1999). Uma sistematização da pesquisa até aquele momento pode ser encontrada em Perron et al. (2006). A tabela 1 apresenta os principais testes de quebra estrutural até ali desenvolvidos.

**Tabela 1 – Testes de quebra estrutural pré-anos 2000.**

Ano	Teste	Autor(es)	Aplicação
1960	Chow	Chow	Quebra única em data pré-estabelecida
1960	QLR	Quandt	Testa os potenciais pontos de quebra
1975	CUSUM	Brown, Durbin e Evans	Soma cumulativa dos resíduos em bandas
1975	CUSUMSQ	Brown, Durbin e Evans	Soma cumulativa ao quadrado dos resíduos
1983	NM	Nyblom e Mäkeläinen	Testar constância dos hiperparâmetros
1990	Perron	Perron	Relação entre raiz unitária e quebra estrutural
1992	Zivot-Andrews	Zivot e Andrews	Endogeneidade do ponto de quebra
1992	CUSUM-OLS	Ploberger e Krämer	Soma cumulativa dos resíduos de MQO
1992	Hansen	Hansen	Estabilidade do parâmetro de estimação
1993	Andrews	Andrews	Quebra em ponto desconhecido por GMM
1994	Quandt-Andrews	Andrews e Ploberger	Quebra estrutural em ponto desconhecido
1994	Bai	Bai	Estimar mínimos quadrados das quebras
1997	Lumsdaine-Papell	Lumsdaine e Papell	Teste para duas quebras estruturais
1998	Bai-Perron	Bai e Perron	Estimar múltiplas quebras sequencialmente

**Fonte:** Elaboração própria com base em Perron et al. (2006)



Pode-se perceber através do resumo, parte do desenvolvimento da pesquisa sobre quebras estruturais, partindo desde a busca por estimar uma única quebra em data conhecida, passando pela tentativa de encontrar a provável data de quebra até culminar em um teste capaz de identificar múltiplas quebras no nível das séries temporais ao final dos anos 1990.

No presente século, destacam-se os trabalhos de Mehl (2000), Buseti e Harvey (2001), e os de Koopman et al. (2000) e Durbin e Koopman (2001), que implementaram um *software* para tratar os modelos com parâmetros que variam no tempo na formulação em espaços de estados. Já Juhl e Xiao (2009) sugerem a utilização de métodos não-paramétricos ou amostragem local em que a média é estimada utilizando dados em uma vizinhança. Também destacam-se os trabalhos de Leybourne, Kim e Taylor (2007), Perron e Yabu (2009), Harris et al. (2009), Harvey, Leybourne e Taylor (2009) e Narayan e Popp (2010).

## 2.2 Quebras Estruturais em Séries de Petróleo

As séries de preços de petróleo e suas possíveis implicações são de grande interesse para muitos econométricos, e diversos trabalhos têm sido publicados nesse sentido. Entre eles, destacam-se algumas pesquisas mais recentes relacionadas a seguir.

Em Zeileis et al. (2003), verificam-se múltiplas mudanças estruturais em regressões lineares, com mudanças detectadas estatisticamente na média de uma série temporal e nos coeficientes de uma regressão linear coincidindo com dados históricos, políticos ou eventos econômicos que possam ter causado tais quebras. Já Narayan e Narayan (2007), nas várias subamostras de seu estudo sobre a volatilidade dos preços do petróleo, encontraram evidências inconsistentes de assimetria e persistência de choques, com efeitos permanentes e assimétricos na volatilidade, implicando que o comportamento dos preços do petróleo tende a mudar em curtos períodos.

O estudo de Maslyuk e Smyth (2009) revelou cointegração nos preços *spot* e futuro do petróleo WTI e Brent, enquanto Lee, Hu e Chiou (2010) investigam a existência dos fenômenos conjuntos de componentes permanentes e transitórios em variância



condicional e intensidade de salto e a verificação de quebras estruturais em preços de contratos futuros e *spot* de petróleo WTI. Já Fan e Xu (2011) analisaram os fundamentos do preço do petróleo e a transformação do mecanismo de mercado via mudança estrutural, por meio de testes de quebra endogenamente determinados que permitem mudanças tanto no nível quanto na tendência, dividindo as flutuações de preços no período selecionado (2000 - 2009) em três estágios: "relativamente calmo", "acumulação de bolhas" e "crise econômica mundial".

De acordo com Salisu e Fasanya (2013) os dois testes recém-desenvolvidos por Narayan e Popp (2010) e Liu e Narayan (2010) permitem duas quebras estruturais na série de dados e o último método foi modificado para incluir modelos de volatilidade simétricos e assimétricos, identificando duas rupturas estruturais ocorridas em 1990 e 2008, correspondentes ao conflito Iraque/Kuwait e à crise financeira mundial, encontrando evidências de efeitos de persistência e alavancagem na volatilidade do preço do petróleo.

Então, Narayan et al. (2014) testaram se o preço do petróleo prediz crescimento econômico para 28 países desenvolvidos e 17 países em desenvolvimento, com testes de previsibilidade que respondem pelas principais características dos dados, ou seja, persistência, endogeneidade e heterocedasticidade, evidenciando maior poder de previsibilidade para países desenvolvidos, mais eficaz em preços de petróleo nominais que em preços reais.

Além disso, Sun e Shi (2015), examinaram a tendência em séries de preços de energia utilizando o teste de Perron e Yabu (2009) para quebra única na função de tendência de cada série, sem conhecimento prévio se o componente de ruído era estacionário ou se possuía uma raiz unitária autorregressiva. Estimada a quebra, realizaram o teste de raiz unitária de Kim e Perron (2009) examinando a estacionariedade dos preços e estendendo a análise *one-break* para o caso com múltiplas quebras com o teste proposto por Kejriwal e Perron (2010) e o teste de raiz unitária de Carrion-i-Silvestre, Kim e Perron (2009), e sugeriram que os preços de energia são persistentemente influenciados por fundamentos econômicos de longo prazo, em vez de mudanças temporais de política. Já para Chen, Huang e Yi (2015), como nos últimos anos o WTI estava descolado do Brent, tal divergência havia aumentado significativamente o *spread* entre os preços, e assim, investigaram se



houve mudança estrutural na persistência da diferença e a mudança de uma série temporal estacionária para não-estacionária utilizando o teste CUSUM, para *breakpoint* não pré-especificado, estimando o ponto de quebra em 2010.

A pesquisa de Wen, Gong e Cai (2016), introduziu dezesseis modelos de volatilidade do tipo HAR com quebras estruturais, aplicando dados de transação de alta frequência de 5 minutos para futuros de petróleo WTI, encontrando significativa volatilidade dos contratos, utilizando funções de perda para avaliar o desempenho de previsão desses modelos com o método PROMETHEE II, indicando que dos novos modelos do tipo HAR, o novo modelo HAR-RSV apresenta melhor desempenho na previsão das volatilidades de 1 dia e 1 mês, enquanto o novo HAR-CJ prevê melhor a volatilidade de 1 semana.

Também para Albuquerque et al. (2018), a drástica redução do preço do petróleo a partir de 2014 reacendeu suas características estocásticas de não se acomodar em torno de uma média, com alta volatilidade inesperada, criando todo um ramo da literatura empírica dedicado ao estudo de quebras estruturais em dados longitudinais do preço do petróleo, seu tratamento e previsão. Já Ji, Liu e Fan (2019) analisaram a dinâmica entre o petróleo e as taxas de câmbio dos Estados Unidos e da China, via mudanças estruturais de dependência, utilizando seis modelos de cópula variantes no tempo (CoVaRs), indicando existir um ponto de ruptura estrutural de dependência entre WTI, DXY e CNY, mostrando haver transbordamento de risco do petróleo para os mercados cambiais chinês e norte-americano.

Conforme Wang e Hao (2022), a instabilidade dos parâmetros devido a possíveis quebras estruturais é um problema importante que afeta o desempenho de previsão de modelos econométricos. Seu artigo usa quatro tipos de métodos para lidar com a instabilidade de parâmetros, com os parâmetros sendo determinados por meio de *machine learning* de validação cruzada e combinação de previsão, melhorando-a consideravelmente.

Recentemente, Zhang e Zhang (2023) investigaram mudanças estruturais suaves e acentuadas na volatilidade dos contratos futuros de petróleo, destacando a forma flexível de Fourier (FFF) e o algoritmo ICSS modificado para detectá-los, a fim de explorar os diferentes modelos HAR baseados em mudanças estruturais exibem significativamente melhor desempenho para a previsão do que os modelos





tradicionais. Assim, variadas técnicas são empregadas para detectar estacionariedade e mudanças estruturais em séries temporais, com recursos computacionais cada vez mais sofisticados, tendo os testes sido bastante aprimorados desde que estabelecidos por Chow (1960) e Quandt (1960). Na próxima seção serão apresentados os dados e a descrição dos métodos escolhidos para analisá-los.

### 3 METODOLOGIA

---

Como visto na seção anterior, os estudos das quebras estruturais em séries temporais expõem uma ou mais mudanças nos parâmetros e no nível da série, e na sua dispersão e/ou inclinação, que podem ser momentâneas ou permanentes. Como referido, a série de dados escolhida têm frequência diária pelo preço ajustado de fechamento dos contratos futuros de petróleo WTI cotados em dólares americanos (US\$), e totalizam 182 observações diárias tabuladas no *software* RStudio. A utilização do *benchmark*<sup>6</sup> de uma *commodity* se justifica pela universalidade de sua negociação, dadas as suas características de grande importância mundial e por se tratar de produtos de origem primária com alto nível de comercialização e pouca industrialização, com qualidade e traços uniformes de produção e sem diferenciação de marca. Além disso, no caso do petróleo, dada a sua importância estratégica, político-militar e econômico-financeira, evidências indicam que a relação causal se dá de maneira inversa, onde os preços futuros é que determinam os preços correntes e não o contrário.

Séries temporais são conjuntos de medidas de uma mesma grandeza, relativas a vários períodos consecutivos, ordenadas no tempo e com dependência serial, com modelos utilizados para descrevê-las via processos estocásticos, ou seja, controlados por leis probabilísticas, cuja construção depende de vários fatores, tais como o comportamento do fenômeno, ou o conhecimento *a priori* que se tenha de sua natureza e do objetivo da análise. Aí, um conceito fundamental é o de estacionariedade, descrito

---

<sup>6</sup> Em Finanças, um *benchmark* é um indicador utilizado para medir o desempenho relativo de uma aplicação via mecanismo de preços, valor de referência ou cotação do ativo. O termo inglês significa "marca de referência". Largamente utilizado por bancos e fundos de investimentos, um *benchmark* também pode ser um índice que sirva para comparar dois ativos, seja para que um investidor possa comparar diferentes aplicações e avaliar a performance de seus investimentos, ou seja para identificar os riscos de um investimento qualquer, além de ser uma ferramenta com a qual o investidor pode comparar e avaliar não só o desempenho atual de uma aplicação, mas também o seu histórico.

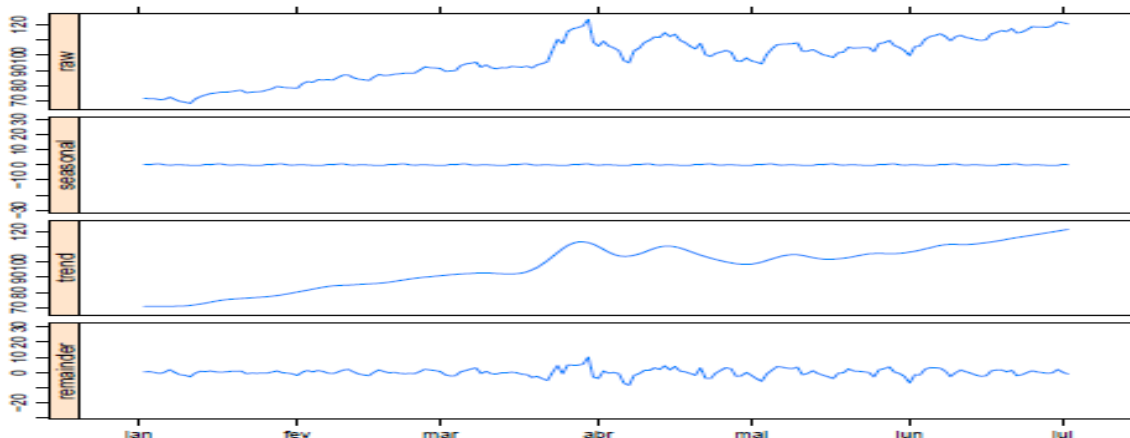


como o comportamento aleatório de uma variável ao longo do tempo em torno de uma média constante (DIAS; CASTRO JR, 2003).

Segundo Enders (2008), uma série é considerada fracamente estacionária quando sua média, variância e autocovariâncias são bem definidas e independentes do tempo. Para testar se uma série é estacionária, em geral são realizados testes de raiz unitária como o teste ADF de Dickey e Fuller (1979), o teste de Zivot e Andrews (1992), o teste PP de Phillips e Perron (1988) e o teste KPSS de Kwiatkowski et al. (1992). Todavia testes de raiz unitária têm baixa capacidade quando aplicados a séries temporais com quebra estrutural, requerendo testes apropriados e técnicas mais adequadas como a cointegração, via Gregory e Hansen (1996).

Na análise de séries temporais, decompõe-se a série original quatro componentes: tendência, variações cíclicas, variações sazonais e um componente aleatório. A tendência apresenta a direção de aumento ou redução de longo prazo associado aos dados, já os ciclos são mudanças de curto prazo, geralmente um ano ou pouco mais, a sazonalidade reflete a influência de um determinado fator externo, que ocorra sempre no mesmo período, enquanto o termo de erro exhibe comportamentos aleatórios, gerados por choques sobre a série. (PALAIA; HOLLAND, 2010; BLACK, 2016; SHIKIDA; PAIVA; JUNIOR, 2016). A figura 1 apresenta a decomposição da série escolhida.

**Figura 1** – Decomposição da série temporal WTI (dez/21 a jun/22).



Fonte: Elaboração própria

A decomposição da série mostra que houve uma maior perturbação nos dados entre março e maio de 2022, com pouca influência de componentes cíclicos ou



sazonais. Uma das formas de testar se houve quebra estrutural é conhecendo previamente a data da mudança, e, caso isso não seja possível, recorre-se aos testes de identificação referidos a seguir, os quais avaliam a estabilidade dos parâmetros do modelo ao longo do tempo. Nesse estudo são utilizados três testes mais comuns, o teste de Chow, o teste Quandt-Andrews e o teste Bai-Perron. No primeiro teste, é necessário informar a data da quebra a ser testada, enquanto nos demais eles são avaliados de forma endógena (OLIVEIRA; CUNHA, 2017).

### 3.1 Teste de Chow

Segundo Enders (2008), esse teste simples e de difícil solução prática verifica a estabilidade dos parâmetros a partir da divisão da amostra em duas partes, com base em uma data específica, informada de forma exógena pelo analista, requerendo testar várias datas e formatos para ter certeza de onde veio a instabilidade e em que parâmetro. Para cada sub-amostra, o modelo é novamente estimado. O teste compara a soma dos quadrados dos resíduos das regressões feitas a partir das sub-amostras com a SQR do modelo original. A equação a seguir mostra a estatística de teste:

$$F = \frac{[SQR - (SQR_1 + SQR_2)] [n - 2(k - 1)]}{SQR_1 + SQR_2} \frac{k + 1}{k + 1}$$

Onde SQR, SQR<sub>1</sub> e SQR<sub>2</sub>, representam a soma dos quadrados dos resíduos do modelo original, da primeira e da segunda sub-amostras, respectivamente. O tamanho da amostra é representado por  $n$  e o número de parâmetros do modelo por  $k$ . Caso haja uma diferença significativa, a hipótese nula ( $H_0$ ) de que o valor dos parâmetros é igual nos dois períodos é rejeitada. Logo, pode-se concluir que houve uma mudança estrutural na correlação entre as variáveis do modelo (OLIVEIRA; CUNHA, 2017).

### 3.2 Teste Quandt-Andrews

Ainda segundo Enders (2008), esse teste verifica a presença de uma ou mais quebras estruturais desconhecidas, não sendo necessário informar de forma exógena a data de quebra a ser testada, pois ele identifica as quebras estruturais a partir da geração de diversos testes de Chow ao longo da série, mas apenas pré-especificar o tamanho mínimo de cada sub-amostra através do parâmetro de fracionamento, de



onde calculam-se as estatísticas de teste, que juntas formam uma distribuição na qual as conclusões sobre as quebras estruturais são tomadas.

Segundo Hansen (1996) e Perron et al. (2006), na família de testes apresentados por Andrews (1993), e deles derivados, existem múltiplas maneiras de escolher a quantidade e a(s) data(s) de quebra(s) a serem selecionadas:

- Teste do Valor Máximo:  $SupF = Sup (F_t)$
- Teste Exponencial:  $ExpF_n = \ln \int \exp (F_t/2) dw(t)$
- Teste Average:  $AveF_n = \int_t F_t dw(t)$

Os testes relacionados verificam a existência de uma ou mais quebras estruturais desconhecidas na série analisada. Ao não informar de forma exógena a data de quebra a ser testada, seu resultado identifica os pontos de quebras estruturais a partir da geração de diversos testes de Chow ao longo da série temporal. Caso o resultado do teste não seja satisfatório, a hipótese nula ( $H_0$ ) indicará ausência de mudança estrutural, ou seja, estabilidade estrutural.

### 3.3 Teste de Bai-Perron

O teste de Bai e Perron (1998), é um aprimoramento do teste de Chow e do teste Quandt-Andrews, sendo um procedimento que pode identificar várias quebras estruturais  $l$  ao longo do tempo na regressão testada. Uma das diferenças desse teste em relação aos anteriores se dá na escolha entre as hipóteses nula ( $H_0$ ) e alternativa ( $H_1$ ). Nesse teste, a ( $H_0 = l$ ) pode indicar  $l$  quebras estruturais versus a ( $H_1 = l + 1$ ) de haver mais quebras. Assim, pode-se testar sequencialmente as quebras estruturais até um número máximo pré-especificado.

Outra forma de estabelecer hipóteses para esse teste pode ser: se o teste de Bai-Perron não encontrar mudanças estruturais significativas na série temporal, ele irá retornar um resultado que não é estatisticamente significativo, indicando que não há evidências para rejeitar a hipótese nula ( $H_0$ ) de que não há mudanças estruturais. Isso significa que o teste não encontrou evidências suficientes para afirmar que há mudanças estruturais na série. Por outro lado, se o teste de Bai-Perron encontrar mudanças estruturais significativas na série temporal, ele irá retornar um resultado



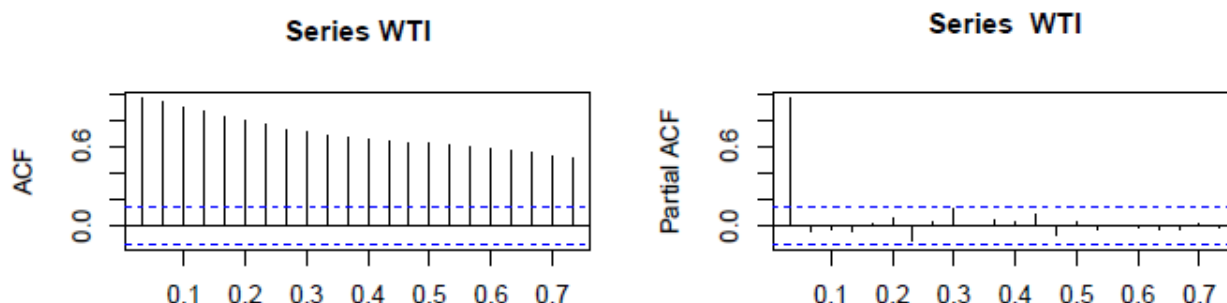
estatisticamente significativo, indicando que há pelo menos uma mudança estrutural na série, hipótese alternativa ( $H_1$ ).

Assim como no teste de Quandt-Andrews, esse teste também é realizado de forma endógena. Para tanto, pode-se pré-especificar o tamanho mínimo de cada sub-amostra através do parâmetro de fracionamento da amostra. Há diversas variações desse teste, que possibilitam encontrar múltiplas quebras nos coeficientes testados, sendo possível também especificar previamente o número máximo de quebras (OLIVEIRA; CUNHA, 2017).

## 4 RESULTADOS

Para a realização dos testes de quebra estrutural, alguns passos seguindo a metodologia Box-Jenkins foram tomados além da visualização do gráfico, como o uso do correlograma e os testes de raiz unitária, para determinar estacionariedade da série analisada.

Figura 2 – Correlograma da série temporal (dez/21 a jun/22)



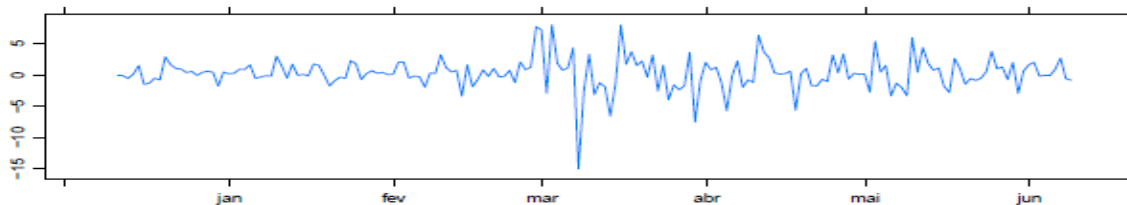
Fonte: Elaboração própria

Observando a figura 2, fica fácil perceber como as autocorrelações são altas, próximas de 1 nas primeiras defasagens, e decaem lentamente, essa é uma característica típica de séries não-estacionárias (com *random walk*). Portanto, para a série em nível, observa-se que não se pode rejeitar a hipótese nula de existência de uma raiz unitária. A FAC dos resíduos da equação do teste evidencia que ele foi bem especificado, pois a autocorrelação não é significativa até a décima primeira defasagem. A figura 3 apresenta a diferenciação da série.



]

**Figura 3** – Diferenciação da série temporal (dez/21 a jun/22)



**Fonte:** Elaboração própria.

A partir da figura 3, torna-se mais possível identificar um padrão constante de comportamento ao longo do tempo. Se comparado com um processo de ruído branco, é possível perceber características semelhantes, indicando se tratar de uma série estacionária. Recorre-se então ao teste de raiz unitária, nesse caso ADF e PP, cujos resultados apontam que a série estudada se torna estacionária após a segunda diferenciação. Conforme Enders (2008), na presença de raiz unitária, o procedimento adequado é diferenciar a série tantas vezes quantas for necessário até estacionarizá-la, até que finalmente se possam fazer os testes de quebra estrutural. A maior parte das séries não-estacionárias são estacionarizadas na primeira ou segunda diferenciação. A tabela 2 apresenta os resultados dos testes de quebra aplicados.

**Tabela 2** – Testes de quebra estrutural na série WTI (dez/21 a jun/22)

Teste	Datas da Quebra Estrutural					Estatística	p-Valor
Chow			27/fev			F = 474,3	0.000*
Quandt-Andrews			27/fev			SupF = 494,88	0.000*
Bai-Perron	10/jan	01/fev	27/fev	26/mar	11/mai	-	-

Para todos os testes,  $\alpha = 0,01$ . (\*) = Estatisticamente significativa a 1%

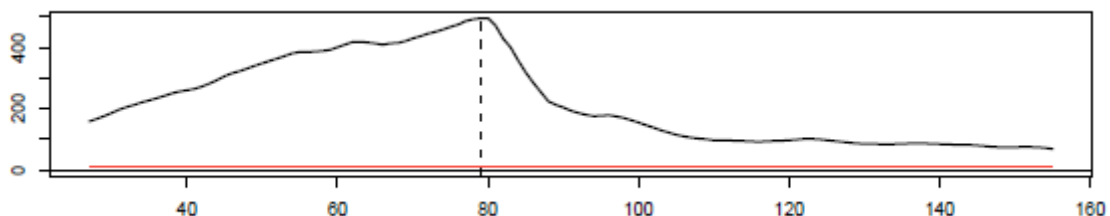
**Fonte:** Elaboração própria.

Para o teste de Chow, várias datas de quebra foram analisadas, partindo-se da hipótese inicial dessa pesquisa de que a partir de 24 de fevereiro a série poderia ter sofrido mudança estrutural e, assim, para o resultado exposto na tabela 3 foi considerada a melhor amostra encontrada dentro do intervalo de datas de quebra testadas, e comparados os resultados com os outros testes, optou-se pela quebra



identificada pelo resultado do dia 27 de fevereiro. A figura 4 apresenta o resultado do teste SupF de Quandt-Andrews.

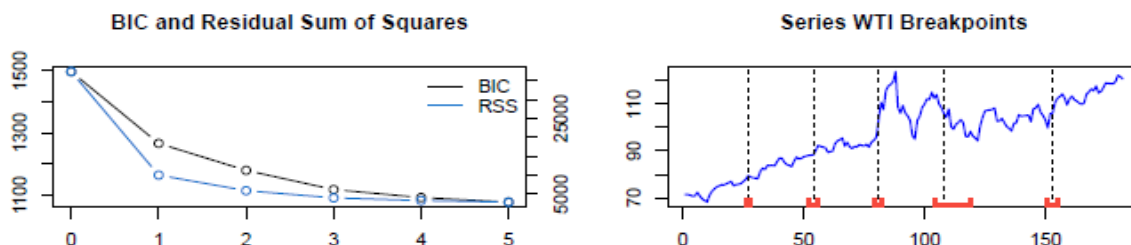
**Figura 4** – Teste SupF da série temporal (dez/21 a jun/22)



Fonte: Elaboração própria.

O teste de Quandt-Andrews apresentou um resultado específico, o máximo valor da estatística F, identificado na figura 4 pela linha pontilhada. Para o teste de Bai-Perron, o resultado apresentado é significativo para a presença de múltiplas quebras estruturais na série, no caso, 5 quebras estruturais foram encontradas na série em questão. Os resultados são apresentados na figura 5 a seguir.

**Figura 5** – Teste de múltiplas quebras da série temporal (dez/21 a jun/22)



Fonte: Elaboração própria

Em geral a realização dos testes de quebra estrutural em séries estruturais expõe uma ou mais mudanças nos parâmetros e no nível da série, bem como na sua dispersão e/ou inclinação, que podem ser momentâneas ou permanentes. Nesse estudo todos os testes realizados se mostraram relativamente eficientes em indicar a data de 27 de fevereiro de 2022 como ponto de mudança na série de preços analisada.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho de pesquisa referencial e bibliográfica com análise de dados procurou fazer um breve estudo sobre as quebras estruturais em séries de preços, especificamente em um recorte na série de dados dos preços dos contratos futuros de



petróleo WTI, face às suas incontáveis implicações para a economia mundial. A pesquisa partiu de uma revisão da literatura sobre mudanças de tendência em séries desde que foram testadas nos idos de 1960 por Chow até pesquisas mais recentes. Ao longo desse tempo, muitos trabalhos foram publicados no sentido de aprimorar os testes e de oferecer melhores explicações para o comportamento dos dados e suas relações com os fenômenos econômicos adjacentes.

A partir dos anos 1990, o desenvolvimento computacional otimizou os processos de análise, e a robustez dos testes aliada ao desenvolvimento de novas técnicas melhorou os métodos de previsão. Não obstante, sinais do mundo real se entrelaçaram aos do mundo financeiro e, eventos como a Guerra do Yom Kippur (1973), a Revolução Iraniana (1979), a Guerra do Golfo (1990), a Guerra do Iraque (2003), a Crise Financeira de 2008, a Crise do Covid-19, e agora a Guerra da Ucrânia e os consequentes choques do petróleo de cada uma delas decorrentes, fizeram disparar os preços mundiais do precioso ouro negro.

Além da revisão de literatura sobre a técnica e sobre sua aplicação prática em diversas séries temporais feitas por muitos autores e pesquisadores, foram brevemente apresentados três tipos de testes de quebra estrutural e sua aplicação, com fortes indícios de confirmação da hipótese original de haver quebra estrutural na série de dados analisados, apesar de se tratar de uma amostra limitada de 182 observações diárias, inusual na análise de séries temporais.

Os resultados indicaram que houve quebra estrutural na série estudada em 27 de fevereiro de 2022, no ápice da invasão da Ucrânia pela Rússia, maior fornecedora de óleo e gás da Europa, indicando que uma diminuição da oferta mundial de petróleo pode impactar fortemente seus preços e, a depender da relação de necessidade de um país ou região por petróleo e seus derivados, é fundamental compreender os impactos que eventos políticos, militares, financeiros e econômicos possam ter sobre suas muitas esferas de influência.

Essa pesquisa contribui para a sistematização e documentação da discussão sobre a construção de modelos preditivos para contratos futuros de petróleo e sobre o desenvolvimento desse importante aspecto da análise econométrica, os testes estruturais. Aplicados a séries de petróleo, tais estudos podem indicar mudanças na direção dos preços que impactam a economia mundial e o nível de inflação e produto





dos países e regiões ao redor do mundo, possibilitando inferir sobre a relevância de determinados eventos históricos e na análise sobre seus efeitos em relação a certas variáveis econômicas. Pretende-se dar continuidade a pesquisas nessa área, aprofundando a investigação sobre raízes unitárias, estacionariedade, cointegração em séries temporais e modelos de previsão.

---

## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUEMELLO, V. P. de et al. Forecasting crude oil price: does exist an optimal econometric model? *Energy*, Elsevier, v. 155, p. 578–591, 2018.

ANDREWS, D. W. Tests for parameter instability and structural change with unknown change point. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, JSTOR, p. 821–856, 1993.

ANDREWS, D. W.; PLOBERGER, W. Optimal tests when a nuisance parameter is present only under the alternative. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, JSTOR, p. 1383–1414, 1994.

BAI, J. Least squares estimation of a shift in linear processes. *Journal of Time Series Analysis*, Wiley Online Library, v. 15, n. 5, p. 453–472, 1994.

BAI, J.; PERRON, P. Estimating and testing linear models with multiple structural changes. *Econometrica*, JSTOR, p. 47–78, 1998.

BANERJEE, A.; LUMSDAINE, R. L.; STOCK, J. H. Recursive and sequential tests of the unit-root and trend-break hypotheses: theory and international evidence. *Journal of Business & Economic Statistics*, Taylor & Francis, v. 10, n. 3, p. 271–287, 1992.

BLACK, C. Tendência, quebra estrutural e persistência dos choques no preço da soja de 1960 a 2014. *Indicadores Econômicos FEE*, v. 43, n. 3, p. 9–26, 2016.

BOX, G. E.; TIAO, G. C. Intervention analysis with applications to economic and environmental problems. *Journal of the American Statistical association*, Taylor & Francis, v. 70, n. 349, p. 70–79, 1975.

BP. Statistical review of world energy. British Petroleum, London, 2021.

BROWN, R. L.; DURBIN, J.; EVANS, J. M. Techniques for testing the constancy of regression relationships over time. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, Wiley Online Library, v. 37, n. 2, p. 149–163, 1975.



BUSETTI, F.; HARVEY, A. Testing for the presence of a random walk in series with structural breaks. *Journal of Time Series Analysis*, Wiley Online Library, v. 22, n. 2, p. 127–150, 2001.

CARRION-i-SILVESTRE, J. L.; KIM, D.; PERRON, P. Gls-based unit root tests with multiple structural breaks under both the null and the alternative hypotheses. *Econometric Theory*, Cambridge University Press, v. 25, n. 6, p. 1754–1792, 2009.

CHEN, W.; HUANG, Z.; YI, Y. Is there a structural change in the persistence of wti–brent oil price spreads in the post-2010 period? *Economic Modelling*, Elsevier, v. 50, p. 64–71, 2015.

CHOW, G. C. Tests of equality between sets of coefficients in two linear regressions. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, JSTOR, p. 591–605, 1960.

CHU, C.-S. J.; WHITE, H. A direct test for changing trend. *Journal of Business & Economic Statistics*, Taylor & Francis, v. 10, n. 3, p. 289–299, 1992.

CLEMENTE, J.; MONTAÑÉS, A.; REYES, M. Testing for a unit root in variables with a double change in the mean. *Economics letters*, Elsevier, v. 59, n. 2, p. 175–182, 1998.

COSTA, N. S. S. d. Detecção de quebras estruturais em séries temporais: Implementação dos testes de shimotsu com uma aplicação em séries do mercado de câmbio. 120 f. Dissertação (Mestrado em Estatística) - Universidade de Brasília, Departamento de Estatística, Brasília, 2016.

DIAS, J.; CASTRO JR, V. J. de. Análise de quebra estrutural na formação bruta de capital fixo do Brasil. *Revista de Economia*, v. 29, 2003.

DICKEY, D. A.; FULLER, W. A. Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *Journal of the American statistical association*, Taylor & Francis, v. 74, n. 366a, p. 427–431, 1979.

DURBIN, J.; KOOPMAN, S. J. *Time series analysis by state space methods*. Oxford Statistical Science Series, Oxford University Press, n. 019-961199, 2001.

ENDERS, W. *Applied econometric time series*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.

FAN, Y.; XU, J.-H. What has driven oil prices since 2000? a structural change perspective. *Energy Economics*, Elsevier, v. 33, n. 6, p. 1082–1094, 2011.

FISHER, F. M. Tests of equality between sets of coefficients in two linear regressions: Na expository note. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, JSTOR, p. 361–366, 1970.

GARCIA, R.; PERRON, P. An analysis of the real interest rate under regime shifts. *The review of economics and statistics*, JSTOR, p. 111–125, 1996.



GARDNER, L. On detecting changes in the mean of normal variates. *The Annals of Mathematical Statistics*, JSTOR, v. 40, n. 1, p. 116–126, 1969.

GEM. Global Energy Monitor. 2023. Disponível em:  
<<https://globalenergymonitor.org/>>. Acesso em: 15/01/2023.

GREGORY, A. W.; HANSEN, B. E. Residual-based tests for cointegration in models with regime shifts. *Journal of econometrics*, Elsevier, v. 70, n. 1, p. 99–126, 1996.

HANSEN, B. E. Testing for structural change of unknown form in models with non-stationary regressors. Department of Economics, University of Rochester, 1991.

HANSEN, B. E. Tests for parameter instability in regressions with 1 (1) processes. *Journal of Business & Economic Statistics*, Taylor & Francis, v. 10, n. 3, p. 321–335, 1992.

HANSEN, B. E. Testing for structural change in conditional models. Boston College Department of Economics, 1996.

HARRIS, D. et al. Testing for a unit root in the presence of a possible break in trend. *Econometric Theory*, Cambridge University Press, v. 25, n. 6, p. 1545–1588, 2009.

HARVEY, D. I.; LEYBOURNE, S. J.; TAYLOR, A. R. Simple, robust, and powerful tests of the breaking trend hypothesis. *Econometric Theory*, Cambridge University Press, v. 25, n. 4, p. 995–1029, 2009.

JI, Q.; LIU, B.-Y.; FAN, Y. Risk dependence of covar and structural change between oil prices and exchange rates: A time-varying copula model. *Energy Economics*, Elsevier, v. 77, p. 80–92, 2019.

JUHL, T.; XIAO, Z. Tests for changing mean with monotonic power. *Journal of Econometrics*, Elsevier, v. 148, n. 1, p. 14–24, 2009.

KEJRIWAL, M.; PERRON, P. Testing for multiple structural changes in cointegrated regression models. *Journal of Business & Economic Statistics*, Taylor & Francis, v. 28, n. 4, p. 503–522, 2010.

KIM, D.; PERRON, P. Unit root tests allowing for a break in the trend function at an unknown time under both the null and alternative hypotheses. *Journal of econometrics*, Elsevier, v. 148, n. 1, p. 1–13, 2009.

KING, M. L. An alternative test for regression coefficient stability. *The review of Economics and Statistics*, JSTOR, p. 379–381, 1987.

KOOPMAN, S. J. et al. Stamp 6.0: Structural time series analyser, modeller and predictor. London: Timberlake Consultants, 2000.



- KWIATKOWSKI, D. et al. Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root: How sure are we that economic time series have a unit root? *Journal of econometrics*, Elsevier, v. 54, n. 1-3, p. 159–178, 1992.
- LEE, Y.-H.; HU, H.-N.; CHIOU, J.-S. Jump dynamics with structural breaks for crude oil prices. *Energy Economics*, Elsevier, v. 32, n. 2, p. 343–350, 2010.
- LEYBOURNE, S.; KIM, T.-H.; TAYLOR, A. R. Detecting multiple changes in persistence. *Studies in Nonlinear Dynamics & Econometrics*, De Gruyter, v. 11, n. 3, 2007.
- LIMA, J. C. C. O Choque nos Preços Mundiais de Petróleo em Tempos de Pandemia da Covid-19. 76 f. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas) – Faculdade de Economia, Administração, Atuária e Contabilidade, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.
- LIU, R.; NARAYAN, P. A new structural break unit root test based on a GARCH model. [S.l.], 2010.
- LUMSDAINE, R. L.; PAPELL, D. H. Multiple trend breaks and the unit-root hypothesis. *Review of economics and Statistics*, MIT Press, v. 79, n. 2, p. 212–218, 1997.
- MASLYUK, S.; SMYTH, R. Cointegration between oil spot and future prices of the same and different grades in the presence of structural change. *Energy Policy*, Elsevier, v. 37, n. 5, p. 1687–1693, 2009.
- MEHL, A. Unit root tests with double trend breaks and the 1990s recession in Japan. *Japan and the World Economy*, Elsevier, v. 12, n. 4, p. 363–379, 2000.
- NARAYAN, P. K.; NARAYAN, S. Modelling oil price volatility. *Energy policy*, Elsevier, v. 35, n. 12, p. 6549–6553, 2007.
- NARAYAN, P. K.; POPP, S. A new unit root test with two structural breaks in level and slope at unknown time. *Journal of Applied Statistics*, Taylor & Francis, v. 37, n. 9, p. 1425–1438, 2010.
- NARAYAN, P. K. et al. Do oil prices predict economic growth? new global evidence. *Energy economics*, Elsevier, v. 41, p. 137–146, 2014.
- NYBLOM, J. Testing for the constancy of parameters over time. *Journal of the American Statistical Association*, Taylor & Francis, v. 84, n. 405, p. 223–230, 1989.
- NYBLOM, J.; MÄKELÄINEN, T. Comparisons of tests for the presence of random walk coefficients in a simple linear model. *Journal of the American Statistical Association*, Taylor & Francis, v. 78, n. 384, p. 856–864, 1983.
- OLIVEIRA, F. N.; CUNHA, F. C. dos S. Estimando betas de mercado com quebras estruturais. *Brazilian Review of Finance*, v. 15, n. 2, p. 251–286, 2017.



PAGAN, A. R.; TANAKA, K. A further test for assessing the stability of regression coefficient. Australian National University, 1979.

PALAIA, D.; HOLLAND, M. Taxa de câmbio e paridade de poder de compra no Brasil: análise econométrica com quebra estrutural. *Economia Aplicada, SciELO Brasil*, v. 14, p. 5–24, 2010.

PERRON, P. Testing for a unit root in a time series with a changing mean. *Journal of Business & Economic Statistics, Taylor & Francis*, v. 8, n. 2, p. 153–162, 1990.

PERRON, P. et al. Dealing with structural breaks. *Palgrave handbook of econometrics*, v. 1, n. 2, p. 278–352, 2006.

PERRON, P.; VOGELSANG, T. J. Testing for a unit root in a time series with a changing mean: corrections and extensions. *Journal of Business & Economic Statistics, Taylor & Francis*, v. 10, n. 4, p. 467–470, 1992.

PERRON, P.; YABU, T. Testing for shifts in trend with an integrated or stationary noise component. *Journal of Business & Economic Statistics, Taylor & Francis*, v. 27, n. 3, p. 369–396, 2009.

PESARAN, H.; TIMMERMANN, A. Model instability and choice of observation window. *Economics Working Paper Series, University of California, San Diego*, 1999.

PHILLIPS, P. C. Towards a unified asymptotic theory for autoregression. *Biometrika, Oxford University Press*, v. 74, n. 3, p. 535–547, 1987.

PHILLIPS, P. C.; PERRON, P. Testing for a unit root in time series regression. *Biometrika, Oxford University Press*, v. 75, n. 2, p. 335–346, 1988.

PLOBERGER, W.; KRÄMER, W. The cusum test with ols residuals. *Econometrica: Journal of the Econometric Society, JSTOR*, p. 271–285, 1992.

QUANDT, R. E. Tests of the hypothesis that a linear regression system obeys two separate regimes. *Journal of the American statistical Association, Taylor & Francis*, v. 55, n. 290, p. 324–330, 1960.

SALISU, A. A.; FASANYA, I. O. Modelling oil price volatility with structural breaks. *Energy policy, Elsevier*, v. 52, p. 554–562, 2013.

SHIKIDA, C.; PAIVA, G. L.; JUNIOR, A. F. A. Análise de quebras estruturais na série do preço do boi gordo no estado de são paulo. *Economia Aplicada, Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto - USP*, v. 20, n. 2, p. 265, 2016.

SUN, J.; SHI, W. Breaks, trends, and unit roots in spot prices for crude oil and petroleum products. *Energy Economics, Elsevier*, v. 50, p. 169–177, 2015.



WANG, Y.; HAO, X. Forecasting the real prices of crude oil: What is the role of parameter instability? *Energy Economics*, Elsevier, p. 106483, 2022.

WEN, F.; GONG, X.; CAI, S. Forecasting the volatility of crude oil futures using har-type models with structural breaks. *Energy Economics*, Elsevier, v. 59, p. 400–413, 2016.

YAO, Y.-C. Estimating the number of change-points via schwarz'criterion. *Statistics & Probability Letters*, Elsevier, v. 6, n. 3, p. 181–189, 1988.

ZEILEIS, A. et al. Testing and dating of structural changes in practice. *Computational Statistics & Data Analysis*, Elsevier, v. 44, n. 1-2, p. 109–123, 2003.

ZHANG, Y.-J.; ZHANG, H. Volatility forecasting of crude oil futures market: Which structural change-based har models have better performance? *International Review of Financial Analysis*, v. 85, p. 102454, 2023.

ZIVOT, E.; ANDREWS, D. W. Further evidence on the great crash, the oil-price shock, and the unit-root hypothesis. *Journal of Business & Economic Statistics*, v. 10, n. 3, p. 251–270, 1992.