

Análise de quantificação de recorrência de preços brasileiros do milho, da soja e da carne de frango

Recurrence quantification analysis of Brazilian prices of corn, soybean and chicken meat

Análisis de cuantificación de recurrencia de precios brasileños del maíz, la soja y la carne de pollo

Recebido: 20/10/2020 | Revisado: 24/10/2020 | Aceito: 27/10/2020 | Publicado: 30/10/2020

Leika Irabele Tenório de Santana

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5516-5887>

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil

E-mail: leikatenorio10@gmail.com

Joelma Mayara da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2354-6068>

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil

E-mail: jms.estat@gmail.com

Lidiane da Silva Araújo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3111-7925>

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil

E-mail: lidiane_sac@hotmail.com

Guilherme Rocha Moreira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6344-1151>

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil

E-mail: guirocham@gmail.com

Tatijana Stosic

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5691-945X>

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil

E-mail: tastosic@gmail.com

Resumo

O milho e o farelo de soja são os insumos mais utilizados na produção de ração para aves no Brasil. Com isso, alterações em seus preços influenciam no preço da carne de frango, bem como em seu consumo. A análise individual e conjunta do valor do milho, da soja e da carne de frango

traz, portanto, informações relevantes sobre a dinâmica de preços dessas *commodities*. Objetivando tal contribuição, utiliza-se neste trabalho o método Gráfico de Recorrência; sua extensão, o Gráfico de Recorrência Cruzada; e a Análise de Quantificação de Recorrência, desenvolvidos para a análise da dinâmica não-linear de séries temporais. Os dados analisados aqui são os registros de preços diários do milho, da soja e da carne de frango no período de 02/08/2004 a 31/08/2020, fornecidos pelo Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada/Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/Universidade de São Paulo. Os resultados mostraram que os preços dessas *commodities* evoluem conjuntamente de maneira semelhante, porém os preços de soja e milho são mais sincronizados entre si do que com os de frango. Considerando a relação insumo/produto, mostrou-se que a variação temporal dos preços da carne de frango recebe maior influência do valor da soja que do de milho.

Palavras-chave: Alimentos; Insumos; Gráfico de recorrência; Análise quantificação de recorrência.

Abstract

Corn and soybean meal are the most used inputs in poultry feed production in Brazil. Changes in the prices of these inputs influence the price and consumption of chicken meat. With this in mind, this work aims to analyse the dynamics of chicken, corn and soybean prices individually and jointly, using the Recurrence Plot method, its extension, the Cross Recurrence Plot and the Recurrence Quantification Analysis, which were developed for the analysis of nonlinear dynamics of temporal series. The data are daily prices for chicken meat, corn and soybeans, from 08/02/2004 to 08/31/2020, provided by the Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada/Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/Universidade de São Paulo. The results showed that commodity prices evolve in a similar manner, where soybeans and corn prices are more synchronized with each other than with chicken prices. Considering the input/product relationship it was shown that soybean prices have a greater influence (than corn prices) on the temporal variation of chicken meat prices.

Keywords: Food commodities; Inputs; Recurrence plot; Recurrence quantification analysis.

Resumen

La harina de maíz y soja son los insumos más utilizados en la producción de piensos para aves de corral en Brasil. Los cambios en los precios de estos insumos influyen en el precio y el consumo de la carne de pollo. Con esto en mente, este trabajo tiene como objetivo analizar la dinámica de los precios del pollo, maíz y soja de forma individual y conjunta, utilizando el

método Gráfico de Recurrencia, su extensión, el Gráfico de Recurrencia Cruzada, y el Análisis de Cuantificación de Recurrencia, desarrollado para el análisis de la dinámica no lineal de series temporales. Los datos analizados aquí son los registros de precios diarios de pollo, maíz y soja, desde el 02/08/2004 al 31/08/2020, proporcionados por el Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada/Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/Universidade de São Paulo. Los resultados mostraron que los precios de las materias primas evolucionan de manera similar, pero los precios de la soja y el maíz están más sincronizados entre sí que con los precios del pollo. Considerando la relación insumo/producto, se demostró que los precios de la soja tienen una mayor influencia (que los precios del maíz) en la variación temporal de los precios de la carne de pollo.

Palabras clave: Alimentos; Insumos; Gráfico de recurrencia; Análisis de cuantificación de recurrencia.

1. Introdução

Uma das principais atividades econômicas no Brasil é o agronegócio. De grande significância para a balança comercial brasileira, essa atividade coloca o País em posição favorável no comércio internacional de *commodities* agrícolas devido à exportação de grãos (de Souza, dos Reis, Abraham, dos Santos, & Gobbetti, 2020). Outros fatores que contribuem para maior presença do Brasil no mercado internacional são: a ampliação de áreas plantadas, o uso de novas tecnologias no plantio (fertilizantes, defensivos agrícolas, máquinas, entres outros) e o aumento da produtividade (de Souza, dos Reis, Raymundo, & Pinto, 2018; Artuzo, Foguesatto, Souza, & Silva, 2018).

O Brasil é um grande produtor e exportador de grãos e carne de frango. Em 2020 ele ocupa o terceiro lugar na produção mundial de carne de frango (13.830 milhões de toneladas), milho (107.000 milhões de toneladas) e farelo de soja (34.900 milhões de toneladas), perdendo apenas para os Estados Unidos e a China. Encontra-se na segunda posição do ranking mundial de exportação de milho e farelo de soja, e primeira no de exportação de carne de frango (*United States Department of Agriculture Foreign Agricultural Service [FAS/USDA]*, 2020).

O alto consumo de carne de frango no Brasil até agosto de 2020 chegou a 9.802 milhões de toneladas, ganhando da carne bovina (com o consumo de 7.495 milhões de toneladas) e da carne suína (com 2.982 milhões de toneladas) (FAS/USDA, 2020). Com isso, a ocorrência de altas flutuações nos preços da carne de frango atinge de forma significativa a economia familiar. São diversos os fatores que contribuem para alterações nos preços de *commodities* alimentares,

como mudanças climáticas extremas, altas tarifas de energia elétrica, uso de *commodities* agrícolas para a produção de biocombustível, crescimento econômico de países emergentes, entre outros (Baffes, 2013; Hochman, Rajagopal, Timilsina, & Zilberman, 2014). Acredita-se, entretanto, que os fatores que mais influenciam no preço da carne de frango, em particular, são as oscilações nos preços dos insumos da produção de ração como o milho e o farelo de soja (Oliveira Junior, Wander, & Figueiredo, 2014). Isso mostra a importância de se ampliarem cada vez mais os estudos sobre o comportamento dos preços dessas *commodities* no mercado brasileiro.

Oliveira Junior *et al.* (2014) analisaram as relações lineares entre os preços do milho, da soja e da carne de frango e comprovaram a existência de forte correlação linear entre os grupos de variáveis: carne de frango/milho, com o coeficiente de Pearson de 0,648 e carne de frango/soja, com 0,718. Pereira, de Melo, Justo e da Silva Melo (2016) investigaram a relação entre os preços dos insumos produtivos milho e soja, e o preço da carne de frango no estado de Pernambuco. Eles verificaram que os choques exógenos no preço do milho e da soja influenciam positivamente o preço do frango por um curto período após o choque inicial.

Este trabalho tem como objetivo analisar a dinâmica de preço do milho, da soja e da carne de frango, bem como a dinâmica conjunta entre os preços dessas *commodities*, com o uso de métodos de análise não-linear de sistemas dinâmicos. Os métodos utilizados foram o Gráfico de Recorrência, o Gráfico de Recorrência Cruzada e a Análise de Quantificação de Recorrência, desenvolvidos para a análise de séries temporais não-lineares com base nas recorrências dos estados de sistemas dinâmicos no espaço de fase (Marwan, Romano, Thiel, & Kurths, 2007; Zbilut & Webber Jr, 1992).

Os métodos aqui utilizados foram aplicados em Fisiologia (Afonso *et al.*, 2019), Geologia (Zaitouny, Small, Hill, Emelyanova, & Clennell, 2020), Geofísica (Donner *et al.*, 2019), Climatologia (de Santana, da Silva, Menezes, & Stosic, 2020; Xu, Wang, Wan, & Li, 2019) e Finanças (Bastos & Caiado, 2011; Goswami, Ambika, Marwan, & Kurths, 2012; Yao & Lin, 2017). Para a análise de séries temporais financeiras, em particular, esses métodos são bastante adequados, pois não exigem pressupostos sobre a distribuição estatística, a estacionariedade ou o número mínimo de dados (Bastos & Caiado, 2011).

2. Metodologia

O estudo das séries temporais aqui consideradas se baseia nas análises qualitativa e quantitativa de redes complexas para distinguir entre diferentes tipos de dinâmicas não-lineares

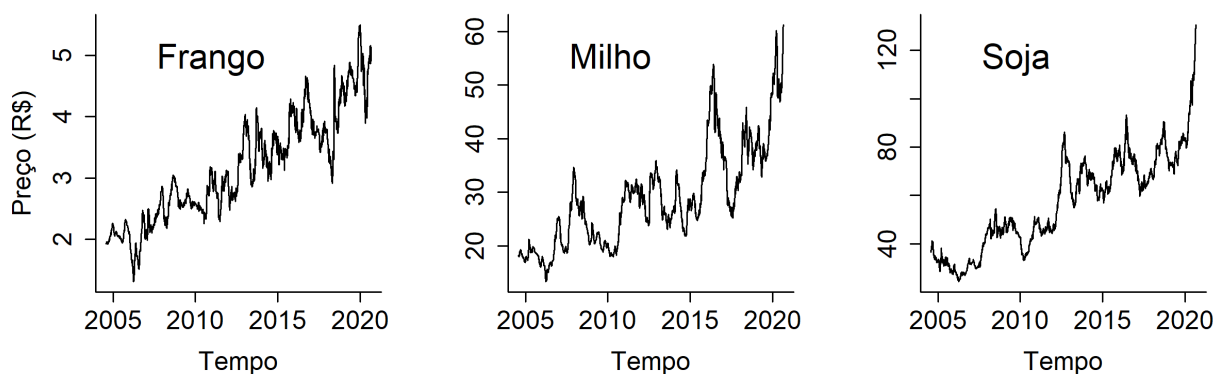
e, assim, classificar o comportamento dinâmico do sistema envolvido. Para isso, as séries temporais são transformadas em redes complexas e seus espaços de fase são, então, reconstruídos (Takens, 1981). A parte qualitativa da análise é realizada com o auxílio do método Gráfico de Recorrência (Eckmann, Kamphorst, & Ruelle, 1987) – para cada série individual – e do método Gráfico de Recorrência Cruzada (Zbilut, Guliani, & Webber Jr, 1998) – para as séries cruzadas – ambos os métodos utilizados para verificar a existência de estados recorrentes no espaço de fase. A parte quantitativa, por sua vez, consiste na Análise de Quantificação de Recorrência (Zbilut & Webber Jr, 1992), com que são obtidas as medidas de complexidade. Esses métodos são descritos mais adiante nesta Seção. Os estudos são realizados com o uso do *software* R Core Team (2020).

2.1 Descrição dos dados

As séries dos preços diários do milho, soja e carne de frango que foram utilizadas neste estudo têm como fonte o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada/Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/Universidade de São Paulo (CEPEA/ESALQ/USP) (2020) cujos dados compreendem o período de 02/08/2004 a 31/08/2020. A negociação de preço da carne de frango se dá pelo indicador CEPEA/ESALQ – ESTADO SP, com valor em reais por quilograma (R\$/kg). Para o preço do milho, o indicador é o ESALQ/BM&FBOVESPA, com valor em reais por saca de 60 kg (R\$/saca). O preço da soja, por sua vez, possui o indicador CEPEA/ESALQ – PARANÁ, com valor em reais por saca de 60 kg (R\$/saca) (CEPEA, 2020).

As séries temporais originais dos preços do milho, soja e carne de frango são apresentadas na Figura 1.

Figura 1. Séries temporais originais dos preços de frango, de milho e de soja.



Fonte: CEPEA (2020). Elaborado pelos autores a partir dos dados da CEPEA.

2.2 O método gráfico de recorrência

Eckmann *et al.* (1987) desenvolveram uma ferramenta para visualizar as recorrências de estados no espaço de fases de sistemas dinâmicos denominada Gráfico de Recorrência (*Recurrence Plot* - RP). O método assim funciona: Seja $\{\vec{x}_i\}_{i=1}^N$ uma trajetória no espaço de fase de um sistema dinâmico. O RP representará uma matriz quadrada $N \times N$, conforme

$$R_{i,j} = \Theta(\varepsilon - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|), i, j = 1, \dots, N, \quad (1)$$

onde \vec{x}_i e \vec{x}_j são os vetores (estados) no espaço de fase, ε é o raio da vizinhança, Θ é a função de Heaviside e $\|\cdot\|$ é a norma (euclidiana, por exemplo). Para uma série temporal escalar $\{u_i\}$, os vetores \vec{x}_i são construídos como $\vec{x}_i = (u_i, u_{i+1}, \dots, u_{i+(m-1)\tau})$, em que m é a dimensão de imersão e τ é o tempo de retardo (Takens, 1981). Os métodos mais utilizados para a obtenção dos valores desses parâmetros são o método dos vizinhos falsos mais próximos e a função de informação mútua, respectivamente (Cao, 1997; Kantz & Schreiber, 2004). Para os estados similares (recorrentes), tem-se $R_{i,j} = 1$ e, assim, um ponto preto é plotado na coordenada (i, j) do RP; caso contrário, $R_{i,j} = 0$ e um ponto branco será aí, então, plotado. Por definição tem-se que $R_{i,i} \equiv 1 \mid_{i=1}^N$, gerando uma linha diagonal principal no RP, chamada de linha de identidade (*line of identity* - LOI). Além disso, o RP será simétrico à LOI; ou seja, $R_{i,j} = R_{j,i}$ (Eckmann *et al.*, 1987; Marwan *et al.*, 2007).

O Gráfico de Recorrência produz informações sobre a evolução temporal das trajetórias no espaço de fase porque os padrões dos RPs estão relacionados ao comportamento específico do sistema dinâmico que ele representa. O RP é dividido em duas categorias: padrões de larga escala (tipologia) e padrões de pequena escala (textura). Padrões de larga escala são classificados em homogêneo (típico de processos estacionários e geralmente está associado a ruído branco), periódico (caracterizado por linhas diagonais paralelas à LOI que possuem mesma distância entre si, como o período de um sistema oscilante), deriva (ocorre em sistemas que possuem parâmetros que variam lentamente, provocando uma ausência de pontos recorrentes tanto no canto superior esquerdo quanto no inferior direito) e descontínuo (possui faixas brancas, indicando mudanças abruptas como eventos extremos na dinâmica; característica dos sistemas não estacionários). Os padrões de pequena escala são pontos (representam estados recorrentes; pontos isolados são característica das recorrências raras, típicas para ruído branco), linhas diagonais (ocorrem quando um segmento de trajetória evolui

paralelamente a outro) e linhas verticais e horizontais (ocorrem quando o estado do sistema não muda ou muda lentamente; característica dos estados laminares, sistemas intermitentes) (Eckmann *et al.*, 1987; Marwan *et al.*, 2007).

2.3 O gráfico de recorrência cruzada

O Gráfico de Recorrência Cruzada (*Cross Recurrence Plot* - CRP) é uma extensão bivariada do RP, útil para analisar a semelhança entre dois sistemas dinâmicos no mesmo espaço de fase (Marwan & Kurths, 2002; Marwan, Thiel, & Nowaczyk, 2002; Zbilut *et al.*, 1998).

Sejam \vec{x}_i ($i = 1, \dots, N$) e \vec{y}_i ($i = 1, \dots, M$) as trajetórias de dois sistemas dinâmicos no mesmo espaço de fase. O CRP é representado por uma matriz $N \times M$ (Marwan *et al.*, 2002), definida por

$$CR_{i,j} = \Theta(\varepsilon - \|\vec{x}_i - \vec{y}_j\|), \quad (2)$$

que acompanha todas as características das estruturas dos RPs (descritas anteriormente), mas com trajetórias \vec{x}_i e \vec{y}_i que podem não possuir o mesmo comprimento, levando a um CRP que não é necessariamente uma matriz quadrada. Além disso, os valores da diagonal principal, $CR_{i,i}|_{i=1}^N$, não são obrigatoriamente iguais à unidade e em geral o CRP não apresentará uma linha diagonal principal preta como no RP (Marwan *et al.*, 2007).

2.4 A análise de quantificação de recorrência

Zbilut e Webber Jr (1992) desenvolveram medidas quantitativas baseadas em estruturas de pequena escala de RPs: os pontos de recorrências e as estruturas diagonais. Posteriormente, Marwan, Wessel, Meyerfeldt, Schirdewan e Kurths, (2002) expandiram essas medidas, incluindo as estruturas verticais e horizontais.

As medidas de Análise de Quantificação de Recorrência (*Recurrence Quantification Analysis* – RQA) baseadas em estruturas diagonais são: taxa de recorrência – REC (mede a densidade dos pontos de recorrências no RP), determinismo – DET (mede o percentual de pontos de recorrências que formam as estruturas diagonais), comprimento médio das linhas diagonais - L (considerado o tempo médio de previsão do sistema), comprimento máximo da

linha diagonal - Lmax (tamanho da linha diagonal mais longa excluindo LOI), divergência – DIV (que é o inverso de Lmax e indica o quão rápido os segmentos de trajetórias divergem no espaço da fase) e entropia de Shannon – ENTR (que mostra a complexidade do RP em relação às linhas diagonais). As medidas baseadas nas estruturas verticais são: laminaridade – LAM (mede o percentual de pontos de recorrências que formam as estruturas verticais) e tempo de aprisionamento, *trapping time* – TT (comprimento médio das linhas verticais ou horizontais que fornece o tempo médio em que o sistema permanece em um estado laminar - um estado que não muda no tempo).

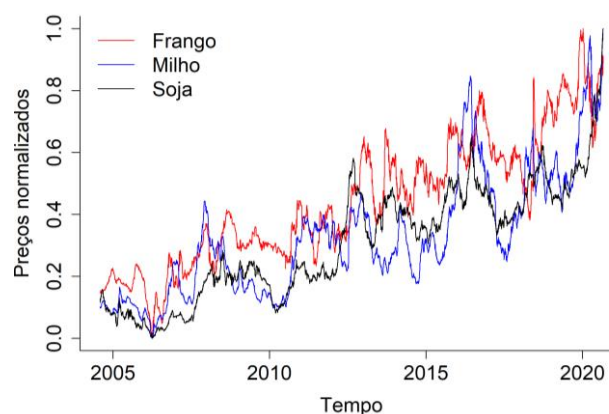
3. Resultados e Discussão

As séries temporais de preços do milho, soja e carne de frango da Figura 1 foram normalizadas no intervalo [0,1] de acordo com a relação

$$Y = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}, \quad (3)$$

onde x denota a série temporal original e $\max(x)$ e $\min(x)$ são respectivamente os valores de máximo e mínimo de x (Bastos & Caiado, 2011). As séries temporais normalizadas são, assim, apresentadas na Figura 2. Observa-se aí o aumento dos preços ao longo do período analisado, com picos relacionados ao aumento dos preços de *commodities* alimentares em 2007/2008, em 2010/2011 (Baffes, 2013; Hochman *et al.*, 2014) e em meado de 2020, provavelmente por causa do aumento na demanda por alimentos, que foi superior à oferta (FAS/USDA, 2020).

Figura 2. Séries normalizadas dos preços de frango, milho e soja.

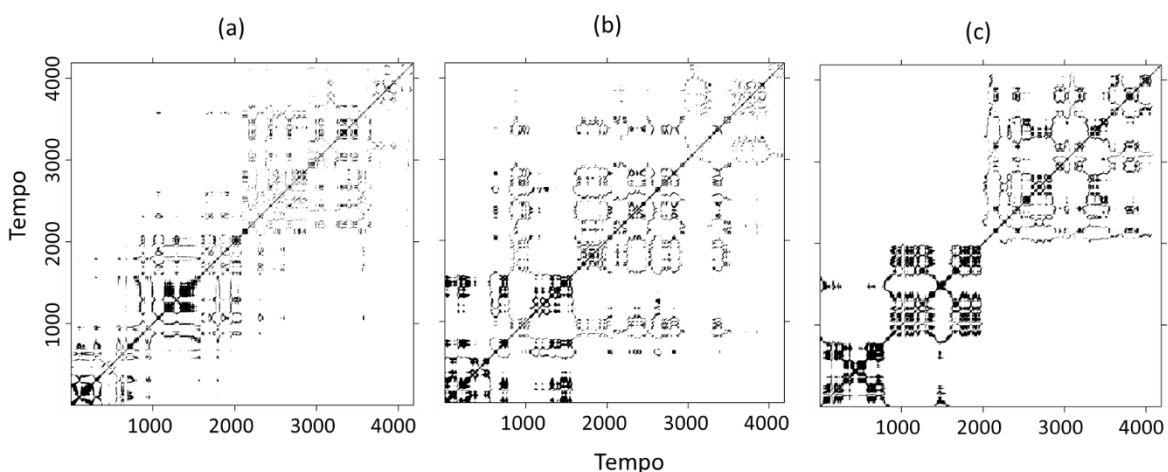


Fonte: Compilação dos autores (2020).

Os valores obtidos para os parâmetros de RP foram: dimensão de imersão $m = 10$, tempo de retardo $\tau = 1$ e raio de vizinhança $\varepsilon = 0,025$, os quais estão de acordo com valores encontrados na literatura para séries temporais financeiras (Bastos & Caiado, 2011; Strozzi, Zaldívar, & Zbilut, 2007; Zbilut, 2005; Yao & Lin, 2017). Os valores de m e τ foram obtidos utilizando o método dos vizinhos falsos mais próximos e a função de informação mútua, respectivamente (Cao, 1997; Kantz & Schreiber, 2004). O valor do raio de vizinhança ε foi determinado para gerar a taxa de recorrência, REC entre 1% e 5% (Webber Jr & Zbilut, 2005).

Os Gráficos de Recorrência dos preços das *commodities* aqui analisadas são observados na Figura 3. As variações dos preços não se mostraram aleatórias, uma vez que os RPs não apresentaram apenas os pontos isolados, e existem bandas brancas indicando mudanças abruptas na dinâmica. As estruturas diagonais curtas indicam que os dados não são estacionários e as transições podem ter ocorrido ao longo do tempo; as estruturas verticais (horizontais) indicam a existência dos estados laminares, que não mudam ou mudam lentamente. As transições foram mais abruptas no caso da soja, em 2008 (~ 1000 dias) e em 2012 (~ 2000 dias), refletindo a evolução temporal dos preços, o que também pode observado na Figura 1.

Figura 3. Gráficos de Recorrência dos preços de frango (a), milho (b) e soja (c).

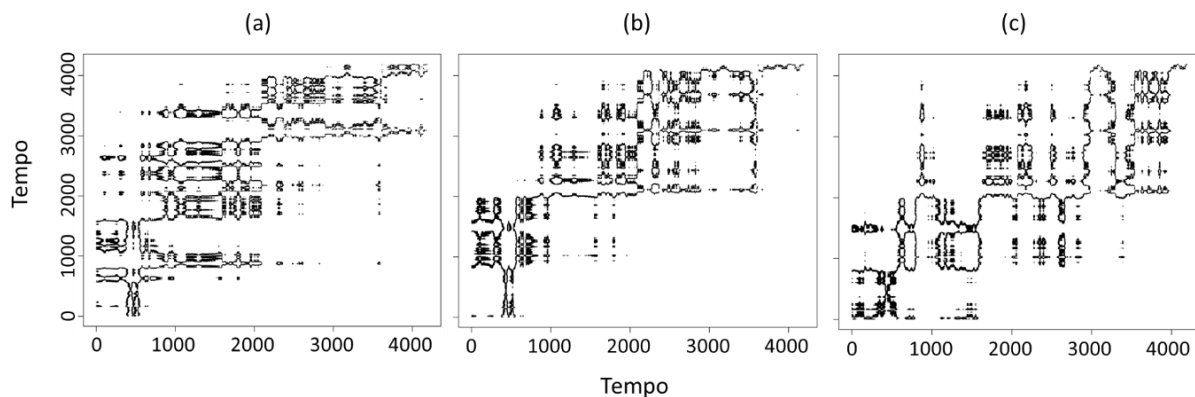


Fonte: Compilação dos autores (2020).

Os valores estimados dos parâmetros para os Gráficos de Recorrência Cruzada foram: dimensão de imersão $m = 4$, tempo de retardo $\tau = 1$, e raio de vizinhança $\varepsilon = 0,032$. Os Gráficos de Recorrência Cruzada entre os preços das *commodities* são apresentados na Figura 4. A partir dos CRPs pode-se visualizar a evolução simultânea dos preços: bandas brancas indicam mudanças abruptas entre os períodos com baixa sincronização (ausência de pontos

recorrentes) e os períodos com maior sincronização (presença de pontos recorrentes) entre os preços das *commodities*. Para os preços de frango e de milho, transições foram identificadas em 2007, 2015 e 2019 (~600, 2600 e 3600 dias); para os de frango e de soja, em 2007, 2012 e 2019 (~ 600, 1800 e 3600 dias) e, para os de soja e de milho, em 2007, 2011 e 2015 (~ 600, 1600 e 2600 dias). Essas transições podem também ser identificadas na Figura 2.

Figura 4. Gráficos de Recorrência Cruzada dos preços de frango/milho (a), frango/soja (b) e milho/soja (c).



Fonte: Compilação dos autores (2020).

As medidas de quantificação dos RPs são exibidas na Tabela 1. O valor da taxa de recorrência foi mais alto para o preço da soja, indicado pela maior densidade de pontos pretos (Figura 3c). Os valores de DET e LAM foram próximos para todas as séries, indicando que os processos estocásticos que geram os preços das *commodities* possuem características semelhantes quanto ao determinismo e à intermitência. O tempo médio de previsão (L) foi maior para a série de preço da soja. A série de preço da carne de frango possui o menor valor de Lmax, indicando que os segmentos de trajetórias divergiram mais rapidamente; ou seja, mostrando-se mais caótica. Os valores da ENTR foram bem próximos uns dos outros, porém a série de frango possui complexidade mais baixa. Os valores da LAM foram altos (indicando a formação de estruturas verticais, como mostra a Figura 3), representando a ocorrência de estados laminares, mas com o tempo de aprisionamento (TT) baixo, o que indica alta variação de preços.

Tabela 1. Análise de Quantificação de Recorrência para os preços de frango, milho e soja.

Medidas de quantificação dos RPs	Frango	Milho	Soja
Taxa de recorrência	0,023	0,037	0,047
Determinismo	0,986	0,992	0,994
Comprimento médio da linha diagonal	11,737	14,538	16,503
Maior comprimento da linha diagonal	434	564	1102
Entropia de Shannon	3,231	3,511	3,654
Laminaridade	0,974	0,979	0,978
Tempo de aprisionamento	11,138	13,477	13,610

Fonte: Compilação dos autores (2020).

As medidas de quantificação dos CRP são mostradas na Tabela 2. Observa-se que a taxa de recorrência (REC) e a laminaridade (LAM) apresentam valores próximos, indicando que os preços das *commodities* evoluíram de maneira semelhante. As informações mais específicas foram fornecidas pelo comprimento médio das linhas diagonais (L) e das linhas verticais (TT): o tempo médio de previsão (L) e de aprisionamento (TT) foi maior para a dinâmica conjunta do preço de soja e milho, indicando que eles foram mais sincronizados entre si do que com os preços da carne de frango. Os valores da entropia de Shannon foram semelhantes, porém a divergência (inverso do maior comprimento das linhas diagonais) foi maior para o CRP entre frango e milho, indicando que as trajetórias conjuntas divergem mais rapidamente e consequentemente a sincronização entre esses preços foi mais baixa do que entre frango e soja.

Os valores do comprimento médio, da linha diagonal e do maior comprimento da linha diagonal foram maiores para o CRP frango/soja, indicando que o tempo de previsão da evolução conjunta foi maior para essa relação do que para frango/milho. Esses resultados mostraram que a relação entre os preços de soja e milho como mesmo tipo de *commodities* (*commodities* agrícolas) foi mais forte do que a relação entre os preços dessas *commodities* como insumo e o preço do frango como produto. Considerando a relação insumo/produto, mostrou-se que a variação temporal dos preços da carne de frango sofre maior influência dos preços de soja que dos de milho. Esse resultado está em concordância com o de Oliveira Junior *et al.* (2014), que analisaram as relações lineares entre os preços do milho, da soja e da carne de frango e encontraram a correlação linear mais forte entre os preços de frango e soja.

Tabela 2. Análise de Quantificação de Recorrência Cruzada para os preços de frango, milho e soja.

Medidas de quantificação dos <u>CRPs</u>	Frango e Milho	Frango e Soja	Milho e Soja
Taxa de recorrência	0,034	0,032	0,038
Determinismo	0,982	0,983	0,989
Comprimento médio da linha diagonal	7,903	8,272	9,590
Maior comprimento da linha diagonal	81	129	111
Entropia de Shannon	2,851	2,901	3,081
Laminaridade	0,986	0,986	0,991
Tempo de permanência	10,621	10,211	12,595

Fonte: Compilação dos autores (2020).

4. Considerações Finais

Neste trabalho analisou-se a dinâmica dos preços brasileiros do milho, da soja e da carne de frango, aplicando o método de Gráfico de Recorrência (*Recurrence Plot* - RP), Gráfico de Recorrência Cruzada (*Cross Recurrence Plot* - CRP) e a Análise de Quantificação de Recorrência (*Recurrence Quantification Analysis* - RQA). O período da análise foi de agosto de 2004 a agosto de 2020, com frequência diária.

O RP e o CRP apresentam-se relevantes na identificação das transições ocorridas nas séries temporais de preços das *commodities* aqui analisadas. A análise dos RPs das séries individuais mostrou que todas as séries possuem características similares, como estruturas diagonais curtas, formação de estruturas verticais (horizontais) e a presença de bandas brancas. Os CRPs também apresentam estruturas de larga escala similares às das séries individuais.

Os valores das medidas de RQA mostraram que as séries dos preços de soja são mais previsíveis (maior tempo médio de previsão - trajetórias divergem mais lentamente no espaço de fase e permanecem por mais tempo em estados laminares) que as dos preços das outras *commodities*. A partir das medidas de quantificação dos CRPs, conclui-se que os preços das *commodities* evoluem conjuntamente de forma semelhante, porém os preços da soja e do milho são mais sincronizados entre si do que com os preços da carne de frango.

Baseado nesses resultados, pode-se concluir que a relação entre os preços de soja e milho é mais determinada pelo fato de ambas as *commodities* pertencerem ao mesmo tipo (*commodities* agrícolas) do que por serem consideradas como insumos da produção de ração para frango.

Trabalhos futuros podem incluir a relação entre os preços de outras *commodities* agrícolas e outras variáveis financeiras.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) e ao Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA) pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

Referências

Afonso, L. C., Rosa, G. H., Pereira, C. R., Weber, S. A., Hook, C., Albuquerque, V. H. C., & Papa, J. P. (2019). A recurrence plot-based approach for Parkinson's disease identification. *Future Generation Computer Systems*, 94, 282-292.

Artuzo, F. D., Foguesatto, C. R., Souza, Â. R. L. D., & Silva, L. X. D. (2018). Gestão de custos na produção de milho e soja. *Revista Brasileira de Gestão de Negócios*, 20(2), 273-294.

Bastos, J. A., & Caiado, J. (2011). Recurrence quantification analysis of global stock markets. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 390(7), 1315-1325.

Baffes, J. (2013). A framework for analyzing the interplay among food, fuels, and biofuels. *Global Food Security*, 2(2), 110-116.

Cao, L. (1997). Practical method for determining the minimum embedding dimension of a scalar time series. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 110(1-2), 43-50.

Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. (2020). Recuperado de <https://www.cepea.esalq.usp.br/br>.

de Santana, L. I. T., da Silva, A. S. A., Menezes, R. S. C., & Stosic, T. (2020). Recurrence quantification analysis of monthly rainfall time series in Pernambuco, Brazil. *Research, Society*

and Development, 9(9), e637997737-e637997737.

de Souza, A. E., dos Reis, J. G. M., Abraham, E. R., dos Santos, R. M., & Gobbetti, M. P. (2020). Simulação de operações de grãos em um terminal portuário. *Agrarian*, 13(47), 114-121.

de Souza, A. E., dos Reis, J. G. M., Raymundo, J. C., & Pinto, R. S. (2018). Estudo da produção do milho no Brasil. *South American Development Society Journal*, 4(11), 182.

Donner, R. V., Balasis, G., Stolbova, V., Georgiou, M., Wiedermann, M., & Kurths, J. (2019). Recurrence-Based Quantification of Dynamical Complexity in the Earth's Magnetosphere at Geospace Storm Timescales. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124(1), 90-108.

Eckmann, J. P., Kamphorst, S. O., & Ruelle, D. (1987). Recurrence Plots of Dynamical Systems. *Europhysics Letters*, 4(9), 973-977.

Goswami, B., Ambika, G., Marwan, N., & Kurths, J. (2012). On interrelations of recurrences and connectivity trends between stock indices. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 391(18), 4364-4376.

Hochman, G., Rajagopal, D., Timilsina, G., & Zilberman, D. (2014). Quantifying the causes of the global food commodity price crisis. *Biomass and Bioenergy*, 68, 106-114.

Kantz, H., & Schreiber, T. (2004). *Nonlinear time series analysis* (Vol. 7). Cambridge university press.

Marwan, N., & Kurths, J. (2002). Nonlinear analysis of bivariate data with cross recurrence plots. *Physics Letters A*, 302(5-6), 299-307.

Marwan, N., Romano, M. C., Thiel, M., & Kurths, J. (2007). Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Physics reports*, 438(5-6), 237-329.

Marwan, N., Thiel, M., & Nowaczyk, N. R. (2002). Cross recurrence plot based synchronization of time series. *arXiv preprint physics/0201062*.

Marwan, N., Wessel, N., Meyerfeldt, U., Schirdewan, A., & Kurths, J. (2002). Recurrence-plot-based measures of complexity and their application to heart-rate-variability data. *Physical review E*, 66(2), 026702.

Oliveira Junior, O. D. P., Wander, A. E., & Figueiredo, R. S. (2014). Relação entre os preços do milho, da soja e da carne de frango no período de 2004 a 2013. In *Embrapa Arroz e Feijão- Artigo em anais de congresso (ALICE)*. In: Congresso Da Sociedade Brasileira De Economia, Administração E Sociologia Rural, 52., 2014, Goiânia. Heterogeneidade e suas implicações no rural brasileiro: anais. Goiânia: Sober, 2014.

Pereira, A. F. C., de Melo, A. F., Justo, W. R., & da Silva Melo, S. R. (2016). Cointegration and price transmission in poultry in Pernambuco. *Informe GEPEC*, 20(1), 129.

R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Strozzi, F., Zaldívar, J. M., & Zbilut, J. P. (2007). Recurrence quantification analysis and state space divergence reconstruction for financial time series analysis. *Physica A: statistical mechanics and its applications*, 376, 487-499.

Takens, F. (1981). Detecting strange attractors in turbulence. In *Dynamical systems and turbulence, Warwick 1980* (pp. 366-381). Springer, Berlin, Heidelberg.

United States Department of Agriculture Foreign Agricultural Service. (2020). Recuperado de <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/topCountriesByCommodity#chart28>.

Webber Jr, C. L., & Zbilut, J. P. (2005). Recurrence quantification analysis of nonlinear dynamical systems. *Tutorials in contemporary nonlinear methods for the behavioral sciences*, 94(2005), 26-94.

Xu, Z., Wang, H., Wan, H., & Li, H. (2019). Quantitative Assessment of Nonstationarity of Wind Speed Signal Using Recurrence Plot. *Journal of Aerospace Engineering*, 32(6), 04019094

Yao, C. Z., & Lin, Q. W. (2017). Recurrence plots analysis of the CNY exchange markets based on phase space reconstruction. *The North American Journal of Economics and Finance*, 42, 584-596.

Zaitouny, A., Small, M., Hill, J., Emelyanova, I., & Clennell, M. B. (2020). Fast automatic detection of geological boundaries from multivariate log data using recurrence. *Computers & Geosciences*, 135, 104362.

Zbilut, J. P. (2005). Use of recurrence quantification analysis in economic time series. In *Economics: Complex Windows* (pp. 91-104). Springer, Milano.

Zbilut, J. P., Giuliani, A., & Webber Jr, C. L. (1998). Detecting deterministic signals in exceptionally noisy environments using cross-recurrence quantification. *Physics Letters A*, 246(1-2), 122-128.

Zbilut, J. P., & Webber Jr, C. L. (1992). Embeddings and delays as derived from quantification of recurrence plots. *Physics letters A*, 171(3-4), 199-203.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Leika Irabele Tenório de Santana – 20%

Joelma Mayara da Silva – 20%

Lidiane da Silva Araújo – 20%

Guilherme Rocha Moreira – 20%

Tatijana Stosic – 20%