



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Estudo dos regimes turbulentos para a atmosfera amazônica baseado na análise de quantificação de recorrência

Edilanê Mendes dos Santos¹, Sérgio Roberto de Paulo²

¹ Dra. em Física Ambiental, Professora Assistente II, Instituto de Natureza e Cultura, Universidade Federal do Amazonas, Rua Primeiro de Maio, nº 5, CEP 69630-000, Benjamin Constant, Amazonas. (97) 98410-1144. edilanemendes@ufam.edu.br (autor correspondente). ² Dr. Física, Professor Titular, Instituto de Física, Universidade Federal do Mato Grosso, Av. Fernando Correa, s/n, Coxipó, CEP 78060-900, Cuiabá, Mato Grosso. (65) 3615-8730. sergioufamt@gmail.com

Artigo recebido em 25/07/2023 e aceito em 05/04/2024

RESUMO

Ao analisar dados recorrentes de séries temporais micrometeorológicas, os pesquisadores podem detectar padrões semelhantes e compreender os regimes turbulentos frente as suas classificações. Nessa pesquisa foi aplicado o método não-linear dos RPs (Recurrence Plot) e RQA (Recurrence Quantification Analysis) aos regimes turbulentos classificados segundo a teoria HOST, para as variáveis de velocidade e temperatura virtual, respectivamente, V e T_v , de dados coletados durante o Projeto GoAmazon 2014/15. A não-estacionariedade das séries temporais analisadas foram capturadas pelos RPs, que mostraram uma variabilidade ao redor da linha de instabilidade (LOI). Os resultados sugerem uma maior estabilidade para as séries temporais de V quando comparada a variável T_v . O regime turbulento 1, caracterizado por menores valores de V e maiores para T_v , apresentaram maior complexidade nos seus RPs, e assim, maiores valores para a entropia, o que está de acordo com a teoria para turbulência, visto que a supressão da mistura vertical e a dissipação da turbulência, resulta em padrões de fluxo mais complexos próximos à superfície.

Palavras-chave: sistemas dinâmicos, regime turbulento, teoria HOST, séries temporais não-lineares e não-estacionárias.

Study of turbulent regimes for the Amazon atmosphere based on recurrence quantification analysis

ABSTRACT

When analyzing recurring data from micrometeorological time series, researchers can detect similar patterns and understand turbulent regimes based on their classifications. In this study, the nonlinear methods of Recurrence Plot (RP) and Recurrence Quantification Analysis (RQA) were applied to turbulent regimes classified according to the HOST theory. The variables of velocity (V) and virtual temperature (T_v) were analyzed using data collected during the GoAmazon 2014/15 Project. The non-stationarity of the time series was captured by the RPs, which showed variability around the Line of Instability (LOI). The results suggest greater stability in the V time series compared to the T_v variable. Turbulent regime 1, characterized by lower values of V and higher values of T_v , exhibited higher complexity in their RPs and therefore higher entropy values. This is in line with turbulence theory, as the suppression of vertical mixing and turbulence dissipation leads to more complex flow patterns near the surface.

Keywords: dynamic systems, turbulent regime, HOST theory, nonlinear and non-stationary time series.

Introdução

De modo simplificado, a atmosfera é um reservatório de ar sem limites físicos bem definidos, cujas camadas variam verticalmente ao longo do tempo e do espaço. O ar, que é um fluido, está sob a ação da gravidade e de pressões externas, e seu escoamento é estudado em mecânica dos fluidos, uma das áreas da física (Franklin et al.,

2022). Os escoamentos dos fluidos recebem três classificações a partir da sua velocidade: laminar, onde o fluxo é suave e previsível; transiente, um estágio intermediário; e turbulento, caracterizado por movimentos irregulares e aparentemente caóticos. É nesse contexto de turbulência que a camada limite atmosférica (CLA) ganha destaque.

A CLA é uma região crítica de aproximadamente 1 km de espessura acima da superfície terrestre, caracterizada por um escoamento turbulento que facilita o intercâmbio de momentum, calor, umidade, poluentes e gases-traço com a atmosfera (Hao et al., 2021; Lumley et al., 2001) ou seja, esta camada é fundamental para a regulação térmica, a dinâmica dos fluxos turbulentos e o transporte de massa e energia entre a Terra e a atmosfera (Cruz et al., 2023; Shi et al., 2023; Frisch, 1995; Lenschow & Hicks, 1986). Na CLA, a microescala, que abrange movimentos atmosféricos de 1 m a 1 km, é decisiva para o desencadeamento de fenômenos atmosféricos de diversas magnitudes (Dey et al., 2023; Spiga & Forget, 2009). Além disso, as propriedades fractais da turbulência, como a dimensão fractal e os expoentes de Hurst e de Kolmogorov, destacam a complexidade desses fluxos turbulentos (Chowdhuri et al., 2020; Xin et al., 2001).

Durante a noite, a CLA é referida como Camada Limite Noturna (CLN) ou Camada Limite Estável (CLE), um período marcado pelo resfriamento da superfície terrestre devido à falta de radiação solar direta. Esse resfriamento leva a uma inversão térmica, caracterizada por um aumento da temperatura com a altitude, contrariando o padrão diurno. Tal fenômeno resulta em uma estabilização atmosférica próxima ao solo, suprimindo a turbulência e restringindo a mistura vertical do ar (Kondo et al., 1978). Essa estabilidade noturna é propícia ao surgimento de turbulência intermitente, onde períodos de atividade turbulenta são intercalados com momentos de calmaria, tornando as flutuações cada vez mais intermitentes à medida que o número de Richardson (R_i) cresce. Mahrt (1999) destaca que a turbulência intermitente complica o entendimento dos processos físicos subjacentes devido à sua natureza irregular, desafiando descrições lineares do movimento dos fluidos (Van de Wiel et al., 2012). A compreensão desses padrões de turbulência intermitente na CLN é fundamental para entender a dinâmica dos regimes de turbulência noturna, servindo como foco principal deste estudo.

Diante desse contexto, surge a necessidade de utilizar abordagens metodológicas para entender a complexa dinâmica da CLN. Uma dessas metodologias é o uso combinado dos Gráficos de Recorrência (Recurrence Plots, RPs) e da Análise Quantitativa de Recorrência (Recurrence Quantification Analysis - RQA). Os RPs servem como um método visual para investigar a

recorrência de estados em sistemas dinâmicos através de séries temporais, enquanto a RQA aprofunda a análise ao quantificar as estruturas e a complexidade desses padrões (Selskii et al., 2023; Kecik et al., 2017; Marwan, 2008; Marwan et al., 2007). O desenvolvimento dos RPs está atrelado a questões conceituais introduzidas no trabalho de Henri Poincaré acerca do problema de três corpos (Poincaré & Sémirot, 1952). E existe uma ampla aplicabilidade desta metodologia nos mais variados tipos de sistemas dinâmicos.

Ademais, essa metodologia oferece a possibilidade de encontrar e avaliar eventos extremos e raros usando a frequência de suas recorrências, com isso, a possibilidade de identificar e classificar padrões climáticos recorrentes, auxiliar na previsão do Tempo e na variabilidade climática de longo prazo (Marwan, 2023; Banerjee et al., 2021).

A análise de recorrência tem sido empregada em diversos estudos focados na compreensão das dinâmicas climáticas e temporais, as quais são marcadas por ciclos sazonais e padrões recorrentes. Esses padrões incluem as variações sistemáticas do clima ao longo do ano, manifestando-se em alterações na temperatura, precipitação, e duração do dia, as quais são influenciadas pelas estações. Um exemplo destacado desta aplicação envolve a análise dos ciclos recorrentes nos oceanos, como as oscilações El Niño/Oscilação Sul (ENOS), que surgem em períodos irregulares e têm um impacto significativo nas correntes oceânicas, temperatura da água, e padrões climáticos em uma escala global. Zurlini et al. (2018), por exemplo, empregaram essa metodologia com o objetivo de desvendar as dinâmicas subjacentes ao clima e aos oceanos. Através da análise de recorrência, foi possível elucidar características temporais e espaciais desses fenômenos, bem como suas interconexões com padrões climáticos de ampla escala, proporcionando insights valiosos sobre a complexidade dos sistemas climáticos e oceânicos.

Outro estudo utilizou os RPs para analisar a complexidade do sistema vegetação-clima e visualizar o comportamento periódico ou caótico de um sistema dinâmico através de seu espaço de fase. Almeida-Ñauñay et al. (2021) utilizaram essa metodologia a fim de compreender e avaliar a resposta de dois diferentes Índices de Vegetação à dinâmica temporal de temperatura e precipitação em uma região semiárida.

Além disso, os RPs já foram utilizados em estudos da turbulência. Trabalhos realizados por

Živković e Rypdal (2008) e Guimarães-Filho et al. (2010) aplicaram a metodologia a dados de plasma turbulento. Outros, como Fragkou et al. (2019) aplicaram no estudo dos fluxos turbulentos em canais com baixos números de Reynolds.

Sendo assim, o objetivo dessa pesquisa foi estudar a classificação dos regimes de turbulência noturna para a CLA, proposta por Sun et al. (2012), conhecida como teoria “HOckey-Stick Transition” (HOST), por meio dos RPs e RQA a fim de identificar padrões temporais, suas estruturas dinâmicas e investigar os fenômenos de intermitência da turbulência. Para isso, foram utilizados dados de torres micrometeorológicas do projeto GoAmazon 2014/15 (Green Ocean Amazon) coletados na floresta amazônica.

A teoria HOST classifica a turbulência noturna em três regimes. O Regime 1 é identificado por uma turbulência fraca, influenciada principalmente pelo cisalhamento local e pelos gradientes verticais de temperatura, onde a escala de velocidade turbulenta é quase independente da velocidade média do vento. O Regime 2, por outro lado, apresenta uma turbulência forte, impulsionada pelo cisalhamento vertical do vento, onde a força da turbulência aumenta a energia cinética turbulenta proporcionalmente à velocidade do vento, indicando uma resposta significativa ao cisalhamento próximo ao solo. Já o Regime 3 caracteriza-se por uma turbulência moderada que pode intensificar-se abruptamente devido a eventos “top-down”, como instabilidades de Kelvin-Helmholtz e ondas de gravidade, mas que, na ausência destes, mantém-se fraca. Esta classificação esclarece como a turbulência noturna na camada limite atmosférica varia com a velocidade do vento, o cisalhamento local e a estratificação térmica, contribuindo para a compreensão da dinâmica atmosférica noturna.

Embora o método da eddy covariance tenha se estabelecido como a técnica padrão para a medição direta de fluxos de massa e energia entre a biosfera e a atmosfera, sua confiabilidade diminui sob condições de baixa turbulência, como frequentemente encontradas à noite. Este fenômeno é particularmente evidente em ecossistemas florestais, como a Amazônia, onde a estratificação do ar e a complexidade da topografia desafiam as premissas do método (Twine et al., 2000). O entendimento incompleto dos mecanismos de turbulência noturna e a sua

parametrização inadequada nos modelos atuais apresentam um desafio fundamental para o avanço no campo. Tais condições resultam na subestimação dos fluxos, um problema conhecido como o “problema do fechamento do balanço de energia”, que tem sido um ponto sensível na micrometeorologia (Foken, 2008; Foken et al., 2006).

Além disso, os fenômenos atmosféricos noturnos não ocorrem isoladamente e têm implicações substanciais para os sistemas ecológicos e para o clima global. A turbulência atmosférica regula os processos de trocas gasosas, influencia a dispersão de poluentes e afeta os padrões de deposição de nutrientes e a dinâmica da umidade do solo (Andreae et al., 2002). Compreender esses mecanismos é necessária para prever as respostas dos ecossistemas às mudanças climáticas e para gerenciar recursos hídricos e a qualidade do ar.

Assim, a presente pesquisa se aprofunda na dinâmica dos regimes turbulentos noturnos utilizando ferramentas de análise de séries temporais complexas, como os RPs e a RQA. Essas ferramentas permitem não apenas uma investigação detalhada dos estados do sistema atmosférico, mas também a identificação de padrões recorrentes e a caracterização de eventos turbulentos intermitentes em outros sistemas. A aplicação dessas técnicas avançadas pode fornecer uma nova perspectiva para a compreensão dos padrões de turbulência na CLA, com o potencial de refinar os modelos de fluxo de eddy covariance e melhorar as estimativas de intercâmbio de massa e energia.

Assim, o estudo desses regimes turbulentos na CLA, utilizando a metodologia dos RPs, alinha-se às pesquisas de Hooijdonk et al. (2015) e Van de Wiel et al. (2012), que examinam parâmetros prognósticos para regimes de camada limite e turbulência sustentável sob diferentes velocidades do vento. Este trabalho também está em consonância com o estudo de Sousa et al. (2013), que explora propriedades turbulentas em camadas limite, e Martins et al. (2018), que investiga parâmetros de dispersão turbulenta sob diferentes condições de estabilidade. Ao empregar RPs para analisar regimes turbulentos na CLA, espera-se contribuir para uma melhor compreensão física sobre a complexidade e as características fundamentais desses regimes.

Material e métodos

Localização e Caracterização da Área Experimental

O experimento foi realizado em uma área de floresta primária da Reserva Biológica de Cuieiras (2.60191° latitude, 60.2093° longitude; 130m de altitude), também conhecida como ZF-2 (Zona Franca 2), distante 60 km ao norte de Manaus (BR-174), Amazonas, Brasil (Figura 1).

De acordo com a classificação climática de Köppen, a área estudada é do tipo Af (Clima Tropical Chuvoso de Floresta), o que significa que a precipitação anual excede a evapotranspiração anual (Ayoade, 1983), resultando em uma umidade constante ao longo do ano. A temperatura média anual na região é de 26,68°C, enquanto a precipitação anual é de cerca de 2252 mm.

Quanto ao projeto, o experimento GoAmazon 2014/15 foi projetado para avaliar o impacto da poluição urbana de Manaus no entorno

da floresta amazônica. A torre micrometeorológica, denominada K34, possui 50 m e está implantada em um platô de altitude média (LBA, 2015).

Segundo Fuentes (2016), foram instalados dez anemômetros sônicos 3D (modelo CSAT3, Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah) que mediu as três componentes ortogonais da velocidade do vento (zonal u , meridional v e vertical w) e a temperatura virtual (T_v) do ar.

As dez alturas distintas correspondem (em m): 48.2, 40.4, 34.9, 31.6, 24.5, 22.1, 18.4, 13.5, 7.0 e 1.0 (Figura 1) e coletados a uma frequência de amostragem de 20 Hz durante os meses de abril de 2014 a janeiro de 2015.

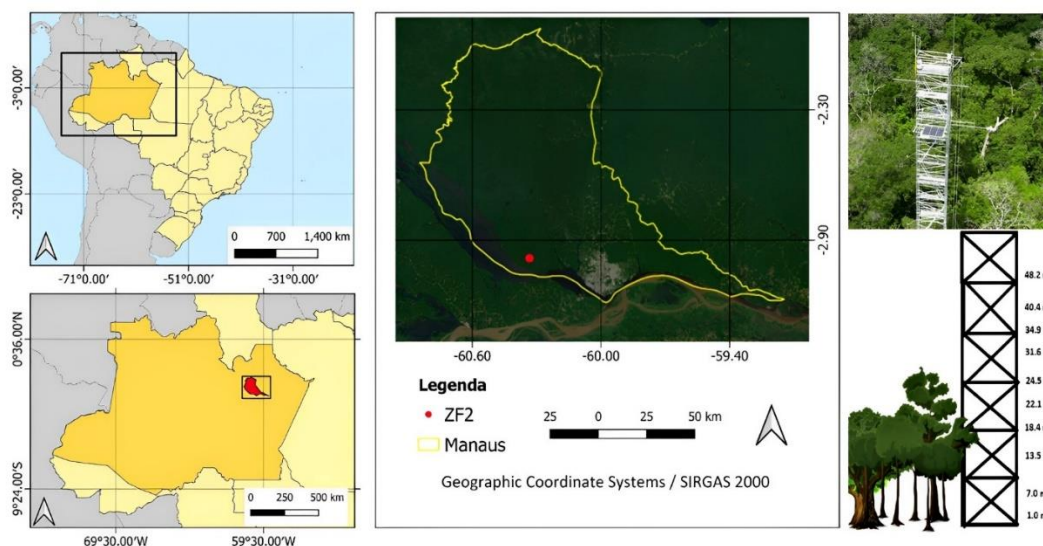


Figura 1. Localização geográfica da torre micrometeorológica, sentido anti-horário, localização do estado do Amazonas, destaque para a cidade de Manaus, ponto vermelho destaca a posição geográfica da ZF-2. Foto e esquema ilustrativo da torre e posição dos medidores ao longo dela.

Tratamento de dados

Sun et al. (2012) investigaram os regimes turbulentos noturnos e a intermitência associada a eles, sendo observados três regimes turbulentos, assim como três categorias distintas de intermitência. Tais regimes turbulentos estão associados à sua dependência quanto à instabilidade de cisalhamento, à estratificação térmica, às eventuais circulações locais, à

ocorrência de nuvens e/ou de JBNs (jatos de baixos níveis), dentre outros fatores. Os autores encontraram uma relação entre a intensidade do fluxo turbulento e a velocidade do vento, de tal modo, que os regimes da turbulência foram categorizados da seguinte forma:

Regime 1- Caracterizado por turbulência fraca, gerada por cisalhamento local e modulado pelos gradientes verticais de temperatura da CLE. A

velocidade do vento é menor que um valor limite em que uma escala característica de velocidade turbulenta, V , depende muito pouco da variação da velocidade média do vento $\bar{V}$.

Regime 2- Caracterizado pela forte turbulência gerada devida ao cisalhamento vertical do vento, quando a sua velocidade excede um valor limite, a força turbulenta aumenta sistematicamente a E_{ECT} que depende da variação de $\bar{V}$. A estreita relação entre E_{ECT} e $\bar{V}$ sugere que a turbulência sob ventos moderados responde ao cisalhamento próximo ao solo (Sun et al., 2012; Sun et al., 2016).

Regime 3- Caracterizado por turbulência moderada, salvo quando há ocorrência de eventos do tipo “top-down”, em que a turbulência explode esporadicamente, associada a movimentos de cima para baixo, por exemplo, sistemas como instabilidades de Kelvin-Helmholtz e ondas de gravidade, visto que, eliminando tais manifestações intermitentes, a turbulência permanece fraca.

Inicialmente, os dados diários foram filtrados utilizando filtro passa-alta de Butterworth com frequência de corte normalizada de $0.02(\pi \text{ rad/amostra})$, a função de transferência utilizada neste tratamento foi a praticada na biblioteca do software Matlab, $H(s) = \frac{s^2}{s^2 + \sqrt{2}s + 1}$.

O uso do filtro passa-alta procura eliminar as oscilações de baixa frequência do sinal original. Essa técnica é implementada para atenuar os efeitos de mesoescala no transporte turbulento, como destacado por Vickers e Mahrt (2003). Eles afirmam que o transporte de mesoescala nos cálculos dos fluxos podem degradar as relações de similaridade de MO (Monin-Obukhov).

Após a aplicação do filtro, foram selecionados dentro dos dados diários, os intervalos de tempo: 0h a 5h e 19h a 0h. O dia juliano, DJ, selecionado para esse estudo foi DJ= 102 do ano de 2014, para a altura de 48.2 m. Seguindo a metodologia proposta por Sun et al. (2012), foi calculado a energia cinética turbulenta (E_{ECT}) para cada intervalo de 5 minutos de dados (6000 pontos de comprimento), definido por $E_{ECT} = \left[\frac{1}{2} (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2) \right]^{1/2} = \sqrt{ECT}$. Onde σ representa o desvio padrão de cada componente do vento, (u , v , w). A média do vento $V = |V|$ foi calculada por meio da equação $V = (u^2 + v^2)^{1/2}$. Para a construção do espaço de fase, foram plotados os valores de $E_{ECT} \times V$.

Durante o processo de seleção do período a ser analisado nessa pesquisa, foi constatado que

nem todas as noites da campanha GoAmazon apresentam as relações de turbulência caracterizada pela teoria HOST. De fato, um estudo conduzido por Yus-Díez et al. (2019) verificou a mesma situação ao analisar os dados coletados durante a campanha BLLAST (Boundary-Layer Late Afternoon and Sunset Turbulence) e afirmaram que tal padrão foi observado apenas em noites com camada limite estavelmente estratificada, o que corresponde a noites de tempo bom e céu claro.

Reconstrução do espaço de fase e dos gráficos de recorrência

A reconstrução do espaço de fase de um sistema dinâmico é realizada mediante o cálculo de três parâmetros: m (dimensão de imersão), τ (atraso temporal) e ϵ (distância entre os pontos no RP).

O parâmetro de imersão m indica o número de dimensões embutidas no espaço de fase e fornece, portanto, a dimensionalidade do espaço de fase reconstruído. Esse parâmetro foi estimado utilizando o método dos falsos vizinhos mais próximos (*False Nearest Neighbors* - FNN). O conceito, FNN, foi introduzido por Kennel, Brown e Abarbanel (1992) e conforme Kantz e Schreiber (2004) e Hegger, Kantz e Schreiber (1999), a ideia básica é procurar pontos no conjunto de dados que sejam vizinhos no espaço de imersão, mas que não deveriam ser, pois sua evolução temporal futura é muito diferente.

Seja a série temporal $x(t)$, supondo que a dimensão de incorporação mínima seja m_0 e $\vec{x}_i$ um ponto na série temporal à procura do seu vizinho $\vec{x}_j$, em um espaço m -dimensional, a distância é calculada pela equação: $D_i = \frac{|x_{i+1} - x_{j+1}|}{\|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|}$. Se D_i exceder um determinado limiar heurístico D_t , este ponto é marcado como tendo um falso vizinho mais próximo (Kennel et al., 1992).

Para utilizar o método FNN, começa-se com um m pequeno, por exemplo, $m = 1$, e conta-se o número de vizinhos de um ponto ao longo da série observada. Se a dimensão de incorporação m for aumentada de m para $m + 1$, muitos dos vizinhos anteriores não serão mais vizinhos; em vez disso, serão falsos vizinhos. Desta forma, encontra-se a dimensão de imersão mínima m quando (quase) todos os vizinhos são reais (Huffaker et al., 2017; Kantz & Schreiber, 2004), determinando assim o número ótimo de dimensões para o conjunto de dados.

O parâmetro de retardo τ , por sua vez, será estimado usando a função da média da informação Mútua (*Average Mutual Information* - AMI). A AMI, utiliza duas variáveis do mesmo processo estocástico x , defasada em relação a outra, em função da distribuição de probabilidade, $P(x(t), x(t + \tau))$. A equação da AMI é dada por

$$I_x(\tau) = \sum_{n=1}^N P(x(t), x(t + \tau)) \ln \left\{ \frac{P(x(t), x(t + \tau))}{P(x(t) \cdot x(t + \tau))} \right\}.$$

Para calcular o valor de ϵ , por se tratar de dados não-estacionários, Marwan et al. (2007) sugere que o valor esteja relacionado aos pontos de recorrência em relação ao tamanho total do espaço de fase, ou seja, o valor escolhido de 1% da densidade de pontos da taxa de recorrência (Recurrence Rate – RR), porém, como sugerido por Webber e Zbilut (2005), o valor utilizado variou entre 1% e 5% sendo ajustado conforme o resultado do RP.

Assim, seja ξ_t a trajetória reconstruída no espaço de fase de m dimensões, onde τ é o atraso temporal, tal qual a equação:

$\xi_t = [x(t), x(t + \tau), \dots, x(t + (m - 1)\tau)]$ para $t = 1, \dots, n$. Onde ξ_t é um ponto no espaço, cuja distância Euclidiana entre dois pontos nos tempos i e j , é dada por δ_{ij} , quando $t = i$ e $t = j$, assim: $\delta_{ij} = |\xi_i - \xi_j|$.

Para uma série temporal periódica, com período T , tem-se $\delta_{ij} = 0$ quando $|i - j| = kT$ com $k = 0, 1, 2, \dots$ (Huffaker et al., 2017). Assim, supondo que a série temporal reconstruída seja formada por n vetores no espaço de estado: $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_n$. Será construído o novo espaço $i \times j$, $i, j = 1, 2, \dots, n$. Onde $\delta_{ij} = |\xi_i - \xi_j| < \epsilon$, quando dois pontos são considerados recorrentes é traçado um círculo preto em (i, j) ; Caso contrário, um círculo branco.

Existem algoritmos que usam uma linha diagonal visando identificar sistemas dinâmicos previsíveis. Quanto mais longa a linha, é mais evidente que o sistema está seguindo um padrão consistente de estados ao longo do tempo, tornando-o relativamente previsível.

Os RPs mostram como a trajetória se repete ao retornar aos estados já visitados, dentro da margem de tolerância ϵ , uma vez que i e j são momentos. Sendo possível visualizar a correlação do tempo entre os dados das séries temporais por meio de uma representação bidimensional de uma trajetória em um espaço de fase de dimensão superior (Huffaker et al., 2017).

Formalmente, o RP pode ser escrito como uma matriz por meio de $R_{i,j} = \Theta(\epsilon - \|\xi_i - \xi_j\|)$,

onde $\Theta(\cdot)$ é a função de Heaviside, assim, se $x < 0$, $\Theta(x) = 0$, caso contrário, $\Theta(x) = 1$ e $\|\cdot\|$ é a norma.

Um ponto preto está sempre presente na diagonal principal, quando $i = j$, $R_{i,j} \equiv 1$. Além disso, o RP é simétrico em relação ao diagonal principal, possuindo uma linha preta, a linha de identidade (LOI). Além disso, o gráfico de recorrência é simétrico por definição em relação à diagonal principal. a linha de identidade (LOI) (Marwan et al., 2007) isto é, $R_{i,j} \equiv R_{j,i}$. Se a série for periódica, de período T , então, para i fixo, há um círculo preto a cada $T - 1$ círculos brancos; por exemplo, para $T = 4$, tem-se $\bullet \circ \circ \circ \bullet \circ \circ \circ \bullet$.

O RP 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 (Santana et al., 2020).

As estruturas dos RPs foram classificadas por Marwan et al., (2002) a partir dos padrões apresentados, como grande e pequena escala. Padrões homogêneos no RP, cujos pontos são indistinguíveis, são característicos de ruído branco. Enquanto os padrões periódicos, tem suas estruturas recorrentes de modo a se repetir ao longo do gráfico. Já os padrões de deriva são observados quando há um esmaecimento nos cantos do RP, geralmente relacionado a de sistemas não estacionários, onde as trajetórias do espaço de fase estão em constante mudança. Os padrões interrompidos estão relacionados a eventos extremos e raros, sendo identificados pela presença de bandas brancas no RP, indicando transições significativas.

Porém, Zbilut e Webber (1992), para além do visual, quantificaram as características dos RPs, permitindo uma avaliação mais quantitativa dos sistemas. A Análise de Quantificação de Recorrência (Recurrence Quantification Analysis - RQA) estão relacionados aos segmentos de linhas descritos a seguir.

Normalização das séries temporais

Marwan, Thiel e Nowaczyk (2002) justifica a importância da normalização da série temporal, X , em relação à amplitude, antes de aplicar a técnica dos RPs e RQA. A normalização pode ser realizada utilizando a equação:

$$X_{\text{norm}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}.$$

Em que cada termo na equação significa: X - valor original na série temporal, X_{min} - menor valor encontrado na série temporal e X_{max} - maior valor encontrado na série temporal.

Ao calcular X_{norm} , cada valor da série temporal é transformado para um valor normalizado entre 0 e 1, de acordo com a sua posição relativa na amplitude total da série. Nessa pesquisa foram analisadas as variáveis V e T_v .

Recurrence Quantification Analysis

Para a determinação dos três parâmetros críticos, τ , m e ϵ (limiar de proximidade), recorreu-se à utilização da caixa de ferramentas RQA para Matlab, conforme descrito por Marwan (2018). Inicialmente, procedeu-se ao cálculo do tempo de atraso τ . Com este valor estabelecido, avançou-se para o cálculo da dimensão m , seguida da determinação cuidadosa do limiar de proximidade ϵ , ajustado de maneira a otimizar os resultados. Com base nos parâmetros τ , m , e ϵ foi construída a matriz de recorrência utilizada para a visualização dos padrões de recorrência e a subsequente análise quantitativa que ocorre da seguinte maneira:

Ao calcular o RQA, há um processo de conversão dos RPs de tempo para RPs espaciais de dimensões mais altas, que por sua vez derivam imagens prototípicas em duas dimensões medidas em pixels, que estão relacionadas as matrizes de altas dimensões, que são difíceis de representar (Marwan, 2023; Marwan et al., 2007; Marwan et al., 2002).

Por exemplo, para um sistema cuja dimensão seja $m = 4$, o RP será representado por matrizes de quatro dimensões de tamanho que são difíceis de visualizar. No entanto, a dimensão do RP será reduzida até ser possíveis visualizá-la, resultando em um cubo, que é uma hipersuperfície do RP de quatro dimensões ao longo da linha de interesse (LOI).

A partir do RP resultante, é possível aplicar a RQA para extrair informações sobre a estrutura e complexidade dos dados espaciais. Por conseguinte, a RQA será usada para analisar dados espaciais e como a extensão dos RP de tempo para RP espacial poderá ser utilizada para estudar a dinâmica de sistemas complexos em diferentes escalas espaciais, mais detalhes em Marwan et al (2007).

Após Zbilut e Webber (1992) iniciarem a quantificação dos RPs, Marwan et al (2002) expandiram as métricas incluindo estruturas verticais e horizontais. Porém, para esta pesquisa foram escolhidas seis medidas a fim de examinar

os regimes turbulentos: taxa de recorrência (RR), determinismo (DET), comprimento da linha diagonal mais longa (L_{max}), entropia (ENT), laminaridade (LAM) e tempo de aprisionamento (TT). As equações e suas respectivas descrições abaixo foram extraídas a partir de Marwan et al., (2007).

A taxa de recorrência (RR): é a probabilidade de encontrar um ponto de recorrência preto (para o qual $R_{i,j} = 1$), ou $RR = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j=1; i \neq j}^N R_{i,j}$, onde N^2 é o número total de pixels (preto ou branco) em um RP. A taxa de recorrência usa a mesma definição da soma da correlação, que não inclui a linha diagonal principal, estando relacionada com a probabilidade de um determinado estado se repetir. Um RR mais alto (para o mesmo valor do parâmetro ϵ) indica poucas mudanças gerais na dinâmica das respostas ao longo do tempo e que o desempenho está confinado a poucos estados diferentes.

O determinismo (DET) ou previsibilidade, é empregada para medir e caracterizar a complexidade e a estrutura de sistemas dinâmicos a partir da porcentagem de pontos em um RP pertencentes as linhas diagonais, indicando componentes determinísticos no gráfico de recorrência, cuja equação é dada por: $DET = \frac{\sum_{l=l_{min}}^{l_{max}} lP(l)}{\sum_{l=1}^N lP(l)}$, onde $P(l)$ é o histograma de linhas diagonais de comprimento l com threshold ϵ , l_{max} e l_{min} são respectivamente o comprimento máximo e mínimo da linha diagonal e l_{min} pode ser definido pelo analista. Assim, quanto maior for o valor de DET, maior será o determinismo.

O L_{max} é o maior comprimento da linha diagonal encontrada no RP, sendo utilizada para quantificar a divergência exponencial da trajetória do espaço de fase. Assim, quanto mais rápido as trajetórias divergirem, mais curtas serão as linhas e menor o valor de L_{max} , porém essa medida é sensível ao valor do l_{min} escolhido, uma vez que L_{max} pode ser calculada para cada linha diagonal paralela à linha de interesse (LOI), fornecendo informações sobre a dinâmica do sistema em diferentes escalas. Nessa pesquisa, a l_{min} será automatizada, coletando somente o valor de L_{max} , interesse dessa pesquisa. $L_{max} \max = (l_{i=1}^{N_l})$.

A medida de entropia, ENTR, é calculada a partir da entropia de Shannon, e está relacionada a probabilidade de encontrar um determinado comprimento de linha diagonal l no RP, onde $P(l)$ é o número de linhas diagonais de comprimento l e

N_l é o número total de linhas diagonais no RP, assim $p(l) = P(l)/N_l$. A equação é dada por $ENTR = - \sum_{l=l_{min}}^N p(l) \ln p(l)$. Em processos estocásticos, o valor de ENTR é baixa, indicando baixa complexidade, ou seja, para processos determinísticos, a medida ENTR tende ser alta, indicando alta complexidade.

A laminaridade, LAM, quantifica o tempo que o sistema persiste em um determinado estado laminar, ou seja, estado de baixa complexidade. Assim, caso um sistema fique um longo período em um estado específico, terá um valor alto de LAM, e o contrário é verdadeiro, menos tempo em um estado específico, menor o valor de LAM. Assim como a ENTR, a medida de LAM em processos estocásticos possui valores menores do que em processos determinísticos. A equação é dada por:
$$LAM = \frac{\sum_{v=v_{min}}^N vP(v)}{\sum_{v=1}^N vP(v)}$$
 onde v_{min} e $P(v)$ são respectivamente o comprimento mínimo e o histograma dos comprimentos v das linhas verticais. Outro destaque é o fato da medida LAM poder ser calculada para cada linha diagonal paralela à linha de interesse (LOI), fornecendo informações sobre a dinâmica do sistema em diferentes escalas.

A medida de tempo de aprisionamento (TT) é definida como o tempo médio que o sistema passa por estados recorrentes de comprimento maior ou igual a l_{min} (ou seja, estados que se repetem). Assim como as medidas anteriores, valores baixos de TT estão relacionados a processos estocásticos. A equação é dada por

$$TT = \frac{\sum_{v=v_{min}}^N vP(v)}{\sum_{v=v_{min}}^N P(v)}.$$

A RQA pode ser aplicada em toda a série temporal de uma única vez, ou ainda, pode-se particionar a série e aplicar as medidas para cada segmento, mais detalhes em Marwan et al. (2007). Nessa pesquisa, o RQA será aplicado em todo o comprimento da série temporal relacionado a cada regime, buscando extrair e comparar as seis medidas supracitadas.

Resultados e discussão

Regimes de turbulência atmosférica

Neste estudo, dados coletados no DJ 102 de 2014, a uma altitude de 48.2 metros, foram utilizados para calcular a E_{ECT} e V , considerando intervalos de cinco minutos de dados entre 00h e 5h, assim como entre 19h e 24h.

A Figura 2 apresenta o gráfico com a separação dos regimes de turbulência segundo Sun et al. (2012). Os regimes estão representados pelos círculos preto, azul e vermelho, respectivamente relacionados aos regimes 1, 2 e 3. Para esta pesquisa, foi realizada a análise para o intervalo de tempo entre 23h30 e 00h00 (hora local). Os seis conjuntos de dados estudados estão destacados em amarelo e correspondem a dois conjuntos para cada regime turbulento.

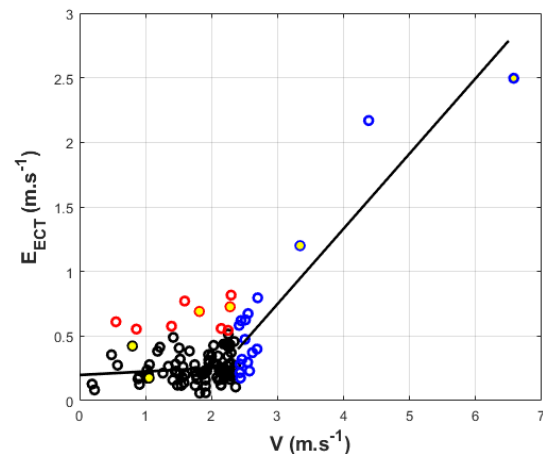


Figura 2: Representação esquemática dos regimes turbulentos pautados na teoria HOST, de Sun et al. (2012), para o DJ 102 da campanha GoAmazon 2014/15.

Após a escolha do período a ser estudado e seus regimes correspondentes, as séries temporais foram recortadas para posterior análise. Nessa pesquisa foram analisadas duas variáveis: a velocidade do vento (V) e a temperatura virtual (T_v) que inicialmente não participa dos cálculos para a classificação dos regimes turbulentos. As Figuras 3 e 4 mostram o comportamento dessas variáveis ao longo do tempo, para cada 5 minutos, plotados em cores distintas para facilitar a visualização da variabilidade de cada regime. O regime 2 foi identificado entre 23h30 e 23h40, enquanto o regime 3 entre 23h40 e 23h50. Já o regime 1 ocorreu entre 23h50 e 00h00.

Na Figura 3, as medidas relacionadas ao regime 2 estão coloridas em azul (23:30 - 23:35) e vermelho (23:35 - 23:40). Sun et al. (2012) afirmam que o regime 2 é caracterizado por forte turbulência. No gráfico em azul são observadas flutuações acentuadas na velocidade do vento, com valores ultrapassando os 12 m/s, indicativo de uma turbulência robusta, provavelmente devido ao cisalhamento vertical do vento. Continuando, o período representado pela cor vermelha e pertencente ao mesmo regime, exibe padrões de variação semelhantes aos do segmento anterior,

embora com máximos um pouco mais modestos, o que aponta para uma persistência da turbulência forte, mas com uma redução marginal na intensidade. A velocidade limite do vento marca a transição acima da qual a camada limite se aproxima de condições quase neutras, onde a mistura turbulenta reduz substancialmente a estratificação e as flutuações térmicas. Isso pode ser observado no gráfico da Figura 4, onde os dados de T_v estão apresentados.

Ao verificar os dados plotados em vermelho e azul (Figuras 3 e 4), é possível observar a relação entre maior V e menor T_v , ou seja, quando a velocidade do vento aumenta, a temperatura tende a diminuir. Isso ocorre porque durante a noite, a superfície da Terra perde calor por radiação, resfriando a camada próxima a ela, e o vento que sopra sobre essa camada, é gerado através do cisalhamento que ajuda a misturar a camada de ar frio com o ar mais quente acima dela. Isso resulta além do aumento da velocidade do vento, um resfriamento geral da camada limite noturna.

Na Figura 3, para o período das 23h40 às 23h45, indicado em verde no gráfico e vinculado ao regime 3, exhibe um perfil de velocidade do vento predominantemente moderado, pontuado por picos ocasionais, sugerindo a presença de turbulência de intensidade média e possíveis eventos de dinâmica "top-down" na atmosfera, onde a turbulência se origina de movimentos descendentes, por exemplo, devido a ventos fortes em altitudes elevadas ou a processos atmosféricos que geram instabilidades verticais, como a formação de nuvens convectivas. Essa tendência se mantém durante o intervalo das 23h45 às 23h50, agora marcado em rosa, onde a continuidade da turbulência moderada é notável, intercalada por variações mais acentuadas, refletindo a complexidade e a natureza intermitente da turbulência associada a este regime.

Perturbações na CLA geram variações na velocidade e direção do vento, contribuindo para a ocorrência de turbulência moderada ou forte (Van As et al., 2007). Agora, analisando o regime 3, na Figura 4, observa-se um padrão de turbulência moderada, com variações menos extremas para T_v , sugerindo episódios menos intensos de mistura turbulenta. Porém, é possível observar para o último 1.5 minuto do gráfico em rosa, há um aumento abrupto da T_v coincidindo com a diminuição da velocidade do vento (Figura 3). Em geral, este regime pode ser caracterizado por episódios esporádicos de turbulência gerada por instabilidades mais altas na atmosfera, como ondas

de gravidade ou o colapso de ondas internas, que podem induzir movimentos descendentes e perturbar a camada de inversão.

O regime 1 está relacionado à turbulência fraca, quando a velocidade do vento é inferior a um valor de limite. No intervalo das 23h50 às 23h55, colorido em turquesa e assinalando o regime 1 (Figura 3), testemunhamos uma diminuição notável na velocidade do vento, a qual se mantém mais estável, sugerindo um estado de turbulência fraca que poderia estar vinculado ao cisalhamento local e às estratificações térmicas da Camada Limite Estável; essa caracterização é corroborada pelo período subsequente, entre as 23h55 e a meia-noite, representado em preto, onde se perpetua a mesma tendência de estabilidade e menores velocidades, reiterando a continuidade do regime 1 com sua turbulência reduzida. A força dos pequenos redemoinhos está correlacionada com o cisalhamento local e fracamente relacionada à estratificação local.

Isso significa que os vórtices não conseguem produzir grandes variações de velocidade e direção do vento. O baixo cisalhamento do vento e a estabilidade atmosférica limitam a produção de energia cinética turbulenta, reduzindo a intensidade da turbulência na camada limite noturna e, portanto, a mistura vertical. Como resultado, a temperatura aumenta na camada limite noturna, pois há menos troca de ar quente e frio entre a superfície e a atmosfera livre. Essa ocorrência é claramente encontrada nos dados relacionados ao regime 1, plotados nas cores turquesa e preta da Figura 4.

Os RPs representados pelos gráficos dispostos nas Figuras 5, 6 e 7 estão relacionados a velocidade V , calculada a partir da equação $V = (u^2 + v^2)^{1/2}$ e plotadas na Figura 3. Pelas características dos gráficos de recorrência, é possível observar que se trata de séries temporais não estacionárias, com sinais de deriva e descontinuidade. A presença de deriva é evidenciada pela diminuição dos pontos recorrentes à medida que se afasta da linha de interesse (LOI). Além disso, a estrutura descontínua é dominante, como indicado pelas faixas brancas presentes, possivelmente devido a mudanças abruptas de estado ao longo do regime turbulento. Webber e Marwan (2015) afirmam que as mudanças bruscas ao longo da série temporal são capturadas pelo RP, sendo representada por áreas ou faixas brancas, podendo indicar até mesmo eventos extremos.

O regime de turbulência 2 é caracterizado por maiores valores de V . É possível visualizar no gráfico das séries temporais (Figura 2) de V (azul e vermelho), períodos de crescente velocidade interrompido por bruscas quedas, coincidindo

justamente com menores conglomerados ao redor da LOI. Em ambos os RPs da Figura 5, é possível visualizar a ocorrência de vários eventos “extremos” dentro desse período.

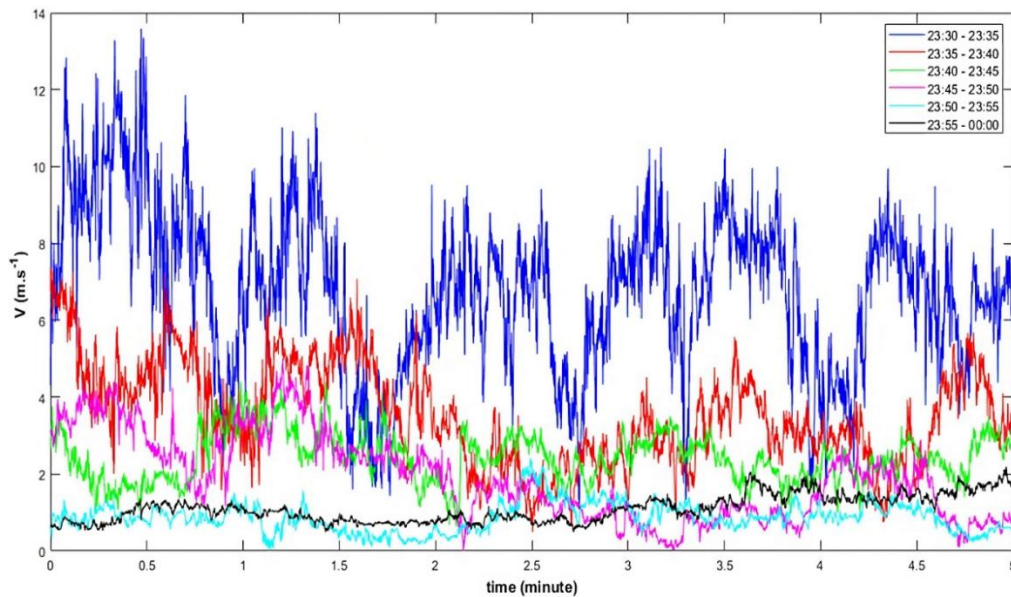


Figura 3. Gráficos da V para cada 5 minutos referentes aos regimes 1, 2 e 3 segundo a teoria HOST proposta por Sun et al. (2012). Cor azul (23:30 – 23:35, regime 2), cor vermelha (23:35 – 23:40, regime 2), cor verde (23:40 – 23:45, regime 3), cor rosa (23:45 – 23:50, regime 3), cor turquesa (23:50 – 23:55, regime 1) e cor preta (23:55 – 00:00, regime 1).

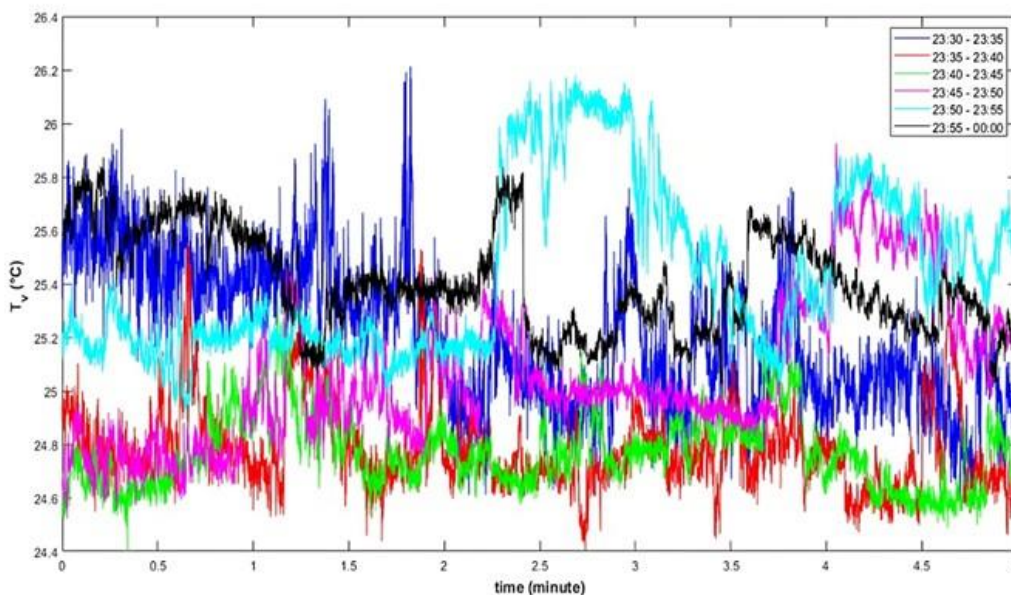


Figura 4. Gráficos da T_v para cada 5 minutos referentes aos regimes 1, 2 e 3 segundo a teoria HOST proposta por Sun et al. (2012). Cor azul (23:30 – 23:35, regime 2), cor vermelha (23:35 – 23:40, regime 2), cor verde (23:40 – 23:45, regime 3), cor rosa (23:45 – 23:50, regime 3), cor turquesa (23:50 – 23:55, regime 1) e cor preta (23:55 – 00:00, regime 1).

A explicação para a ocorrência de tais eventos extremos estão relacionados as condições atmosféricas. Garstang e Fitzjarrald (1999) classificaram a atmosfera tropical em estados “perturbado” e “não-perturbado” uma vez que os complexos de nuvens convectivas têm variação sazonal (estação) e diurna (convecção), diretamente relacionada a disponibilidade do vapor de água na atmosfera. Em geral, a atmosfera perturbada está associada a mudanças e instabilidades atmosféricas que podem afetar as condições micrometeorológicas numa determinada localidade em um determinado momento.

A hipótese proposta por Miranda et al., (2020) é que a convecção profunda pode induzir

oscilações de baixa frequência nas séries temporais medidas à superfície, “perturbando-as”. Ou seja, nuvens profundas formadas durante o dia, acabam por interferir nos episódios noturnos, ocasionando até mesmo eclosões, que segundo os autores, trata-se do fenômeno intenso que causa aumento na velocidade do vento. A presença dos downdrafts, oriundos de forte atividade convectiva na atmosfera, refere-se a correntes descendentes de ar intensas que são geradas como resultado de um processo atmosférico convectivo (Abraham & Goldblatt, 2023; Miranda, 2017).

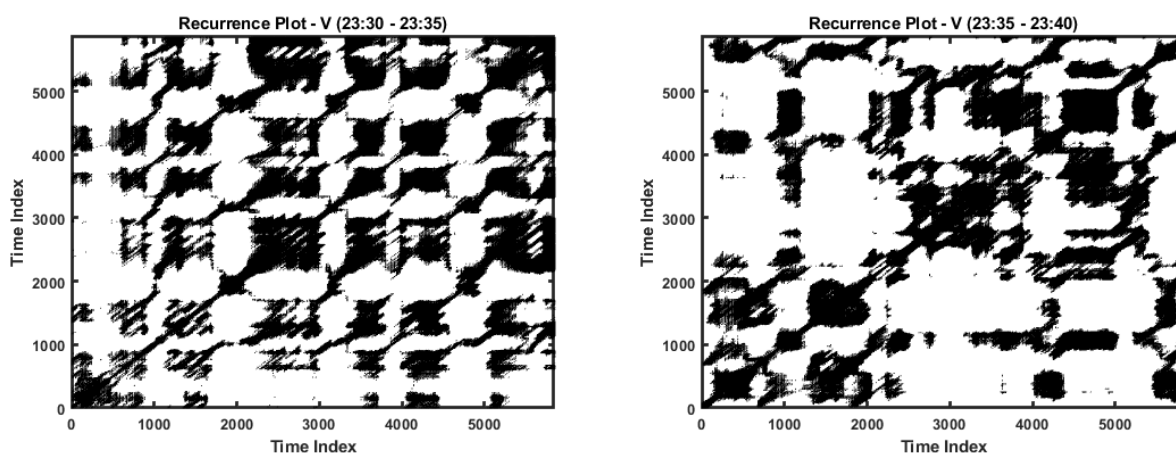


Figura 5. Os dois gráficos de recorrência representados (da esquerda para a direita) estão relacionados as séries temporais de velocidade V , o primeiro medido entre as 23:30-23:35 e o segundo entre as 23:35-23:40, ambos classificados dentro do regime turbulento 2 proposto por Sun et al., (2012). A série temporal possui 6000 pontos, equivalente a 5 minutos de medição. Para o RP da esquerda, foram utilizados $m = 6$, $\tau = 5$ s e $\varepsilon = 0.32$ e para o RP à direita, foram utilizados $m = 5$, $\tau = 4.0$ s e $\varepsilon = 0.34$.

Assim, os RPs capturam mudanças repentinas nos dados medidos, tanto que, para os dois gráficos dispostos na Figura 5, ambos relacionados ao regime turbulento 2, apresentaram resultados distintos. O gráfico da esquerda (23:30 – 23:35) apresentou menor taxa de recorrência $RR = 25.3$ (Tabela 1) quando comparado ao evento medido entre as 23:35-23:40, $RR = 31$ (Tabela 1).

A densidade dos pontos pretos nos gráficos foi caracterizada por maiores conglomerados de pontos, assim, é possível visualizar no gráfico à esquerda, que existem dois grandes estados, o primeiro está no intervalo de pontos aproximadamente entre 0-2000 e o segundo entre 2000-6000, e dentro desses dois maiores estados, outros microestados. A hipótese sugerida é de se

tratar da captura do caráter fractal e multifractal da turbulência atmosférica. Tanto que nessa ruptura entre dois estados mais marcantes, há uma queda na intensidade de V (linha vermelha da Figura 2), que se mantém durante alguns segundos, voltando a ter sua intensidade aumentada no estado seguinte. O regime 2, mais intenso, V (23:30-23:35), tem mais “conglomerados”, absolutamente, um pequeno para cada valor mínimo e máximo no transcorrer do evento.

Valores obtidos para DET, LAM e $L_{máx}$ estão relacionados a previsibilidade da série temporal. Assim, os resultados calculados, apresentados na Tabela 1, foram respectivamente $DET = 78.6$, $LAM = 85.9$ e $L_{máx} = 4476$ (23:30-23:35) e $DET = 87.5$, $LAM = 91.8$ e $L_{máx} = 3573$ (23:35-23:40). Entre as duas séries

analisadas para o regime 2, a com menor intensidade de V (23:35-23:40) possui maior previsibilidade baseado no valor de DET, assim como uma maior laminaridade, uma vez que quanto maior o valor de LAM, maior ocorrência de estados recorrentes (que não mudam com o tempo).

Porém, a série V (23:35-23:40) diverge sua trajetória no espaço de fase mais rapidamente que a série anterior, visto os valores de $L_{máx}$. O comprimento médio das linhas verticais assevera essa conclusão, visto que o valor de TT é maior em V (23:35-23:40), indicando um período de permanência maior do sistema no estado laminar.

A ENTR que é um indicador da complexidade do sistema dinâmico, cresce à medida que a intensidade da V diminui (Tabela 1) para as séries temporais analisadas, tal fenômeno pode ocorrer, segundo Draxl et al., (2014), Mahrt (2014) e Van de Wiel et al., (2002), quando no período noturno, a camada limite atmosférica, altamente estável, pode ocasionar o desenvolvimento de inversões térmicas, em que o ar frio fica retido próximo à superfície sob uma camada de ar mais quente, suprimindo a mistura vertical e inibindo a dissipação da turbulência, resultando em padrões de fluxo mais complexos próximos à superfície. Essa maior complexidade é observada durante noites calmas e com céu claro. Esses resultados obtidos para a ENTR para a variável V estão de acordo com o resultado obtido para T_v . À medida que a V diminuiu, a T_v aumentou, e com isso, o valor para a entropia de informação de Shannon, ENTR (Tabela 2).

O regime de turbulência 3, caracterizado por valores intermediários de V em relação ao

regime 2. É possível visualizar no gráfico das séries temporais (Figura 3) de V (plotados em verde e rosa), que tais séries estão entre os regimes 1 e 2. A Figura 6 mostra os RPs para as duas séries temporais que estão dentro desse regime. O RP para V (23:40-23:45) é topologicamente parecido com o RP da série temporal V (23:30-23:35) do regime 2. Porém, é visível um intervalo mais marcante quando ocorrem mudanças bruscas na série temporal, entre 1000-2000 pontos e 2500-2700 pontos, formando 3 conglomerados ao redor da LOI.

A série temporal V (23:45-23:50) possui uma topologia mais próxima aos RPs, dispostos na Figura 6, relacionados ao regime de turbulência 1. Segundo Kabiraj et al. (2015), tais estruturas com aspecto de pipa indica intermitência. Ao observar o gráfico da série temporal V plotado em rosa (Figura 3), é possível visualizar dois mínimos bem marcantes após os minutos 2 e 3, indicando uma transição no comportamento dos dados. Kabiraj et al. (2015) atribui a possibilidade que antes de eventos ‘tipo rajada’, possa ocorrer uma transição do comportamento de ciclo limite para padrões quase periódicos - uma tendência semelhante ao cenário de bifurcação.

Valores obtidos para DET, LAM e $L_{máx}$ relacionados aos regimes 1 e 3 não apresentaram diferenças marcantes entre si, porém, houve aumento para o valor da entropia à medida que a intensidade da velocidade do vento diminuía (Tabela 1). Porém, a maior duração do sistema no estado laminar foi visualizada durante o regime 3, para a série temporal V (23:45-23:50), com $TT = 29.9$.

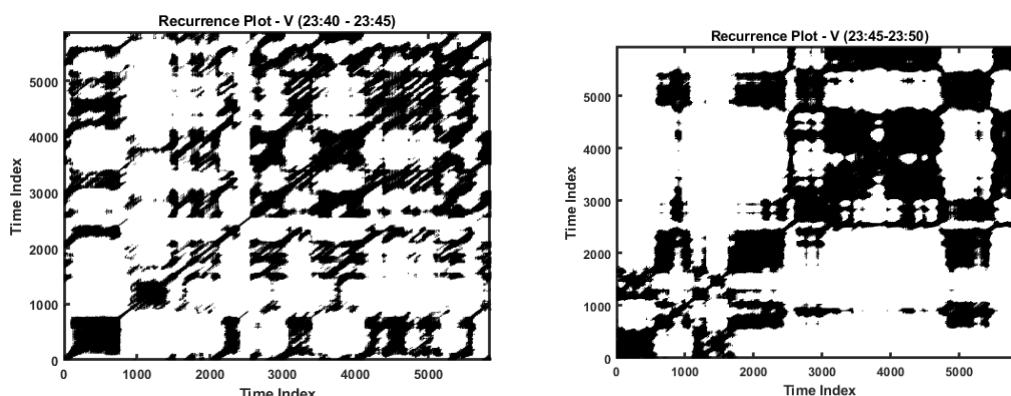


Figura 6: Os dois gráficos de recorrência representados (da esquerda para a direita) estão relacionados as series temporais de velocidade V , o primeiro medido entre as 23:40-23:45 e o segundo entre as 23:45-23:50, ambos classificados dentro do regime turbulento 3 proposto por Sun et al., (2012). A série temporal possui 6000 pontos, equivalente a 5 minutos de medição. Para o RP da esquerda, foram utilizados $m = 6$, $\tau = 5s$ e $\varepsilon = 0.34$ e para o RP à direita, foram utilizados $m = 5$, $\tau = 6.5s$ e $\varepsilon = 0.30$.

Todavia, para ambas as séries classificadas dentro do regime 3, a divergência da sua trajetória no espaço de fase são os mesmos, $L_{máx} = 5852$. A partir das características dos RPs, os três regimes turbulentos apresentaram propriedades de órbitas caóticas (Sales et al., 2023; Lang et al., 2023; Marwan et al., 2007). Outro destaque nas

características dos RPs apresentados nas Figuras 5, 6 e 7, deve-se distribuição de pontos pretos e brancos nos RPs, visto que são indicativos de estabilidade e similaridade dos estados do sistema em diferentes estágios de desgaste em um sistema de fricção (Lang et al., 2023), nesse caso, a dissipação devido ao atrito do dossel.

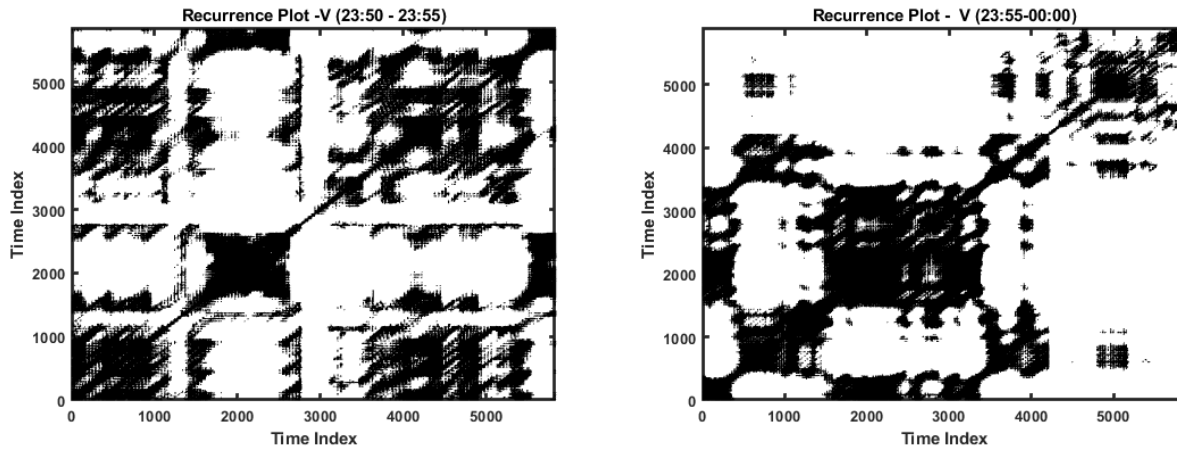


Figura 7: Os dois gráficos de recorrência representados (da esquerda para a direita) estão relacionados as séries temporais de velocidade V, o primeiro medido entre as 23:50-23:55 e o segundo entre as 23:55-00:00, ambos classificados dentro do regime turbulento 1 proposto por Sun et al., (2012). A série temporal possui 6000 pontos, equivalente a 5 minutos de medição. Para o RP da esquerda, foram utilizados $m = 5$, $\tau = 2s$ e $\varepsilon = 0.22$ e para o RP à direita, foram utilizados $m = 5$, $\tau = 1.5s$ e $\varepsilon = 0.20$.

Tabela 1- Resultados das análises de recorrência quantitativa (RQA) para os três regimes turbulentos. Regime turbulento 2 [V (23:30 – 23:35); V (23:35 – 23:40)], regime turbulento 3 [V (23:40 – 23:45); V (23:45 – 23:50)] e regime turbulento 1 [V (23:50 – 23:55); V (23:55 – 00:00)].

	RR	DET	$L_{máx}$	ENTR	LAM	TT
V (23:30-23:35)	25.1	78.6	4476	3.7	85.9	11.3
V (23:35-23:40)	31.0	87.5	3573	4.1	91.8	16.5
V (23:40-23:45)	32.1	89.6	5852	4.3	93	18.5
V (23:45-23:50)	29.6	94.5	5852	4.7	96.3	29.9
V (23:50-23:55)	33.3	88.3	5939	4.5	92.2	17.5
V (23:55-00:00)	30.4	90.3	5879	4.6	93.5	21.1

Segundo Lang et al., 2023, no estágio de desgaste estável (no caso dessa pesquisa, dissipação da energia cinética que está diretamente relacionada a V), a distribuição de áreas pretas nos gráficos de recorrência é relativamente uniforme, e a área de distribuição dos pontos pretos é muito maior do que a dos pontos brancos, o que indica

que os dois estados do sistema são altamente similares e a estrutura é estável, o que é explícito nos RPs para as séries temporais V (23:30-23:35), V (23:40-23:45) e V (23:50-23:55), ou seja, durante a transição entre dois regimes turbulentos.

O contrário é visto nas demais séries temporais, ou seja, quando o regime turbulento

aparentemente está mais consolidado (V (23:35-23:40), V (23:45-23:50) e V (23:55-00:00)) visto que é uma continuidade do mesmo regime detectado nos 5 minutos anteriores, os autores classificaram os RPs com essas características, cuja distribuição de áreas pretas e brancas nos gráficos de recorrência são desiguais e a quantidade de ‘pontos brancos’ é superior, como estágio de desgaste severo, visto que a estabilidade do estado do sistema é pobre. O estágio de desgaste severo é um sinal de que o sistema de fricção está se aproximando do fim de sua vida útil e pode precisar de manutenção (Lang et al., 2023), no caso da turbulência atmosférica, a hipótese sugerida seria a necessidade de uma retroalimentação turbulenta, por exemplo, a partir de sistemas downdraft (corrente descendente) ou downburst (rajada descendente).

Os RPs para a T_v mostrados nas Figuras 8, 9 e 10, calculados para os regimes 2, 3 e 1 respectivamente, apresentaram características topológicas distintas. Somente alguns períodos nos RPs apresentaram distribuição significativa de pontos pretos, indicando curtos períodos de estabilidade no sistema. Os valores dispostos na Tabela 2 confirmam essa afirmação, tanto que os resultados obtidos para $L_{máx}$ estão muito menores que os obtidas para a variável V , sendo essa uma das medidas relacionadas a previsibilidade.

As estruturas com aspecto de pipa nos RPs abalizam a intermitência atmosférica, visto que, as

variações na temperatura não ocorrem de forma contínua e uniforme, tanto que são bem localizados os retângulos escuros formados ao redor da LOI para os períodos com certas estabilidades no regime turbulento, intercalado por uma LOI com menores pontos agregados, capturando a mudança brusca de estado do sistema. É preciso recordar que o cálculo da intensidade da velocidade V leva em consideração o vento zonal u e meridional v , diferentemente da T_v , ou seja, apesar de haver uma relação inversa entre a V e T_v , não necessariamente refletirá em gráficos de recorrência opostos.

Os RPs para o regime 2 relacionados a T_v , aparentemente possui uma maior estabilidade no período das 23:30 - 23:35 (Figura 8), com uma transição marcante de regime entre 2000 e 2500 pontos, aproximadamente entre os minutos 1.6 e 2.1 que compreende o valor máximo precedido de uma queda na temperatura em torno de -1°C em poucos segundos. Entre o período de 23:35 - 23:40, a variabilidade da T_v foi menor, porém mais instável, tanto que o RP mostra uma taxa de recorrência de $RR=16.9$, bem menor que o valor dos 5 minutos anteriores referentes ao regime 2 (Tabela 2).

No geral, os resultados obtidos para T_v (Tabela 2), assevera a menor estabilidade dos dados quando comparados as séries temporais para a variável V .

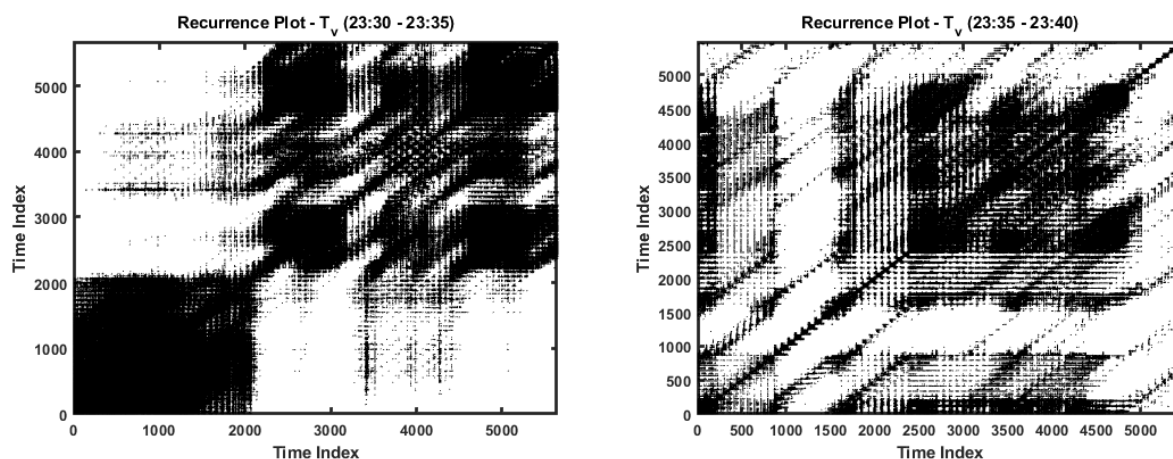


Figura 8. Os dois gráficos de recorrência representados (da esquerda para a direita) estão relacionados as séries temporais de temperatura virtual, T_v , o primeiro medido entre as 23:30-23:35 e o segundo entre as 23:35-23:40, ambos classificados dentro do regime turbulento 2 proposto por Sun et al., (2012). A série temporal possui 6000 pontos, equivalente a 5 minutos de medição. Para o RP da esquerda, foram utilizados $m = 6$, $\tau = 3\text{s}$ e $\varepsilon = 0.28$ e para o RP à direita, foram utilizados $m = 8$, $\tau = 3.8\text{s}$ e $\varepsilon = 0.28$.

As Figuras 9 e 10 possuem seus gráficos de recorrência com áreas brancas e pretas relativamente concentradas. Os RPs para os períodos T_v (23:45-23:50) e T_v (23:50-23:55) possuem uma maior distribuição de pontos branco

que de pontos pretos, indicando mudanças significativas na amplitude do sinal, e um regime turbulento pouco estável.

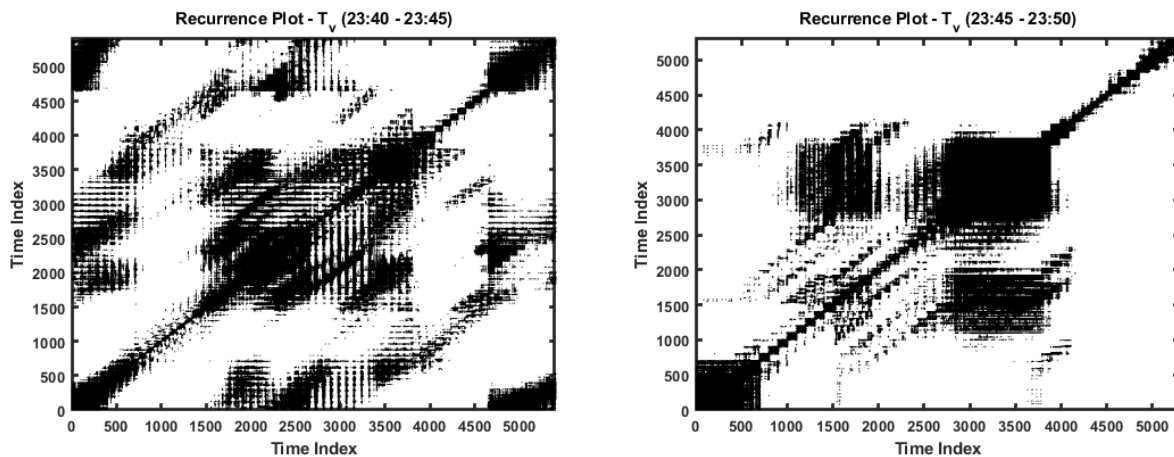


Figura 9: Os dois gráficos de recorrência representados (da esquerda para a direita) estão relacionados as series temporais de temperatura virtual, T_v , o primeiro medido entre as 23:40-23:45 e o segundo entre as 23:45-23:50, ambos classificados dentro do regime turbulento 3 proposto por Sun et al., (2012). A série temporal possui 6000 pontos, equivalente a 5 minutos de medição. Para o RP da esquerda, foram utilizados $m = 8$, $\tau = 4.25s$ e $\varepsilon = 0.28$ e para o RP à direita, foram utilizados $m = 8$, $\tau = 5s$ e $\varepsilon = 0.28$.

O regime 1, Figura 10 e período T_v (23:50-23:55) foi o regime que apresentou um significativo aumento na temperatura visto a menor média de V nesse período, resultando num maior valor para a entropia, ENTR, quando comparada as outras cinco séries temporais analisadas para a temperatura.

O período para T_v (23:55-00:00) apresentou maior estabilidade em relação ao regime 1 anterior, com quatro períodos de curta estabilidade e marcante intermitência, visto a característica dos gráficos de recorrência.

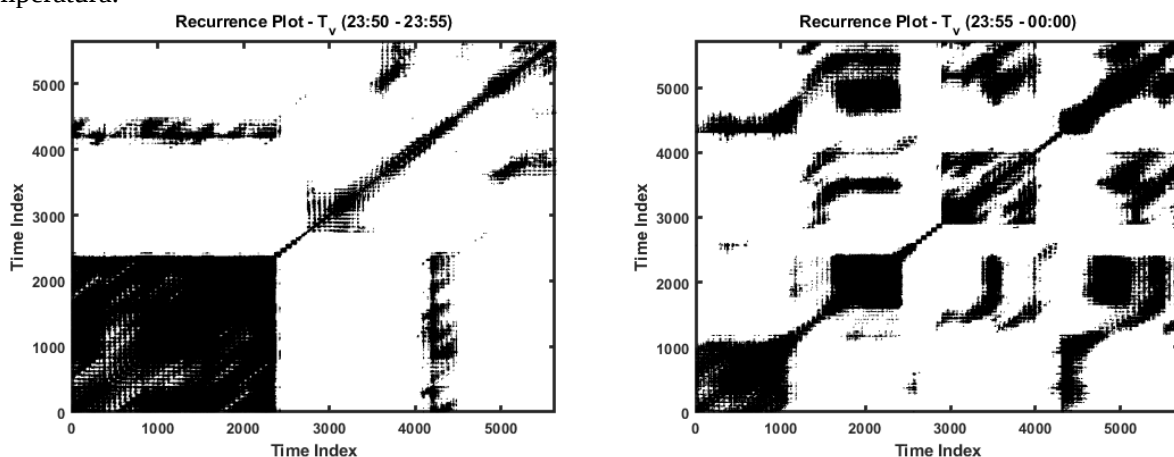


Figura 10: Os dois gráficos de recorrência representados (da esquerda para a direita) estão relacionados as series temporais de temperatura virtual T_v , o primeiro medido entre as 23:50-23:55 e o segundo entre as 23:55-00:00, ambos classificados dentro do regime turbulento 1 proposto por Sun et al., (2012). A série temporal possui 6000 pontos, equivalente a 5 minutos de medição. Para o RP da esquerda, foram utilizados $m = 7$, $\tau = 3s$ e $\varepsilon = 0.23$ e para o RP à direita, foram utilizados $m = 6$, $\tau = 3s$ e $\varepsilon = 0.26$.

Tabela 2 - Resultados das análises de recorrência quantitativa (RQA) para os três regimes turbulentos. Regime turbulento 2 [T_v (23:30 – 23:35); T_v (23:35 – 23:40)], regime turbulento 3 [T_v (23:40 – 23:45); T_v (23:45 – 23:50)] e regime turbulento 1 [T_v (23:50 – 23:55); T_v (23:55 – 00:00)].

	RR	DET	$L_{máx}$	ENTR	LAM	TT
$T_v(23:30-23:35)$	30.1	65.4	458	3.2	76.4	8.7
$T_v(23:35-23:40)$	16.9	60.7	1401	3.1	73.6	8.3
$T_v(23:40-23:45)$	16.6	67.6	1004	3.5	77.8	10.0
$T_v(23:45-23:50)$	20.0	86.2	2911	4.3	90.5	22.1
$T_v(23:50-23:55)$	26.6	86.2	2586	4.4	90.3	19.2
$T_v(23:55-00:00)$	24.4	83.7	2804	4.2	88.7	17.9

Conclusões

Este estudo avançou no entendimento dos regimes turbulentos noturnos, aplicando RPs e RQA para desvendar os padrões complexos da turbulência na camada limite atmosférica. Os resultados confirmaram a influência do cisalhamento do vento e da estratificação térmica nos regimes de turbulência, validando a teoria HOST.

Observou-se uma maior estabilidade nas séries temporais de velocidade do vento em comparação com a temperatura virtual, sugerindo uma interação mais dinâmica entre a turbulência e a transferência de calor. As características de deriva e descontinuidade identificadas nos RPs ressaltaram a natureza não estacionária da atmosfera e a ocorrência de eventos turbulentos extremos, potencialmente ligados a processos convectivos e correntes descendentes. Este estudo não só reforça a aplicabilidade dos RPs e da RQA como ferramentas para analisar dados atmosféricos, mas também fornece elementos que podem contribuir para modelos climáticos mais precisos e para o entendimento dos mecanismos que governam a qualidade do ar noturno e a dispersão de poluentes na camada limite planetária.

Apesar dos avanços proporcionados por este estudo na compreensão dos regimes de

turbulência noturnos, é notável algumas limitações que abrem caminhos para futuras investigações.

A principal limitação reside na representatividade temporal dos dados, uma vez que a série de medições foi restrita a um único período de ano na região amazônica. Pesquisas adicionais poderiam expandir a análise para incluir uma gama mais ampla de condições sazonais e até diurnas para verificar a universalidade dos padrões observados. Ademais, o estudo se concentrou em uma única região, e portanto, pesquisas futuras poderiam se beneficiar da comparação entre dados de diferentes localidades para entender a influência das variações geográficas na dinâmica da turbulência. Também, os efeitos da resolução dos dados na aplicação dos RPs e da RQA poderiam ser mais explorados, uma vez que a escolha de parâmetros pode influenciar a interpretação dos regimes de turbulência.

Por fim, sugere-se a integração de medições de outras variáveis atmosféricas, como a umidade e a concentração de CO_2 , para uma compreensão mais completa das interações entre a turbulência e os processos de troca na camada limite planetária. Estes esforços poderão aprimorar ainda mais os modelos de previsão meteorológica e climática, contribuindo para uma gestão mais eficaz da qualidade do ar e das respostas às mudanças climáticas.

Referências

- Abraham, C., Goldblatt, C., (2023). Changes in relative humidity profiles over Earth's oceans in a warming climate: a satellite data-based inference. *Journal of the Atmospheric Sciences*. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-22-0119.1>
- Almeida-Ñauñay, A. F., Benito, R. M., Quemada, M., Losada, J. C., & Tarquis, A. M., (2021). The vegetation-climate system complexity through recurrence analysis. *Entropy*, 23(5), 559. <https://doi.org/10.3390/e23050559>
- Ayoade, J. O., (1983). *Introduction Climatology for the Tropics*. Chichester: Wiley.
- Banerjee, A., Goswami, B., Marwan, N., Merz, B., & Kurths, J., (2021). Recurrence based coupling analysis between event-like data and continuous data. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (pp. EGU21-14831). <https://doi.org/10.5194/npg-28-213-2021>
- Chowdhuri, S., Kalmár-Nagy, T., & Banerjee, T. (2020). Persistence analysis of velocity and temperature fluctuations in convective surface layer turbulence. *Physics of Fluids*, 32(7). <https://doi.org/10.1063/5.0013911>
- Cruz, M. T., Simpas, J. B., Sorooshian, A., Betito, G., Cambaliza, M. O. L., Collado, J. T., ... & Bagtasa, G. (2023). Impacts of regional wind circulations on aerosol pollution and planetary boundary layer structure in Metro Manila, Philippines. *Atmospheric Environment*, 293, 119455. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119455>
- Dey, S., Y., Zeng, Q., Hu, F., Ding, W., Zhang, Z., Zhang, K., & Liu, L. (2023). Different Turbulent Regimes and Vertical Turbulence Structures of the Urban Nocturnal Stable Boundary Layer. *Advances in Atmospheric Sciences*, 40(6), 1089-1103. <https://doi.org/10.1007/s00376-022-2198-8>
- Draxl, C., Hahmann, A. N., Peña, A., Giebel, G., (2014). Evaluating winds and vertical wind shear from Weather Research and Forecasting model forecasts using seven planetary boundary layer schemes. *Wind Energy*, 17(1), 39-55. <https://doi.org/10.1002/we.1555>
- Foken, T. (2008). The energy balance closure problem: an overview. *Ecological Applications*, 18(6), 1351-1367. <https://doi.org/10.1890/06-0922.1>
- Foken, T., Wimmer, F., Mauder, M., Thomas, C., & Liebethal, C. (2006). Some aspects of the energy balance closure problem. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(12), 4395-4402. <https://doi.org/10.5194/acp-6-4395-2006>
- Fragkou, A. D., Karakasidis, T. E. & Sarris, I. E., (2019). Recurrence quantification analysis of MHD turbulent channel flow. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 531, 121741 <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.121741>
- Franklin, K. B., Wang, Q., Jiang, Q., & Shen, L. (2022). Understanding evaporation duct variabilities on turbulent eddy scales. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(22), e2022JD036434. <https://doi.org/10.1029/2022JD036434>
- Fuentes, J. D., Chamecki, M., Nascimento dos Santos, R. M., Randow, C. V., Stoy, P. C., Katul, G., ... & Yañez-Serrano, A. M. (2016). Linking meteorology, turbulence, and air chemistry in the Amazon rain forest. *B. Am. Meteorol. Soc.*, 97, 2329-2342. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00152.1>
- Garstang, M., Fitzjarrald, D. R., (1999). *Observations of surface to atmosphere interactions in the tropics*. Oxford University Press, USA.
- Guimarães-Filho, Z. D. O., Caldas, I. L., Viana, R. L., Nascimento, I. C., Kuznetsov, Y. K., & Kurths, J. (2010). Recurrence quantification analysis of turbulent fluctuations in the plasma edge of Tokamak Chauffage Alfvén Brésilien tokamak. *Physics of Plasmas*, 17(1). <https://doi.org/10.1063/1.3280010>
- Hao, X., Cao, T., & Shen, L. (2021). Mechanistic study of shoaling effect on momentum transfer between turbulent flow and traveling wave using large-eddy simulation. *Physical Review Fluids*, 6(5), 054608. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.6.054608>
- Hegger, R., Kantz, H., Schreiber, T., 1999. Practical implementation of nonlinear time series methods: The TISEAN package. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 9(2), 413-435. <https://doi.org/10.1063/1.166424>
- Hooijdonk, I., Donda, J., Clercx, H., Bosveld, F., & Wiel, B. (2015). Shear capacity as prognostic for nocturnal boundary layer regimes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 72(4), 1518-1532. <https://doi.org/10.1175/jas-d-14-0140.1>
- Huffaker, R. G., Huffaker, R., Bittelli, M., & Rosa, R. (2017). *Nonlinear time series analysis with R*. Oxford University Press.
- Kabiraj, L., Saurabh, A., Nawroth, H., Paschereit, C. O., Sujith, R. I., & Karimi, N. (2016).

- Recurrence plots for the analysis of combustion dynamics. In *Recurrence Plots and Their Quantifications: Expanding Horizons: Proceedings of the 6th International Symposium on Recurrence Plots*, Grenoble, France, 17-19 June 2015 (pp. 321-339). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29922-8_17
- Kantz, H., & Schreiber, T. (2004). *Nonlinear time series analysis* (Vol. 7). Cambridge university press.
- Kecik, K., Cicielag, K., & Zaleski, K. (2017). Damage detection of composite milling process by recurrence plots and quantifications analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89, 133-144. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9048-8>
- Kennel, M. B., Brown, R., & Abarbanel, H. D., (1992). Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using a geometrical construction. *Physical review A*, 45(6), 3403. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.45.3403>
- Kolmogorov, A. N. (1995). *Turbulence: the legacy of AN Kolmogorov*. Cambridge University Press. ISSN 0-521-45713-0. ISBN 0-521-45103-5.
- Kondo, J., Kanechika, O., & Yasuda, N. (1978). Heat and momentum transfers under strong stability in the atmospheric surface layer. *Journal of Atmospheric Sciences*, 35(6), 1012-1021. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1978\)035<1012:HAMTUS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1978)035<1012:HAMTUS>2.0.CO;2)
- Lang, S., Zhu, H., & ling Wei, C., (2023). Study on the boundedness, stability and dynamic characteristics of friction system based on fractal and chaotic theory. *Tribology International*, 180, 108228. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108228>
- LBA, 2015. Seminário "Experimento GoAmazon/LBA - Resultados e Perspectivas Futuras". <https://lba2.inpa.gov.br/index.php/ultimas-noticias/165-semin%C3%A1rio-experimento-go-amazon-lba-resultados-e-perspectivas-futuras.html>
- Lenschow, D. H., & Hicks, B. B. (1989, May). Global tropospheric chemistry: Chemical fluxes in the global atmosphere. In *Workshop on Measurements of Surface Exchange and Flux Divergence of Chemical Species in the Global Atmosphere* (No. NASA-CR-186090). <https://ntrs.nasa.gov/citations/19900002793>
- Lumley, J. L., & Yaglom, A. M. (2001). A century of turbulence. *Flow, turbulence and combustion*, 66, 241-286. <https://doi.org/10.1023/A:1012437421667>
- Mahrt, L. (1999). Stratified atmospheric boundary layers. *Boundary-Layer Meteorology*, 90, 375-396. <https://doi.org/10.1023/A:1001765727956>
- Mahrt, L. (2014). Stably stratified atmospheric boundary layers. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 46, 23-45. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010313-141354>
- Martins, L., Degrazia, G., Acevedo, O., Puhales, F., Oliveira, P., Teichrieb, C., ... & Silva, S. (2018). Quasi-experimental determination of turbulent dispersion parameters for different stability conditions from a tall micrometeorological tower. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57(8), 1729-1745. <https://doi.org/10.1175/jamc-d-17-0269.1>
- Marwan, N. (2008). A historical review of recurrence plots. *The European Physical Journal Special Topics*, 164(1), 3-12. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2008-00829-1>
- Marwan, N., (2023). Challenges and perspectives in recurrence analyses of event time series. *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*, 9, 1129105. <https://doi.org/10.3389/fams.2023.1129105>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2006.11.001>
- Marwan, N., Thiel, M., & Nowaczyk, N. R. (2002). Cross recurrence plot based synchronization of time series. *Nonlinear processes in Geophysics*, 9(3/4), 325-331. <https://doi.org/10.5194/npg-9-325-2002>
- Miranda, F. O. (2017). *Deteção de fenômenos extremos na camada limite atmosférica noturna acima da floresta Amazônica a partir da análise de sinais precursores*. [Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia]. Repositório Digital da INPA. <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/12970>
- Miranda, F. O., de Abreu Sá, L. D., von Randow, C., Ramos, F. M., & Manzi, A. O., (2020). Picos na velocidade do vento e sua relação com aumentos em fluxos de escalares na atmosfera tropical noturna: Estudo de caso. *Ciência e Natura*, 42, e12-e12. http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/11.25.12.06/doc/miranda_picos.pdf

- Poincaré, H., & Sémirot, P. (1952). Analyse de ses travaux scientifiques, par Henri Poincaré (Acta Math., t. 38, 1921, p. 110-114-115). <https://rcin.org.pl/impan/dlibra/publication/edit/212907#description>
- Sales, M. R., Mugnaine, M., Szezech, J. D., Viana, R. L., Caldas, I. L., Marwan, N., & Kurths, J., (2023). Stickiness and recurrence plots: An entropy-based approach. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 33(3). <https://doi.org/10.1063/5.0140613>
- Selskii, A., Drapkina, O., Agaltsov, M., Posnenkova, O., Simonyan, M., Zhuravlev, M., & Runnova, A. (2023). Adaptation of recurrence plot method to study a polysomnography: changes in EEG activity in obstructive sleep apnea syndrome. *The European Physical Journal Special Topics*, 232(5), 703-714. <https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-023-00814->
- Shi, Y., Zeng, Q., Hu, F., Ding, W., Zhang, Z., Zhang, K., & Liu, L. (2023). Different Turbulent Regimes and Vertical Turbulence Structures of the Urban Nocturnal Stable Boundary Layer. *Advances in Atmospheric Sciences*, 40(6), 1089-1103. <https://doi.org/10.1007/s00376-022-2198-8>
- Sous, D., Sommeria, J., & Boyer, D. (2013). Friction law and turbulent properties in a laboratory ekman boundary layer. *Physics of Fluids*, 25(4). <https://doi.org/10.1063/1.4802045>
- Spiga, A., & Forget, F. (2009). A new model to simulate the Martian mesoscale and microscale atmospheric circulation: Validation and first results. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 114(E2). <https://doi.org/10.1029/2008JE003242>
- Sun, J., Lenschow, D. H., LeMone, M. A., & Mahrt, L. (2016). The role of large-coherent-eddy transport in the atmospheric surface layer based on CASES-99 observations. *Boundary-layer meteorology*, 160, 83-111. <https://doi.org/10.1007/s10546-016-0134-0>
- Sun, J., Mahrt, L., Banta, R. M., & Pichugina, Y. L., (2012). Turbulence regimes and turbulence intermittency in the stable boundary layer during CASES-99. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 69(1), 338-351. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-11-082.1>
- Twine, T., Kustas, W., Norman, J., Cook, D., Houser, P., Meyers, T., ... & Wesely, M. (2000). Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103(3), 279-300. [https://doi.org/10.1016/s0168-1923\(00\)00123-4](https://doi.org/10.1016/s0168-1923(00)00123-4)
- Van As, D., Van Den Broeke, M. R., & Helsen, M. M. (2007). Strong-wind events and their impact on the near-surface climate at Kohnen Station on the Antarctic Plateau. *Antarctic Science*, 19(4), 507-519. <https://doi.org/10.1017/S095410200700065X>
- Van de Wiel, B. J. H., Moene, A. F., Jonker, H. J. J., Baas, P., Basu, S., Donda, J. M. M., ... & Holtslag, A. A. M. (2012). The minimum wind speed for sustainable turbulence in the nocturnal boundary layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 69(11), 3116-3127. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-0107.1>
- Van de Wiel, B. J. H., Moene, A. F., Ronda, R. J., De Bruin, H. A. R., & Holtslag, A. A. M. (2002). Intermittent turbulence and oscillations in the stable boundary layer over land. Part II: A system dynamics approach. *Journal of the atmospheric sciences*, 59(17), 2567-2581. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2002\)059<2567:ITAOIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2002)059<2567:ITAOIT>2.0.CO;2)
- Vickers, D., & Mahrt, L. (2003). The cospectral gap and turbulent flux calculations. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 20(5), 660-672. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2003\)20<660:TCGATF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2003)20<660:TCGATF>2.0.CO;2)
- Webber, C. L., Marwan, N., (2015). Recurrence quantification analysis. *Theory and Best Practices*, 426. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-07155-8>
- Webber, 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. <https://www.nsf.gov/pubs/2005/nsf05057/nmbs/chap2.pdf>
- Xin, L., Fei, H., Gang, L., & Zhongxiang, H. (2001). Multi-scale fractal characteristics of atmospheric boundary-layer turbulence. *Advances in Atmospheric Sciences*, 18(5), 787-792. <https://doi.org/10.1007/BF03403502>
- Yus-Díez, J., Udina, M., Soler, M. R., Lothon, M., Nilsson, E., Bech, J., & Sun, J. (2019). Nocturnal boundary layer turbulence regimes analysis during the BLLAST campaign. *Atmospheric Chemistry and*

- Physics, 19(14), 9495-9514.
<https://doi.org/10.5194/acp-19-9495-2019>
- Živković, T., & Rypdal, K. (2008). Experimental evidence of low-dimensional chaotic convection dynamics in a toroidal magnetized plasma. *Physical Review E*, 77(3), 037401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.77.037401>
- Zurlini, G., Marwan, N., Semeraro, T., Jones, K. B., Aretano, R., Pasimeni, M. R., ... Petrosillo, I., (2018). Investigating landscape phase transitions in Mediterranean rangelands by recurrence analysis. *Landscape Ecology*, 33, 1617-1631. <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0693-1>