



Espectroscopia por ressonância magnética (MRS) para quantificação GABA: compreendendo a representação por espectrograma para aperfeiçoar o treinamento de um modelo de reconstrução baseado em Deep-Learning

Letícia Levin Diniz, Profa. Dra. Letícia Rittner
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC),
Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)
Campinas, Brasil

Palavras-chave—Espectroscopia por Ressonância Magnética, Transformada de Fourier de Curto Tempo, Representação de Sinais

I. INTRODUÇÃO

O ácido gama-aminobutírico (GABA) é o principal neurotransmissor inibitório do sistema nervoso humano e distúrbios nos níveis de GABA estão relacionados a diversas doenças tais como esquizofrenia, depressão e ansiedade [1]. Dada sua relevância clínica, existe um amplo interesse na quantificação de GABA. A única técnica *in vivo* disponível para esse fim é a espectroscopia por ressonância magnética (MRS), que permite a quantificação de metabólitos em diversos tecidos e órgãos [2].

O objeto de estudo da MRS é um sinal de decaimento de indução livre (FID), cujo espectro em frequência, obtido através da Transformada de Fourier (FT), apresenta picos em diferentes frequências, cada uma correspondendo a um metabólito. A quantificação dos metabólitos é dada pela área do pico na parte real do espectro [3]. No entanto, o pico de GABA é normalmente sobreposto pelos picos de outros metabólitos de maior concentração. Desse modo, a quantificação do neurotransmissor requer o uso da técnica MEGA-PRESS, na qual dois transientes, FID-on e FID-off, são adquiridos de modo que o espectro de sua diferença elimina o efeito dos metabólitos indesejados [4]. Esse espectro GABA-editado apresenta o pico de GABA em 3 partes-por-milhão (ppm¹). Além do GABA, outros metabólitos aparecem no espectro, dentre eles, NAA (2,02 ppm) e Glx (3,75 ppm) formam picos que servem de referência para avaliar qualidade do espectro e estimar concentrações [5].

A aplicação clínica da MRS é limitada devido a baixa razão sinal-ruído (SNR) dos transientes. Para que os espectros se tornem adequados para uso clínico, uma aquisição de MRS é na realidade composta por múltiplos transientes, e o espectro final é dado pela FT da média dos transientes. No caso do espectro de GABA, recomenda-se a aquisição de 320 transientes (160 on e 160 off) [4]. Isso torna as aquisições demoradas e desconfortáveis, dificultando o planejamento e aumentando as chances de movimentação do paciente, o que

leva a transientes com aberrações e diminui a qualidade do espectro final.

Afim de contornar esse problema, o desafio *Edited-MRS Reconstruction Challenge* promoveu em 2023 a utilização de modelos de *Deep-Learning* para a reconstrução do espectro de GABA utilizando somente 80 transientes [6]. O grupo ganhador propôs o modelo SpectroVit, que utiliza a Transformada de Fourier de Curto Tempo (STFT) dos transientes para representá-los pelo espectrograma, uma imagem com informações temporais e frequenciais do sinal [7]. Tal ideia inovadora gerou curiosidade sobre a representação de sinais de espectroscopia no domínio do espectrograma, uma representação ainda pouco explorada no contexto de MRS.

O objetivo deste trabalho é caracterizar as imagens do espectrograma de GABA com relação aos parâmetros de geração da STFT e às características dos próprios transientes. A compreensão de tal representação deve auxiliar no desenvolvimento de técnicas de treinamento que aprimorem a performance e robustez do SpectroVit, além de contribuir para a explicabilidade do mesmo, fator crítico para a adesão da ferramenta no contexto clínico.

II. TRANSFORMADA DE FOURIER DE CURTO TEMPO (STFT)

A STFT de sinais digitais é definida pela Equação (1), onde S é uma função de duas variáveis discretas q e p que correspondem respectivamente ao eixo das frequências e do tempo, N é a quantidade de pontos do sinal temporal x e w é uma janela no domínio do tempo. A ideia da STFT é a construção de uma função bidimensional a partir de uma janela que desliza ao longo de x , e calcula, em cada posição, a FT da parte do sinal englobada pela janela. Assim, diferentemente da FT, que considera toda a extensão do sinal para caracterizá-lo na frequência, a STFT apresenta como as características frequenciais do sinal evoluem ao longo do tempo (Fig. 1). Sendo uma função bidimensional, a STFT pode ser entendida como uma imagem, referida como espectrograma, onde as linhas correspondem a intervalos de frequência, e as colunas, às posições da janela no tempo.

$$S[q, p] = \sum_{k=0}^{N-1} x[k] \overline{w[k - ph]} e^{-j2\pi \frac{qk}{N}} \quad (1)$$

¹Unidade de medida de deslocamento químico. Obtida de uma transformação linear sobre o eixo das frequências e utilizada para permitir a comparação entre espectros adquiridos em condições magnéticas diferentes.

Implementações computacionais da STFT envolvem três principais parâmetros: o tipo de janela (*win*), o passo da janela (*hop*), i.e., a distância que ela percorre entre duas posições, e o tamanho da janela (*mfft*), que é igual à quantidade de frequências consideradas².

III. ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO DO ESPECTROGRAMA

Como este ainda é um projeto em andamento, discute-se apenas os resultados iniciais da caracterização do espectrograma de GABA a partir de seus parâmetros de geração. Para tal caracterização foram utilizados 100 pares simulados de transientes GABA-editados on-off com duração de 1s compostos por $N = 2048$ pontos e obtidos em [8]. No entanto, espectros de GABA reais são médias de vários sinais adquiridos. Assim, uma questão inicial deste projeto é se o estudo das características do espectrograma de um único par simulado on-off pode representar as características do espectrograma de transientes GABA-editados reais. Para lidar com essa questão, realizou-se estudos para dois tipos de sinais, os quais são referidos como sinais *gt* e *ns*. Um transiente gt_j é dado pela diferença de um par simulado: $FID_{on,j} - FID_{off,j}$. Já um transiente ns_j é dado pela seguinte média

$$\frac{1}{N_g} \sum_{k=1}^{N_g} (FID_{on,j,\sigma_j,k} - FID_{off,j,\sigma_j,k}),$$

onde $FID_{*,j,\sigma_j,k}$ corresponde a k -ésima repetição do transiente $FID_{*,j}$ na qual se adiciona um ruído branco $\mathcal{N}(0, \sigma_j)$. Considera-se $N_g = 160$ e 100 valores de σ_j são obtidos aleatoriamente de uma distribuição uniforme $\mathcal{U}[4, 8)$. Tais valores foram escolhidos por reproduzirem espectros médios cujo SNR se iguala ao valor de referência em [9] quando pré-processados da mesma maneira.

No contexto desse estudo existem cinco parâmetros para a geração do espectrograma de GABA, os parâmetros da STFT: *win*, *hop* e *mfft*, a parte (*p*) da STFT utilizada para a formação da imagem (parte real, imaginária, magnitude ou fase) e a normalização aplicada a imagem (*norm*). Neste texto, foi investigada inicialmente a influência dos parâmetros *hop* e *mfft* nas características do espectrograma de GABA. Para isso fixou-se *p* igual a parte real da STFT ($Re(STFT)$), uma vez que a análise do espectro de GABA é normalmente feita considerando apenas a parte real da FT (Fig. 1). Além disso, baseado na escolha de parâmetros utilizada em [7], fixou-se *win* igual a janela Hanning e *norm* igual a $Re(STFT)/Max(Abs(STFT))$, onde $Max(Abs(\cdot))$ refere-se ao maior valor da magnitude da STFT.

Desse modo, para cada tipo de sinal (*gt* ou *ns*) foram realizados os seguintes estudos: o efeito da variação de *hop* entre 2 e 128 com passo de 2 para $mfft = 512$, e o efeito da variação de *mfft* entre 32 e 1024 com passo de 20, considerando *hop* = 8. Para caracterizar o efeito dos parâmetros sobre tais imagens, além da observação visual, foram utilizadas as seguintes métricas:

- **Largura a meia altura (FWHM):** a projeção dos valores absolutos da imagem no eixo das frequências corresponde a $projS_q = \sum_{p=1}^{N_p} |S[p, q]|$, onde N_p é número de colunas da imagem. Como tal projeção soma a contribuição de todos os instantes de tempo, ela leva

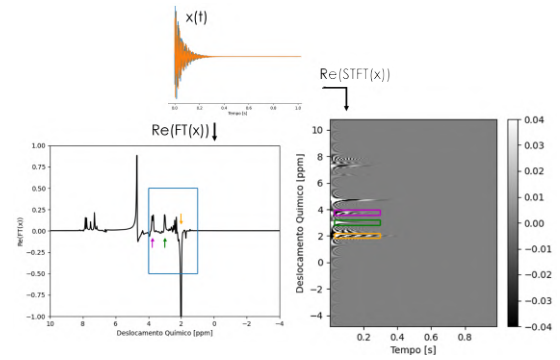


Figura 1: Exemplo de espectro e espectrograma de GABA. Ao topo, parte real (azul) e imaginária (laranja) do sinal $x = FID_{on} - FID_{off}$. A FT de x corresponde ao espectro de GABA, cuja parte real é apresentada a esquerda. A STFT de x corresponde ao espectrograma de GABA, cuja parte real é apresentada a direita. Setas e retângulos magenta, verde e amarelo indicam, respectivamente, os picos de Glx, GABA e NAA.

a obtenção de um sinal semelhante a um espectro. A medição da FWHM dos picos de GABA, NAA e Glx serve como uma métrica que reflete a percepção visual da resolução em frequência, pois imagens que apresentam melhor resolução frequencial deveriam levar a projeções com picos mais finos. Desconsidera-se aqui a questão da altura do pico como uma fonte de informação a respeito da resolução em frequência, pois a altura é amplamente influenciada pela quantidade de colunas da imagem. Para o cálculo automático da FWHM, define-se um algoritmo que detecta um máximo local H na região próxima dos picos indicados. A partir do ponto de máximo, percorre-se ambas laterais para encontrar os dois pontos cujo valor da projeção é o mais próximo de $H/2$.

- **Taxa de cruzamento com zero (ZCR):** alguns picos da parte real do espectrograma de GABA tendem a serem listrados, enquanto outros aparecem com uma única cor. Buscando entender quais parâmetros influenciam esse padrão de cor, observa-se a ZCR obtida considerando as linhas correspondentes aos picos de GABA, NAA e Glx, as quais estão associadas as linhas mais próximas de 3 ppm, 2,02 ppm e 3,75 ppm, respectivamente. Define-se a ZCR como a quantidade de vezes que os pixels da linha trocam de sinal até o instante $t = 0,4s$ dividido pela quantidade de colunas existentes até esse instante.

Nota-se que, no estudo de imagens, a resolução está associada à quantidade de colunas e linhas da mesma. No entanto, o uso da FWHM busca a definição de uma métrica que possa representar a resolução frequencial percebida visualmente. Não foi possível encontrar uma métrica análoga para a resolução temporal percebida. Assim, discussões à respeito da resolução temporal consideram a quantidade de colunas e a nitidez das fronteiras horizontais para tal - uma imagem com baixa resolução temporal apresenta fronteiras "borradas" ao longo de uma linha. No restante deste texto, discussões sobre resoluções em frequência e no tempo se referem a resolução percebida visualmente. Além disso, todos os valores reportados consideram os valores médios das métricas obtidos considerando as 100 amostras de cada tipo de sinal (*gt* ou *ns*).

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A. Variação do Passo da Janela: *hop*

Observando os espectrogramas de GABA obtidos com diferentes valores de *hop* (Fig. 2), nota-se que o número

²<https://docs.scipy.org/doc/scipy/tutorial/signal.html#short-time-fourier-transform>

de colunas da imagem diminui conforme hop aumenta, concentrando toda a informação temporal do sinal em poucas janelas. Comparando as imagens geradas a partir de sinais gt e de sinais ns , observa-se que a segunda apresenta um padrão "ondulatório" ao fundo, o qual não aparece na primeira, podendo ser atribuído ao efeito do ruído presente nos sinais ns . Além disso, observa-se que os picos mais intensos (em preto e branco) ocorrem sempre para as mesmas linhas, independentemente de hop ou da origem do sinal (gt ou ns). Apesar disso, os padrões de listras que compõem os picos se alteram para diferentes $hops$, com exceção do pico de GABA visto em 3 ppm, o qual sempre se apresenta branco com um contorno preto.

Os picos de menor intensidade (em tons de cinza) se multiplicam e se tornam cada vez mais finos com o aumento de hop (Fig. 2) em ambos os casos (gt ou ns). Esse comportamento é notável na região entre 5 e 7 ppm, e sugere uma mudança na resolução frequencial de tais picos. Porém, a "grosseira" dos picos mais intensos não parece variar com hop . Essa observação é complementada pela análise da métrica FWHM (Fig. 3). Nota-se que enquanto os picos de NAA e GABA tem um único ponto central mais elevado (Fig.3(b)), o pico de Glx é composto pela sobreposição de dois picos, o que dificulta o reconhecimento automático dos pontos de meia altura, tornando as medições de FWHM do pico de Glx pouco confiáveis (Fig.3(c)). No entanto, para os picos de GABA e NAA, o reconhecimento da meia altura se mostra bem coerente, dando credibilidade as curvas de FWHM em função de hop de tais picos, as quais corroboram com a observação dos espectrogramas (Fig. 2) de que a resolução frequencial de picos intensos não se altera com hop . Nota-se apenas uma exceção para a FWHM do pico de GABA obtida para sinais do tipo gt , a qual diminui para valores de hop muito elevados.

Finalmente, a Figura 4 apresenta o estudo da variação da métrica ZCR com relação a hop . Para quase todo valor de hop , ZCR é nulo para o pico de GABA, o que corrobora com a observação feita pelos espectrogramas sobre o pico de GABA se apresentar sempre completamente branco (Fig. 2). Para os picos de NAA e Glx, os quais são visivelmente compostos por listras (Fig. 2), o valor de ZCR se altera com hop , aumentando e diminuindo sem um padrão bem definido para Glx, e com máximos distantes em média de 16 unidades para o pico de NAA. Nota-se que a quantidade de listras na linha de 2 ppm diminui até atingir um mínimo e então volta a aumentar (Fig. 4, direita). Já para o pico de Glx, a quantidade de listras também começa diminuindo, até que, para $hop = 18$, o padrão de listras de cada pico que compõe o Glx se torna diferente, e para nas imagens que seguem, tais padrões parecem variar em velocidades distintas. Estando a linha de 3,75 ppm na fronteira de tais padrões é compreensível que a métrica ZCR não varie de forma tão bem definida para o pico de Glx.

De forma geral, o estudo da variação de hop mostrou que valores muito altos de hop levam a uma grande perda de resolução temporal, uma vez que a quantidade de colunas da imagem cai muito. Além disso, observou-se que hop tem uma grande influência sobre o padrão de listras observados nos picos da parte real do espectrograma de GABA. Curiosamente, apesar de hop não alterar a quantidade de linhas da imagem, nem afetar de modo significativo a resolução frequencial observada para os picos mais intensos, ele afeta o comportamento dos picos de menor intensidade. Estudos futuros devem investigar a razão desse efeito. Ademais, não

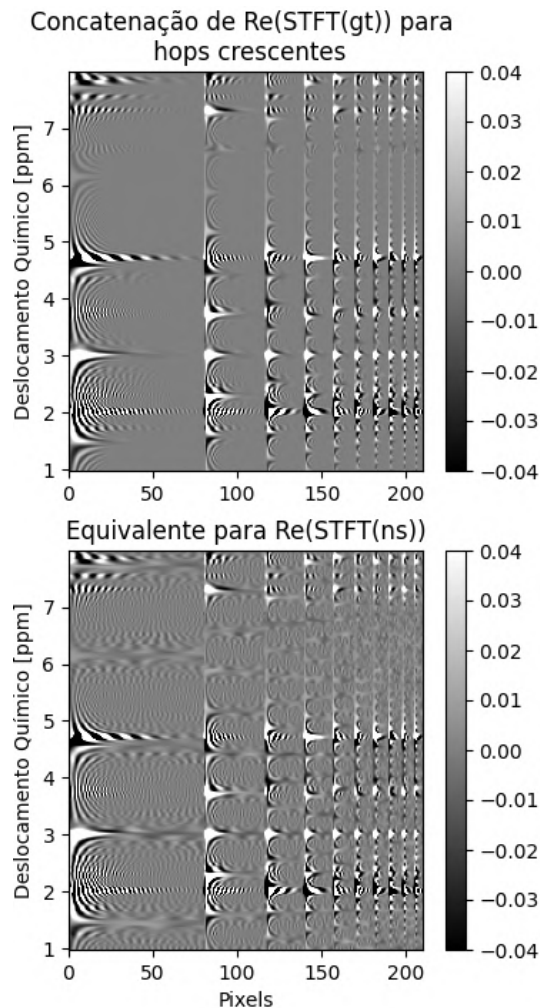


Figura 2: Concatenação de imagens da $Re(STFT)$ de GABA obtidas com diferentes valores de hop : para um sinal do tipo gt (superior), e do tipo ns (inferior). Espectrogramas gerados considerando o seguinte intervalo de valores para hop : [10, 118] com passo de 12. Imagens concatenadas estão limitadas a região entre 1 e 8 ppm e entre 0 a 0,4s.

notou-se diferenças marcantes entre a influência do hop em imagens obtidas a partir de sinais gt e, a partir de sinais ns .

As observações precedentes ajudam a caracterizar a influência do hop no espectrograma de GABA, trazendo métricas quantitativas apoiadas em avaliações visuais. No entanto, este estudo apresenta algumas limitações, como o algoritmo para detecção da meia altura não ser útil para o pico de Glx e o fato de apenas um valor para $mfft$, win e $norm$ terem sido considerados. Para permitir generalizar as observações feitas é preciso repetir o experimento para outras combinações de parâmetros. Além disso, esse estudo não avaliou se o passo da janela leva a mudanças na distribuição dos valores das imagens, i.e., mudanças em métricas estatísticas das imagens, relacionadas ao histograma da mesma. Tais métricas, combinadas a um estudo teórico rigoroso sobre as características de transientes GABA-editados, podem permitir obter explicações mais concretas sobre os fenômenos percebidos nas imagens.

B. Variação do Tamanho da Janela: $mfft$

Observando-se a concatenação de espectrogramas de GABA obtidos com diferentes valores de $mfft$ (Fig. 5), nota-se que, diferentemente do que se observou para a variação de hop , os picos mais intensos das imagens parecem possuir sempre o mesmo padrão de listras, independentemente de

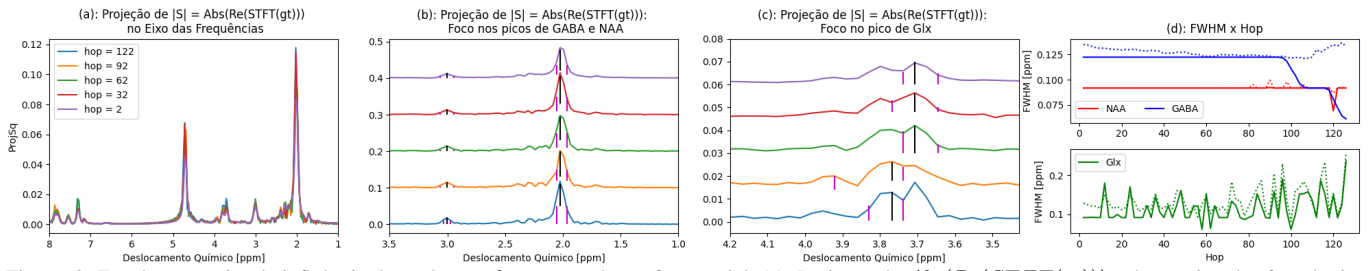


Figura. 3: Estudo a respeito da influência do parâmetro hop na resolução frequencial. (a): Projeção de $Abs(Re(STFT(gt)))$ sobre o eixo das frequências para diferentes valores de hop . Para facilitar a visualização, normaliza-se as projeções pela quantidade de colunas de cada imagem. (b) e (c): Projeções presentes em (a) deslocadas verticalmente. Em (b), o eixo horizontal está limitado para permitir a visualização dos picos de GABA e NAA, enquanto em (c), visualiza-se o pico de Glx. Traços verticais indicam a posição no eixo horizontal onde automaticamente detectou-se o ponto central do pico (em preto) e os pontos de meia altura (em magenta). A distância horizontal entre os traços em magenta corresponde ao valor de FWHM. (d): Valores médios de FWHM em função de hop obtidos para os picos de GABA, NAA e Glx. Linhas cheias correspondem a valores obtidos para sinais gt , e linhas tracejadas, para sinais ns .

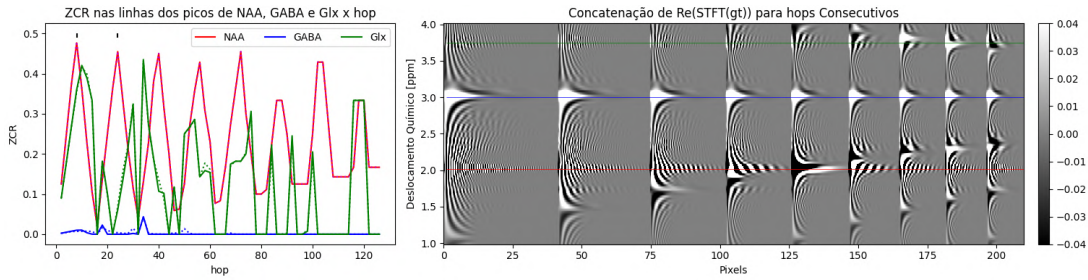


Figura. 4: Estudo a respeito da influência do parâmetro hop no padrão de listras dos picos de imagens da $Re(STFT)$. A esquerda: Valor médio de ZCR em função de hop obtido para as linhas dos picos de NAA, GABA e Glx. Linhas cheias correspondem ao valor da métrica obtida para sinais gt , e linhas tracejadas, para sinais ns . Traços pretos próximos ao topo do gráfico indicam os pontos em que hop igual a 8 e igual a 24. A direita: Concatenação de imagens da $Re(STFT(gt))$ geradas considerando valores de hop no intervalo $[8, 24]$, com passo de 2. Imagens concatenadas estão limitadas a região entre 1 e 4 ppm e entre 0 e 0,4s. As linhas verde, azul e vermelho indicam as linhas dos picos de Glx, GABA e NAA, respectivamente.

$mfft$. Além disso, o efeito de multiplicação dos picos menos intensos que foi observado no experimento anterior não se manifesta nesse caso. O mesmo ocorre para os padrões ondulatórios nas imagens geradas a partir de sinais ns . Ao observar mais de perto a região na qual ocorre o pico de GABA, nota-se que o aumento de $mfft$ torna o pico mais longo e com uma ponta mais fina. Além disso, para $mfft = 72$, as linhas verticais ao longo do eixo do tempo são muito finas, o que poderia sugerir uma maior resolução temporal, mas que torna a imagem mais ruidosa, e, comparando a nitidez da região da fronteira onde o pico acaba e uma região de sinal menos intenso se inicia, não parece haver diferença entre as imagens, de modo que esse suposto aumento de resolução temporal não parece impactar as regiões que portam informações mais significativas na imagem. O estudo da resolução frequencial em função de $mfft$, baseando-se no cálculo da FWHM, deixa nítido a melhora da resolução frequencial com o aumento de $mfft$ (Fig. 6). A dificuldade na detecção da meia altura observada anteriormente para o pico de Glx não ocorre para $mfft \geq 472$, pois, para as combinações de parâmetros consideradas, o pico mais próximo de 3,7 ppm se torna consistentemente maior que o pico em 3,8 ppm, e ambos mais altos que o valor central em 3,75 ppm. Dessa forma, o formato do pico em 3,7 ppm fica bem definido e o algoritmo consegue detectá-lo, sempre medindo a FWHM em torno dele. Além disso, para valores muito baixos de $mfft$, as projeções não apresentam picos bem definidos, como o que se observa para $mfft = 72$ e $mfft = 272$ (pico de Glx).

Finalmente, o estudo da métrica ZCR em função de $mfft$ indica que para $mfft > 200$, ZCR de todos os picos tende a um valor constante (Fig. 7), o que corrobora com a impressão visual dos espectrogramas (Fig. 5), onde não parece haver diferenças significativas entre o padrão de listras

nos picos para imagens obtidas com diferentes $mffts$. No entanto, observa-se que enquanto o pico de NAA na segunda repetição do espectrograma se inicia com duas faixas brancas intercaladas por uma preta, o contrário acontece com o pico na quarta repetição da imagem (Fig. 7, direita). Essas pequenas diferenças podem ter origem em erros relacionados ao cálculo da STFT nas extremidades da imagem, e só são percebidas quando as imagens são vistas muito ampliadas e em alta resolução.

O estudo da variação da $mfft$ permite compreender melhor como tal parâmetro pode afetar as características da imagem. Em especial, para os sinais observados, o uso de um $mfft$ inferior a 472 parece inadequado, levando a uma resolução em frequência insatisfatória (Fig. 6). A estabilização das curvas da FWHM em função de $mfft$ sugere a existência de um valor máximo para $mfft$, a partir do qual não se encontra melhoras na resolução frequencial. Nota-se ainda que o parâmetro $mfft$ parece não impactar a resolução temporal das partes da imagem contendo informações mais relevantes, mas afeta o formato e extensão horizontal dos picos no espectrograma. Ademais, a variação de $mfft$ parece impactar pouco o padrão de listras observados nos picos, sugerindo que para win e $norm$ utilizados, o fator determinante para esse padrão é apenas o hop . Este estudo apresenta limitações por considerar apenas uma combinação dos parâmetros fixados (hop , win e $norm$) e não analisar mudanças no histograma das imagens devido a variação de $mfft$.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho contribui à caracterização da influência dos parâmetros hop e do $mfft$ no espectrograma de GABA, de forma quantitativa e qualitativa. No entanto, este estudo está sujeito a algumas limitações, e necessita ser estendido para

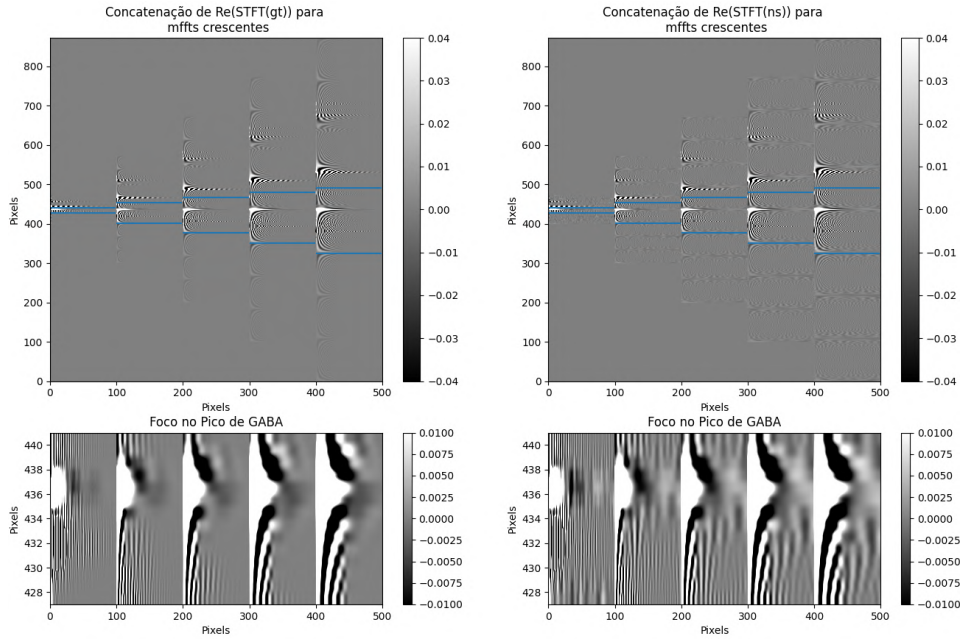


Figura. 5: Concatenação de imagens da $Re(STFT)$ geradas considerando o seguinte intervalo de valores para $mfft$: $[72, 872]$ com passo de 200. Imagens concatenadas estão limitadas a região entre 0 a 0,4s. Devido a diferença no número de linhas, as imagens estão alinhadas pelo centro, e as imagens com menor número de linhas são completadas por linhas com apenas zeros. As linhas azuis nas imagens superiores destacam a região entre 1 e 4 ppm para cada imagem. Na linha inferior, um número reduzido de linhas das mesmas imagens são apresentadas para permitir melhor visualização do pico de GABA. As imagens a esquerda foram obtidas a partir de um sinal gt , e, a direita, de um sinal ns .

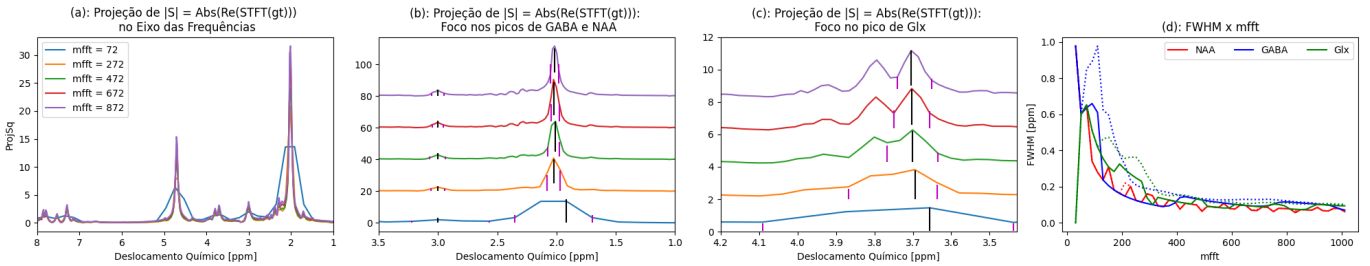


Figura. 6: Estudo a respeito da influência do parâmetro $mfft$ na resolução frequencial. Descrição análoga a da Figura 3. (a): Projeção de $Abs(Re(STFT(gt)))$ sobre o eixo das frequências para diferentes valores de $mfft$. Nesse caso, as projeções não estão normalizadas, pois todas as imagens possuem a mesma quantidade de colunas. (d): Valores médios de FWHM em função de $mfft$ para os picos de GABA, NAA e Glx.

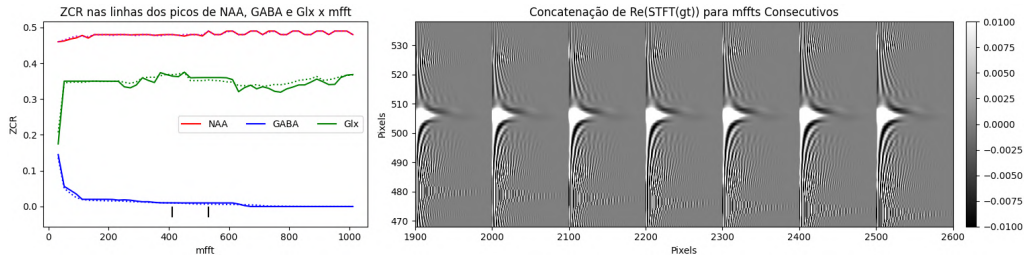


Figura. 7: Estudo a respeito da influência do parâmetro $mfft$ no padrão de listras dos picos de imagens da $Re(STFT)$. Descrição análoga a da Figura 4. Traços pretos no gráfico indicam os pontos em que $mfft$ igual a 412 e a 532. Imagens concatenadas à direita consideram valores de $mfft$ no intervalo $[412, 532]$, com passo de 20.

considerar mais combinações de parâmetros para verificar a generalização dos resultados.

REFERÊNCIAS

- [1] M. J. Allen et al., “GABA receptor,” 2018.
- [2] N. Puts et al., “In Vivo Magnetic Resonance Spectroscopy of GABA: A Methodological Review,” *Prog Nucl Magn Reson Spectrosc*, vol. 60, jan. de 2012.
- [3] P. K. Mandal, “In Vivo Proton Magnetic Resonance Spectroscopic Signal Processing for the Absolute Quantitation of Brain Metabolites,” *Eur. J. Radiol.*, vol. 81, n.º 4, 2012.
- [4] A. Peek et al., “A Comprehensive Guide to MEGA-PRESS for GABA Measurement,” *Anal Biochem*, vol. 669, mai. de 2023.
- [5] S. Tsai et al., “Effects of Frequency Drift on the Quantification of Gamma-Aminobutyric Acid Using MEGA-PRESS,” *Sci Rep*, vol. 6, abr. de 2016.
- [6] R. P. Berto et al., “Advancing GABA-edited MRS Research through a Reconstruction Challenge,” *MAGMA*, 2023.
- [7] G. Dias et al., “Spectro-ViT: A Vision Transformer Model for GABA-Edited MEGA-PRESS Reconstruction Using Spectrograms,” *Magn Reson Imaging*, vol. 113, jul. de 2024.
- [8] R. Souza, *Edited MRS-Challenge Github*.
- [9] M. Mikkelsen et al., “Big GABA: Edited MR spectroscopy at 24 research sites,” *Neuroimage*, vol. 159, out. de 2017.

Agradecimentos: os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP - processo nº 2024/01294-2) por providenciar auxílio financeiro.