

Análise Quantitativa Preliminar de Métodos de Reamostragem de Imagens Digitais Aplicáveis a Diferentes Tipos de Formas Geométricas

Carlos Eduardo Falandes^{1,2}, Fabrício Galende Marques de Carvalho^{1,2}

¹INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
São José dos Campos – SP – Brasil

²FATEC – Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo
São José dos Campos – SP – Brasil

carlos.falandes@fatec.sp.gov.br, fabricio.galende@inpe.br

Abstract. *This paper deals with preliminary quantitative and qualitative analysis of classical image resampling methods, such as nearest neighbor, bilinear and bicubic interpolation. The evaluation which was performed focuses on how these methods impact geometric shape contours quality after image resampling is performed. This analysis is motivated by the fact that loss of image contour quality can significantly affect pattern matching, which is done during a typical image registration process. All methods were analyzed using Peak Signal-to-Noise Ratio, Mean Square Error and Correlation Coefficient metrics.*

Resumo. *Esse trabalho trata de uma análise quantitativa e qualitativa preliminar de métodos clássicos de reamostragem, tais como a interpolação por vizinho mais próximo, a bilinear e a bicúbica. A avaliação que foi realizada tem como enfoque ilustrar como esses métodos impactam na qualidade dos contornos das formas geométricas após a realização da reamostragem. Essa análise é motivada pelo fato de que a perda de qualidade da imagem pode afetar significativamente o casamento de padrões executado em um processo típico de registro de imagem. Os métodos foram analisados utilizando-se métricas de Relação Sinal-Ruído de Pico, Erro Quadrático Médio e Coeficiente de Correlação.*

1. Introdução

Em diversas áreas, tais como na medicina [Parker, Kenyon e Troxel 1983] e sensoriamento remoto [Neto e Mascarenhas 1983][Porwal e Katiyar 2014], as técnicas de reamostragem são essenciais. Essas técnicas consistem no redimensionamento de imagens e são necessárias para estabelecer uma base de comparação entre elas, permitindo que sejam efetuados diversos procedimentos, tais como a detecção de mudanças, reconhecimento de padrões e fusão de imagens [Zitová e Flusser 2003]. Portanto, é necessário que as características fundamentais, como cantos e contornos de uma figura, sejam preservadas durante o processo de interpolação [Goshtasby 2005]. No entanto, diferentes métodos produzem efeitos diversificados, como desfoque, descontinuidade e serrilhamento de bordas, que comprometem as etapas de reconhecimento de padrões entre imagens. Além disso, as técnicas possuem custos

computacionais distintos, como tempo de processamento e memória necessária [Han 2013].

Neste trabalho, os métodos clássicos, que incluem o vizinho mais próximo, bilinear e bicúbica, foram testados por diferentes métricas, associadas a diferentes valores de razão de reamostragem, utilizando figuras de diferentes tipos de formas geométricas. A avaliação dos métodos foi realizada por diferentes métricas estatísticas, tais como Erro Médio Quadrático (MSE), Relação Sinal-Ruído de Pico (PSNR) e Coeficiente de Correlação (CC), usadas para quantificar e comparar a qualidade dos resultados, seguindo uma abordagem semelhante a proposta por [Prasanth, Shashidhara e Balasubramanya 2009], que realiza a comparação entre as diferentes técnicas utilizando as mesmas métricas, contudo tem ênfase em destacar o índice de qualidade universal.

Esses métodos são amplamente estudados e empregados devido à sua praticidade e eficiência, como evidenciado em trabalhos como os de [Dung, Chuc, Thanh, Hung e Chung 2018], [Porwal e Katiyar 2014], e [Kai, Oliveira, Vieira, Soares e Costa 2021], os quais investigam os efeitos dessas técnicas em diferentes aspectos, como o impacto na classificação urbana, qualidade quando aplicadas em imagens de satélites específicos e os efeitos no cálculo de índices de vegetação, respectivamente.

Diferentemente dos demais estudos, a principal contribuição deste trabalho é o estudo comparativo dos métodos de reamostragem, considerando diferentes categorias de imagens (ex. características distintas de cantos e contornos), para exibir resultados quantitativos que podem auxiliar o leitor na seleção de um método específico em comparação a outros.

2. Métodos de interpolação

Os métodos clássicos de interpolação constituem-se em utilizar dados conhecidos para estimar valores em pontos desconhecidos, com base em conceitos matemáticos. Nesta etapa, estabelece-se uma relação entre as dimensões originais da imagem e as dimensões desejadas, usando a razão entre elas, assim permitindo analisar as proximidades entre os pixels originais e a grade de interpolação [Pedrini e Schwartz 2007].

A Interpolação por Vizinho Mais Próximo (NN - do inglês, *nearest neighbor*) baseia-se na atribuição da intensidade do pixel mais próximo na imagem original a cada ponto da grade de interpolação. Sua implementação é simples e requer baixo tempo computacional. No entanto, esse método pode resultar em artefatos indesejados, como perda de detalhes finos e serrilhamento acentuado nos contornos [Gonzales e Woods 2010].

Esse método pode ser descrito pela equação abaixo, sendo $P_0(x', y')$ o pixel a ser interpolado, $P(x, y)$ pixel da imagem original e dx e dy são as distâncias entre os pontos originais e os interpolados nas direções x e y , respectivamente, $dx = x - x'$ e $dy = y - y'$.

$$P_0(x', y') = \begin{cases} P(x, y) & \text{para } dx < 0,5 \text{ e } dy < 0,5 \\ P(x + 1, y) & \text{para } dx \geq 0,5 \text{ e } dy < 0,5 \\ P(x, y + 1) & \text{para } dx < 0,5 \text{ e } dy \geq 0,5 \\ P(x + 1, y + 1) & \text{para } dx \geq 0,5 \text{ e } dy \geq 0,5 \end{cases}$$

A Interpolação Bilinear possui semelhanças com o método anterior, no entanto, se diferencia ao levar em consideração não apenas o pixel mais próximo, mas sim os

quatro pixels mais próximos da imagem original. Nessa abordagem, as intensidades desses quatro pixels são ponderadas com base nas distâncias entre o ponto da grade de interpolação e esses pixels próximos.

Conhecendo as distâncias dx e dy , tem-se todas as distâncias necessárias, pois são lineares são complementares, sendo que sua soma é igual ao valor máximo. A interpolação pode ser realizada usando a seguinte equação, na qual as variáveis são as mesmas do método anterior.

$$P_0(x', y') = [(1-dx) * (1-dy) * P(x+1, y+1) + dx * (1-dy) * P(x, y+1) + dx * dy * P(x, y) + (1-dx) * dy * P(x+1, y)]$$

Por fim a Interpolação Bicúbica consiste em utilizar os dezesseis pixels mais próximos da imagem original para calcular a intensidade do pixel a ser extrapolado. A ideia por trás desse método é a consideração da distância geométrica entre os pixels, atribuindo pesos com base em uma *spline* cúbica. Esse método não apresenta aspecto serrilhado acentuado e não suaviza tanto a imagem, contudo é mais exigente em termos de recursos computacionais devido ao seu processo mais complexo de cálculo [Keys 1981].

O método é dado através da seguinte equação, na qual as variáveis são as mesmas dos métodos anteriores.

$$P_0(x', y') = \sum_{m=-1}^2 \sum_{n=-1}^2 P(x+m, y+n) R(m-dx) R(dy-n)$$

em que,

$$R(x) = \frac{1}{6} [E(s+2)^3 - 4E(s+1)^3 + 6E(s)^3 - 4E(s-1)^3]$$

$$E(t) = \begin{cases} t, & t > 0 \\ 0, & t \leq 0 \end{cases}$$

3. Métricas de avaliação

Para a análise quantitativa dos métodos de interpolação, foram empregadas métricas estatísticas de avaliação de imagens [Pappas, Safranek e Chen 2005], que se fundamentam em quantificar a similaridade entre as intensidades de uma imagem com um referencial, para assim de compreender os impactos provocados por cada técnica de interpolação.

O Erro Quadrático Médio (MSE – do inglês, Mean Squared Error) é a média dos quadrados das diferenças entre os valores dos pixels da imagem original e da imagem interpolada. Quanto menor o MSE, melhor a qualidade da interpolação, indicando maior semelhança entre as imagens. Já o MSE alto significa que há uma grande discrepância entre as imagens, indicando baixa qualidade da interpolação.

O cálculo dessa métrica está descrito através da equação:

$$MSE = \frac{\sum((P' - P)^2)}{N}$$

Sendo:

P' : valor do pixel na imagem em análise;

P : valor do pixel na imagem de referência; e

N : número total de pixels nas imagens.

Coefficiente de Correlação (CC) é uma métrica quantifica como as variações de intensidade dos pixels em uma imagem se relacionam com as variações de intensidade na imagem de referência. Varia de -1 (correlação negativa perfeita) a 1 (correlação positiva perfeita), com 0 indicando ausência de correlação. Quanto mais próximo de 1 ou -1, mais forte é a correlação, enquanto próximo de 0 indica correlação fraca ou inexistente.

O cálculo dessa métrica está descrito através da equação:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (P' - \bar{P}') (P - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P' - \bar{P}')^2 \sum_{i=1}^n (P - \bar{P})^2}}$$

Sendo:

P' : valor do pixel na imagem em análise;

P : valor do pixel na imagem de referência; e

\bar{P}' e \bar{P} : médias das intensidades dos pixels nas imagens em análise e de referência, respectivamente.

Relação Sinal-Ruído de Pico (PSNR – do inglês, *Peak Signal-to-Noise Ratio*) é uma métrica que utiliza os resultados do Erro Médio Quadrático para quantificar a relação entre o sinal (informação útil na imagem) e o ruído (distorções ou erros na imagem) em respeito à imagem de referência. Quanto maior o valor do PSNR, maior é a quantidade de sinal na imagem.

O cálculo dessa métrica está descrito através da equação:

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAX^2}{MSE} \right)$$

Sendo:

MAX : valor máximo do pixel da imagem; e

MSE : Erro médio quadrático.

4. Metodologia para avaliação

Os testes tiveram como objetivo quantificar e comparar os resultados de cada técnica de reamostragem, utilizando figuras de diferentes tipos de contornos de formas geométricas. Essas características de contorno desempenham um papel essencial na busca de correspondências de padrões entre diferentes imagens, pois grandes perdas nelas podem levar a correspondências de padrões incorretas, impactando negativamente o registro entre diferentes imagens.

Essas características podem ser visualizadas na Figura 1, que apresenta diferentes imagens que possuem regiões com características distintas que podem ser usadas como ponto de controle. Na Figura 2 ambas as imagens tiveram seus detalhes destacados por formas geométricas. Tais regiões são relevantes, pois os pontos de controle escolhidos para a correspondência de padrões podem ser fundamentados nelas (e.g.: estádios,

reservatórios de água, montanhas, baías, aeroportos, plantações, etc.) [Medha, Pradeep e Hemant 2009].

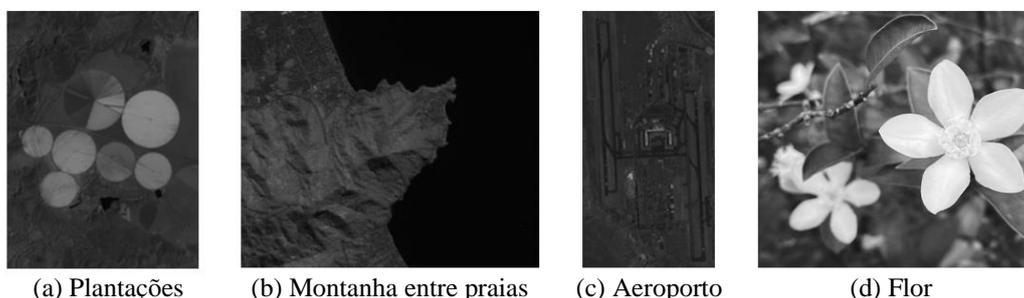


Figura 1. Imagens com características proeminentes.

Fonte: a, b, c: Catálogo de imagens INPE - Satélite CBERS-4; d: Disponível em: <https://pt.vecteezy.com/foto/10847072-flores-de-jasmim-branco-de-cinco-petalas-estao-florescendo-cor-branca-pequenas-cinco-petalas-com-polen-amarelo>.

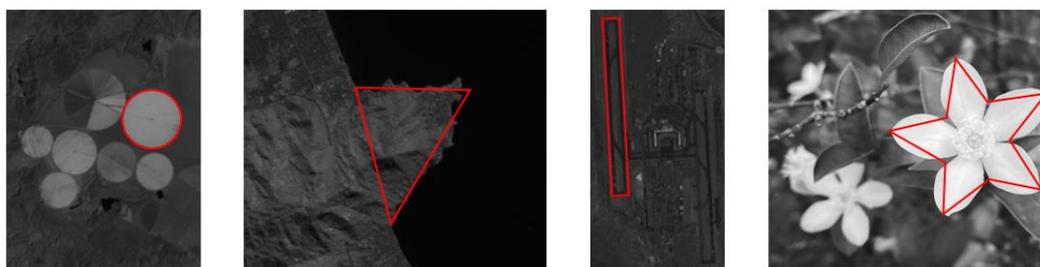


Figura 2. Imagens da Figura 1 com destaque nas características geométricas.

Fonte: Autoria própria

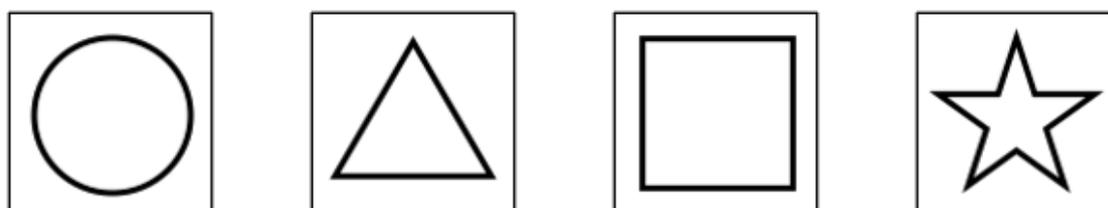


Figura 3. Imagens das figuras geométricas utilizadas para os testes.

Fonte: Autoria própria

A Figura 3 apresenta a amostra de imagens usadas nos testes, que tiveram suas dimensões definidas como 101x101 pixels, a escolha de um número primo, assegura que a razão entre as dimensões originais e as novas dimensões nunca sejam um número inteiro, evitando assim qualquer alinhamento regular. Essa precaução é significativa ao considerar o processo de arredondamento da posição do pixel durante a reamostragem das dimensões da imagem, assim destacando a sensibilidade do método em determinar as novas intensidades. Dessa forma, evidenciam-se as características de cada técnica, independentemente da razão de redução, evitando qualquer viés no processo de análise dos resultados.

Para a análise dos resultados de cada método, o seguinte procedimento foi empregado: inicialmente, uma imagem é reduzida por uma determinada razão de reamostragem e, em seguida, ampliada para suas dimensões originais, conforme ilustrado na Figura 4. Posteriormente, a imagem resultante é avaliada pelas métricas estatísticas, que compara a imagem reamostrada com a imagem original. Essa sequência de etapas é

repetida, variando a razão de redução de reamostragem em incrementos de 10%, até atingir 90% da escala original. Este processo é reiterado para cada método de interpolação, gerando resultados estatísticos específicos para cada técnica. Em seguida, a análise é estendida para cada imagem presente na Figura 3, permitindo uma avaliação detalhada do desempenho de cada técnica em diferentes formas geométricas. Essa abordagem possibilita a avaliação do desempenho e destaca características fundamentais de cada método, considerando a perda de detalhes durante a redução e ampliação da imagem.

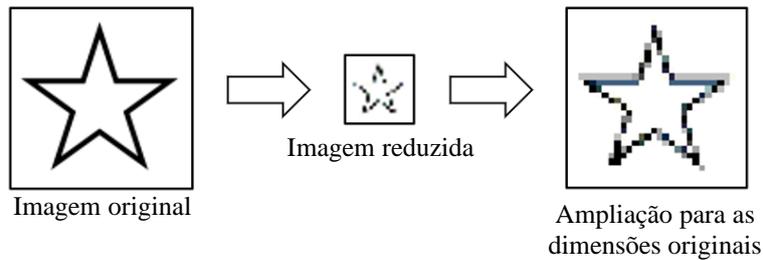
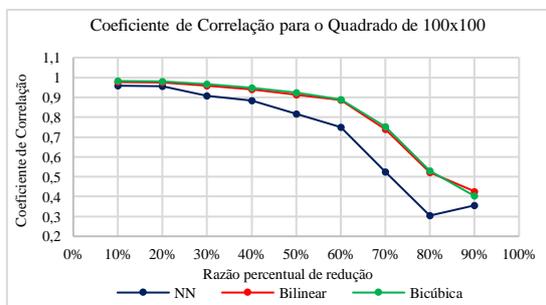


Figura 4. Processo realizado utilizando o método de reamostragem por vizinho mais próximo com razão percentual de redução em 70% da original.
Fonte: A autoria própria.

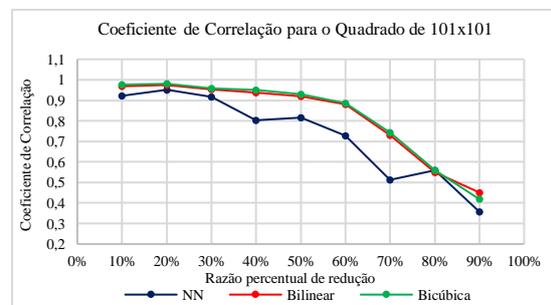
3. Resultados dos testes

No contexto da Figura 5, destaca-se a importância de avaliar os métodos através de escalas baseadas em números primos. Os resultados no gráfico (a) indicam que a redução por escalas múltiplas proporciona uma curva mais consistente, resultando em um coeficiente de correlação menor à medida que a escala de redução aumenta. No entanto, ao empregar uma escala com números primos, conforme mostrado no gráfico (b), tornam-se visíveis vários picos de correlação, especialmente no método (NN).

Para melhor visualização das diferenças entre os métodos bilinear e bicúbico, calculou-se o módulo das diferenças entre ambos para cada imagem, como representado nos gráficos (c) e (d). Nestes gráficos, é mostrado que ao usar imagens com dimensões primas, as discrepâncias entre os métodos são mais pronunciadas. É importante ressaltar que os resultados obtidos com dimensões múltiplas mostram resultados melhores devido a um viés. Os demais testes foram conduzidos utilizando as imagens da Figura 3 com dimensões primas (101x101), com o intuito de destacar as características e obter uma análise mais precisa para fins de comparação.



(a)



(b)

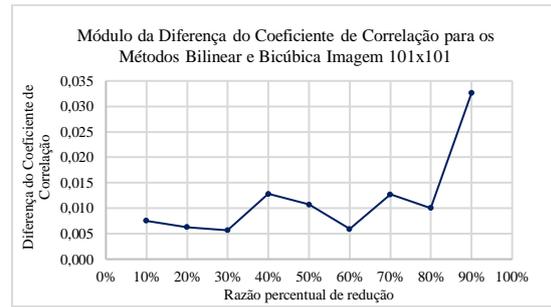
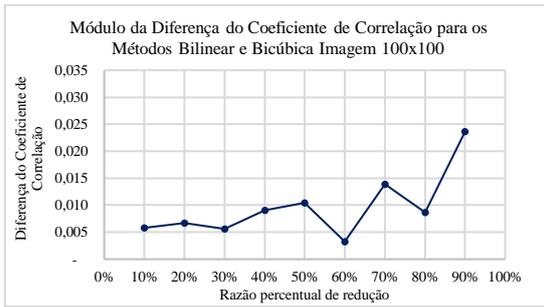


Figura 5. Exemplo e comparação de variações Coeficiente de Correlação.

Os gráficos das métricas na Figura 6 ilustram os índices das métricas de qualidade dos interpoladores para a imagem da Circunferência. A interpolação por vizinho mais próximo apresentou resultados de menor qualidade, já a interpolação bicúbica teve os resultados superiores aos demais, contudo, quando a razão de redução foi superior a 70%, a interpolação bilinear teve menos erros. Essa tendência é destacada no gráfico (d) quando a razão de redução atinge 90%, mostrando a diferença entre os métodos bilinear e bicúbico.

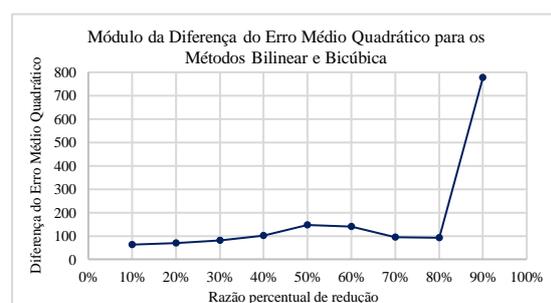
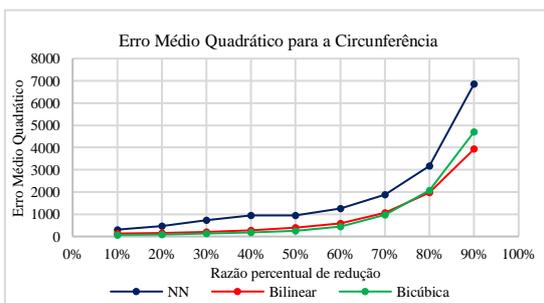
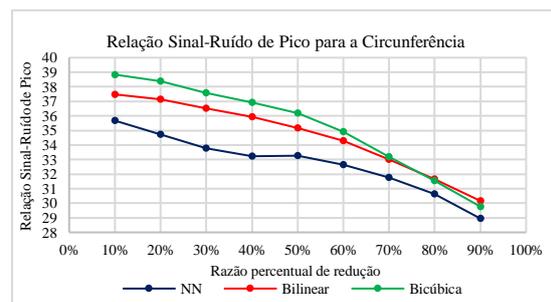
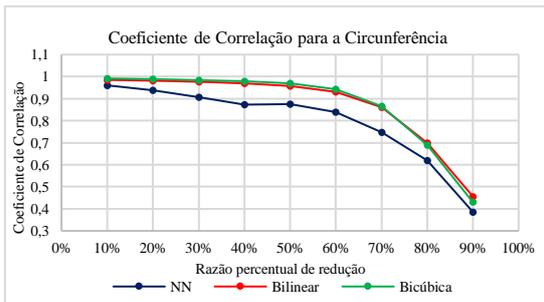


Figura 6. Gráficos com Diferentes Métricas de Avaliação para a Circunferência.

Os gráficos das métricas na Figura 7 mostram que os resultados da avaliação para a imagem do contorno do triângulo apresentaram picos de qualidade ao ser reamostrada por diferentes razões de redução, especialmente na interpolação por vizinho mais próximo. Esse efeito é provavelmente causado pelo aspecto serrilhado deixado nas diagonais. No entanto, mesmo com esse serrilhado, a figura demonstra melhores resultados quando reamostrada. Isso pode ser atribuído à presença de contornos com linhas retas em diferentes posições, tanto diagonais quanto horizontais.

Em relação os métodos bilinear e bicúbica tiveram resultados semelhantes, contudo, como é mostrado no gráfico (b) a interpolação bicúbica possui menos ruído em relação a bilinear, a diferença entre ambos é visível no gráfico (d).

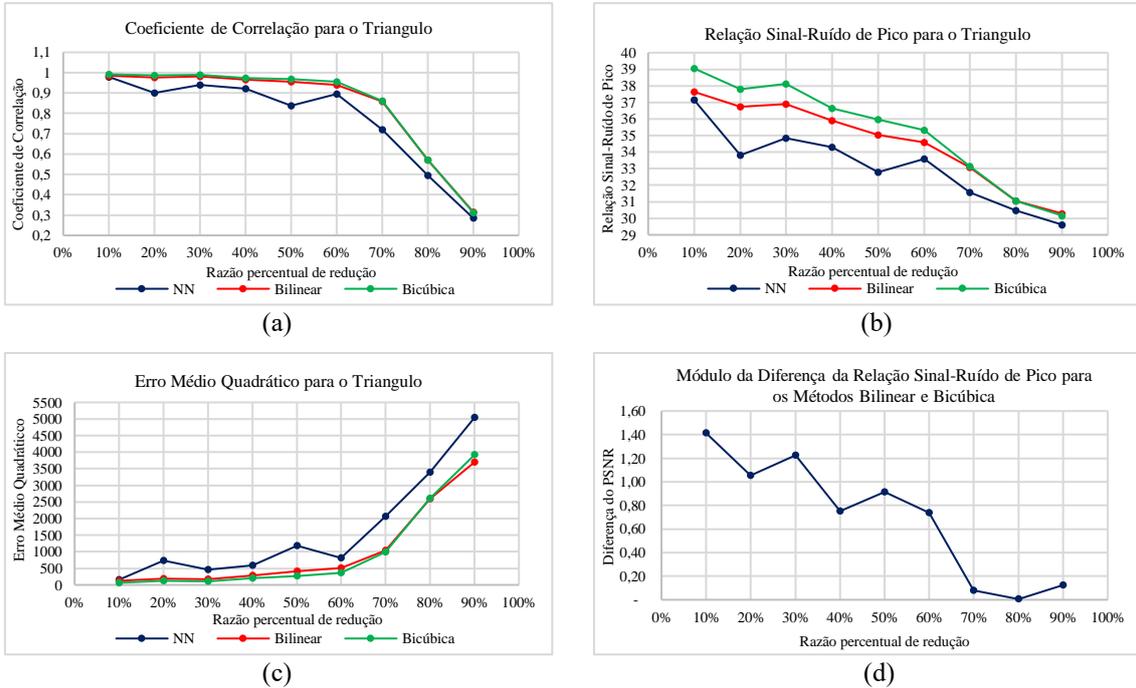


Figura 7. Gráficos com Diferentes Métricas de Avaliação para o Triângulo.

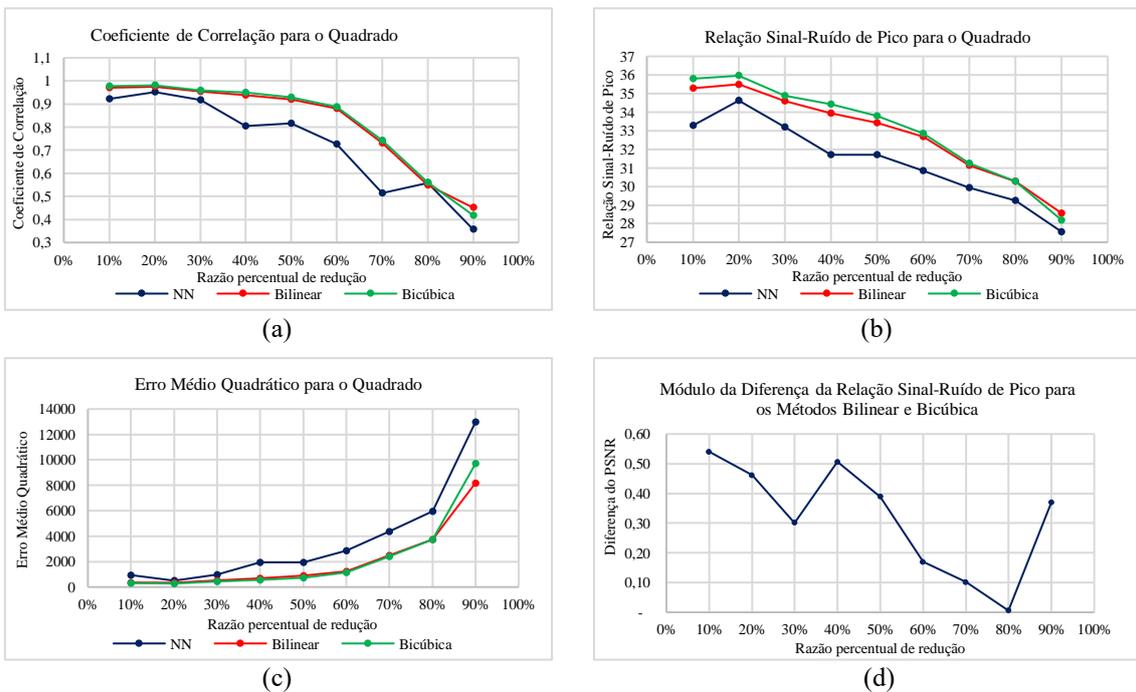


Figura 8. Gráficos com Diferentes Métricas de Avaliação para o Quadrado.

Os gráficos das métricas na Figura 8 mostram que quando os interpoladores foram testados para a imagem do contorno do Quadrado, apresentaram poucos picos de erro. Contudo, essa é a figura exibiu os maiores erros nas métricas, provavelmente devido ao

deslocamento das retas do quadrado durante o processo de reamostragem. Os resultados dos métodos bilinear e bicúbica se diferenciam pouco, no gráfico (d) é mostrada a diferença do PSNR, no entretanto a interpolação bicúbica é superior.

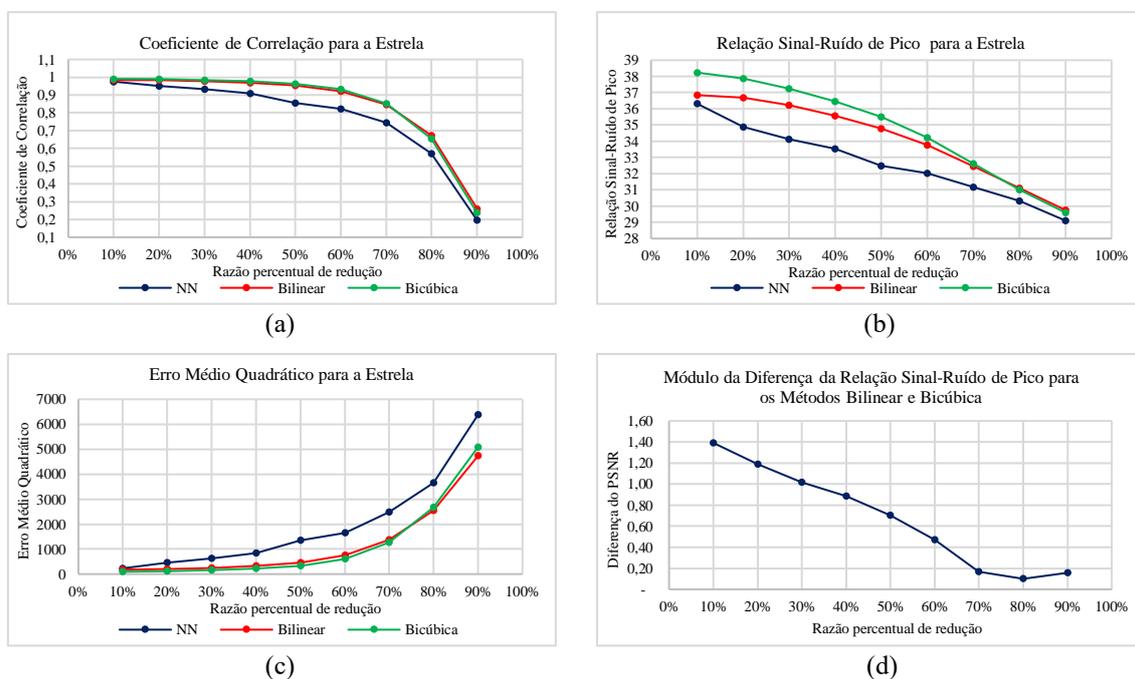


Figura 9. Gráficos com Diferentes Métricas de Avaliação para a Estrela.

Os gráficos das métricas na Figura 9 exibem que a avaliação para a imagem da Estrela não possui picos de erro em nenhum método. A interpolação por vizinho mais próximo apresenta resultados de menor qualidade, já interpolação bicúbica mostra resultados superiores aos demais. Além disso, a estrela é a figura com curvas mais suaves em comparação as outras formas, provavelmente pelo maior número de cantos.

4. Conclusão

Os resultados dos testes realizados indicam que o método de interpolação por vizinho mais próximo apresenta desempenho inferior, tanto por picos de erro quanto a maiores erros quando comparado aos outros métodos. A interpolação bilinear apresenta resultados semelhantes à interpolação bicúbica, mas se destaca quando a redução das imagens ultrapassam 80% da escala original. Contudo, a interpolação bicúbica oferece resultados superiores em termos de qualidade, especialmente em razões percentuais de reduções baixas.

Em relação aos contornos das figuras testadas, o triângulo exibe erros menores como visto nos gráficos da Figura 7, embora apresente picos de erro para algumas razões de redução. A estrela e o círculo, por outro lado, possuem mais erros que a figura do triângulo, porém não possui picos de erro como visto nas Figuras 6 e 9. Por fim, a figura do quadrado revela os piores resultados, não apenas com picos de erro, mas também em comparação com as outras formas testadas.

Com base nos resultados, há a intenção de aprimorar o estudo para investigar o erro introduzido durante a etapa de registro, subseqüente à reamostragem quando os padrões são utilizados com tal finalidade.

Referências

- Neto, G. C. e Mascarenhas, N. D. (1983) "Image scaling comparison using universal image quality index", In: IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Boston, MA, USA, p. 391-394
- Parker, A., Kenyon, R. V. e Troxel, D. E. (1983) "Comparison of Interpolating Methods for Image Resampling", In: IEEE Transactions on Medical Imaging, vol. 2, no. 1, p. 31-39.
- Keys, R. (1981) "Cubic convolution interpolation for digital image processing", in IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 29, no. 6, p. 1153-1160.
- Zitová, B. e Flusser, J. (2003) "Image Registration Methods: A Survey. Image and Vision Computing", vol. 21, p. 977-1000.
- Goshtasby, A. A. (2005) "2-D and 3-D image registration: for Medical, Remote Sensing, and Industrial Applications", Nova Jersey: John Wiley & Sons.
- Pappas, T. N., Safranek, R. J. e Chen, J. (2005) "Perceptual Criteria for Image Quality Evaluation", In: Handbook of Image and Video Processing.
- Pedrin, H. e Schwartz, W. R. (2007) "Análise de imagens digitais: princípios, algoritmos e aplicações" Thomson Learning.
- Prasanth, H. S., Shashidhara, H. L. e Balasubramanya, M. K. N. (2009) "Image scaling comparison using universal image quality index", In: International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies, Bangalore, Índia, p. 859-863.
- Medha, V. W., Pradeep M. P. e Hemant K. A. (2009) "Image Registration Techniques: An overview", In: International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, vol. 2, no. 3, p. 11-28.
- Gonzalez, R. e Woods, R. E. (2010) "Processamento Digital de Imagens", Pearson, 3.ed.
- Han, D. (2013) "Comparison of Commonly Used Image Interpolation Methods", In: Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering.
- Porwal, S. e Katiyar, S. K. (2014) "Performance evaluation of various resampling techniques on IRS imagery", In: International Conference on Contemporary Computing (IC3), Noida, India, p. 489-494.
- Dung, P. T., Chuc, M. D., Thanh, N. T. N., Hung, B. Q., e Chung, D. M. (2018) "Comparison of Resampling Methodson Different Remote Sensing Images for Vietnam's Urban Classification", In: Research and Development on Information and Communication Technology, vol E-2, no 15, p. 8-20.
- Kai, P. M., Oliveira, B. M., Vieira, G. S., Soares, F. e Costa, R. M. (2021) "Effects of resampling image methods in sugarcane classification and the potential use of vegetation indices related to chlorophyll", In: IEEE 45th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC), Madrid, Spain, p. 1526-1531.