

Processamento de imagens

Enzo Borges Segala Jonathan Gabriel Nunes Mendes
Matheus Machado Cesar Marcos Henrique Volpato de Moraes
Miguel Predebon Abichequer Nicolas Rosenthal Dal Corso
Rafael Silveira Bandeira

11/11/2025

Sumário

1	Introdução	3
2	Tarefas	3
2.1	Interpolação em imagens coloridas	3
2.1.1	Interpolação por vizinho mais próximo	4
2.1.2	Bilinear	7
2.1.3	Bicúbico	10
2.1.4	Funções auxiliares	13
2.2	Realce de imagens no domínio espacial (da imagem)	15
2.2.1	Arquivo principal	15
2.3	Filtragem espacial	16
2.3.1	Ruídos Salt & Pepper e Gaussian	16
2.3.2	Unsharp Masking	21
2.4	Dithering em imagens em tons de cinza	25
2.4.1	Conceitos Fundamentais	26
2.4.2	Algoritmos	26
2.4.3	Implementação	27
2.4.4	Resultados e Discussão	29
2.5	Operações Geométricas	31
2.5.1	Resultados	31
2.5.2	Código	34

1 Introdução

...

2 Tarefas

2.1 Interpolação em imagens coloridas

```
%> Interpolação em imagens coloridas
scale = 2;
baseimgs = {'cat.png', 'hamster.png'};

algorithms = { ...
    'Original'           , @(a, b) a           ; ...
    'Nearest Neighbour' , @nearest_neighbour_resize; ...
    'Bilinear'          , @bilinear_resize      ; ...
    'Bicubic'            , @bicubic_resize       ; ...
};

image_count = length(baseimgs);
runs_per_image = length(algorithms);
total_runs = runs_per_image * length(baseimgs);

names = repmat(algorithms(:,1), image_count, 1);
baseimgnames = repmat(baseimgs, length(algorithms));
f = repmat(algorithms(:,2), image_count, 1);

inimags = reshape(repmat(baseimgs, runs_per_image, 1), 1, []); %%
    transpose
outimags = cell(1, total_runs);

parfor i = 1:length(inimags)
    img = im2double(imread(inimags{i}));

    outimags{i} = f{i}(img, scale);
end
imgs_in_docked_figures(outimags, baseimgnames, names);
```



(a) cat



(b) hamster

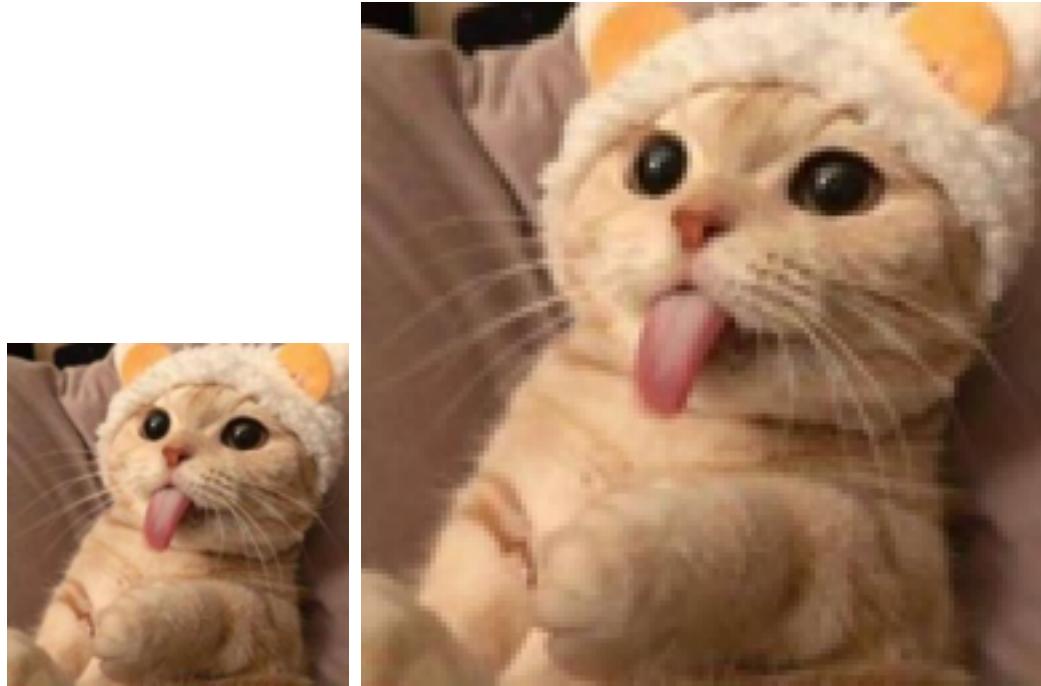
Figura 1: Imagens originais

Algoritmos

Foram escolhidos os algoritmos: Vizinho mais próximo (ordem 0), Bilinear (ordem 1) e Bicúbico (ordem 3)

2.1.1 Interpolação por vizinho mais próximo

Pode-se dizer que a principal vantagem deste algoritmo é a simplicidade da sua implementação e, por conta dela, chega ao resultado mais rápido. Contudo, seu resultado é uma imagem bastante pixelizada, o que torna inadequada a sua utilização em fotografias. Apesar disso, ainda é bastante utilizada por artistas que trabalham com pixel art, já que neste estilo é desejado ver cada pixel.



(a) Original - cat

(b) Interpolado - cat

Figura 2: Vizinho mais Próximo



(a) Original - hamster

(b) Interpolado - hamster

Figura 3: Vizinho mais Próximo

2.1.1.1 Código

```

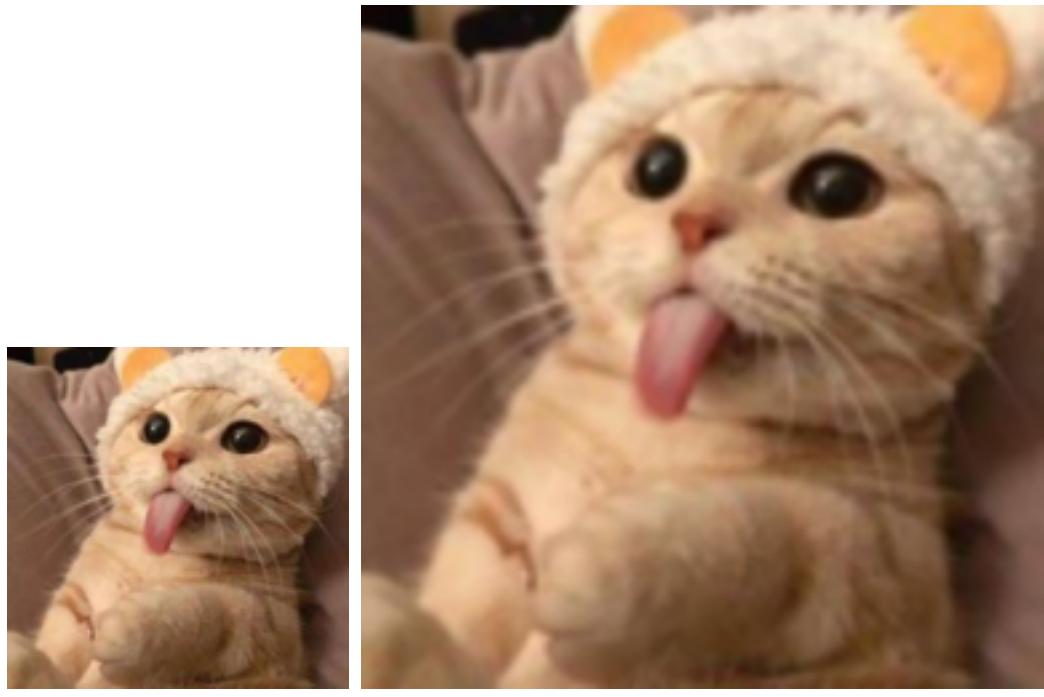
function out = nearest_neighbour_resize(img, scale)
[rows, cols, ch] = size(img);
new_rows = round(rows * scale);
new_cols = round(cols * scale);
scale = new_rows / rows;

out = zeros(new_rows, new_cols, ch);
for k = 1:ch
    for i = 1:new_rows
        for j = 1:new_cols
            ii = floor((i - 1) / scale) + 1;
            jj = floor((j - 1) / scale) + 1;
            out(i,j,k) = img(ii, jj, k);
        end
    end
end
end

```

2.1.2 Bilinear

Este algoritmo suaviza as transições entre pixels, o que gera um resultado visual mais natural que o vizinho mais próximo. Contudo, pela simplicidade da interpolação, causa leve borramento e perda de nitidez.



(a) Original - cat

(b) Interpolado - cat

Figura 4: Bilinear



(a) Original - hamster



(b) Interpolado - hamster

Figura 5: Bilinear

2.1.2.1 Código

```
function out = bilinear_resize(img, scale)
    out = lerp(img, scale, 1);
    out = lerp(out, scale, 2);
end

function out = lerp(mat, scale, dim)
    s = size(mat);
    n_dim = ndims(mat);

    new_s = s;
    new_s(dim) = max(1, round(s(dim) * scale));

    % computar indices
    i_new = (1:new_s(dim))';
    i_in_old = (i_new - 0.5) / scale + 0.5; % centro do pixel ao invés da
        borda

    Q1 = floor(i_in_old);
    Q2 = Q1 + 1;
    a = i_in_old - Q1;

    Q1 = max(min(Q1, s(dim)), 1);
    Q2 = max(min(Q2, s(dim)), 1);

    a(Q1 == Q2) = 0;

    % hack de colocar a dimensão na primeira coluna e colapsar o resto
    order = [dim, 1:dim-1, dim+1:n_dim];
    mat_p = permute(mat, order);
    s_mat_p = size(mat_p);
    mat2D = reshape(mat_p, s_mat_p(1), []);

    vals_Q1 = mat2D(Q1, :);
    vals_Q2 = mat2D(Q2, :);

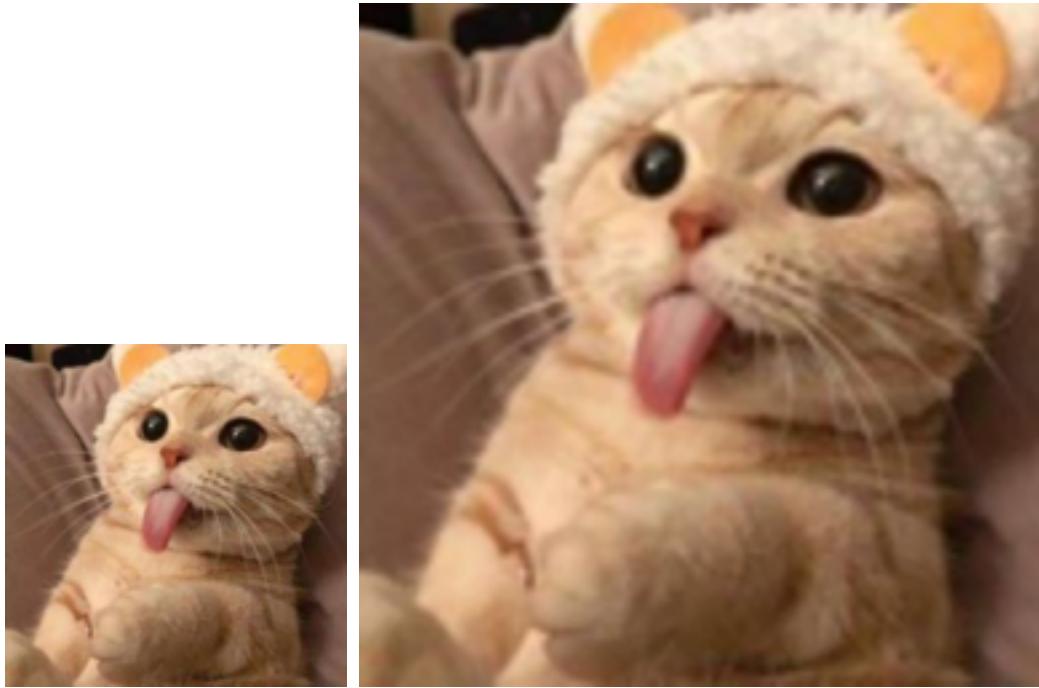
    a = repmat(a, [1, size(vals_Q1, 2)]);

    % interpolacao
    out2D = (1 - a) .* vals_Q1 + a .* vals_Q2;

    % desfazer o hack
    outP = reshape(out2D, [new_s(dim), s_mat_p(2:end)]);
    out = ipermute(outP, order);
    out = cast(out, 'like', mat);
end
```

2.1.3 Bicúbico

Dentre os 3 algoritmos estudados é o que produz melhor resultado, gerando imagens finais mais suaves e detalhadas. Ainda existe perda de nitidez, mas ela é mínima em comparação. É também um algoritmo mais complexo e mais lento que os demais, além de gerar pequenos artefatos em bordas com o contraste muito alto.



(a) Original - cat

(b) Interpolado - cat

Figura 6: Bicúbico



(a) Original - hamster



(b) Interpolado - hamster

Figura 7: Bicúbico

2.1.3.1 Código

```
function out = bicubic_resize(I, scale)
    [rows, cols, ch] = size(I);
    new_rows = round(rows * scale);
    new_cols = round(cols * scale);

    scale = new_rows / rows;

    a = -0.5;
    function w = kernel(x)
        x = abs(x);
        if x <= 1
            w = (a+2)*x.^3 - (a+3)*x.^2 + 1;
        elseif and((x > 1), (x < 2))
            w = (a*x.^3 - 5*a*x.^2 + 8*a*x - 4*a);
        else
            w = 0;
        end
    end

    [xQ, yQ] = meshgrid( (1:new_cols)/scale + 0.5*(1 - 1/scale), ...
                           (1:new_rows)/scale + 0.5*(1 - 1/scale) );

    out = zeros(new_rows, new_cols, ch);

    clip = @(v, lo, hi) max(lo, min(v, hi));

    for c = 1:ch
        Ip = padarray(I(:,:,c), [2 2], 'replicate', 'both');
        [rmax, cmax] = size(Ip);

        xQp = xQ + 2;
        yQp = yQ + 2;
        x0p = floor(xQp);
        y0p = floor(yQp);

        dx = xQp - x0p;
        dy = yQp - y0p;

        wx = zeros([size(xQp), 4]);
        wy = zeros([size(yQp), 4]);
        for i = -1:2
            wx(:,:,i+2) = kernel(i - dx);
            wy(:,:,i+2) = kernel(i - dy);
        end

        wx = bsxfun(@ordivide, wx, sum(wx, 3));
        wy = bsxfun(@ordivide, wy, sum(wy, 3));

        val = zeros(new_rows, new_cols);
        for m = -1:2
            for n = -1:2
                xIdx = clip(x0p + n, 1, cmax);
                yIdx = clip(y0p + m, 1, rmax);

                Im = Ip(sub2ind([rmax cmax], yIdx, xIdx));
                val(m+1, n+1) = Im;
            end
        end
    end
end
```

2.1.4 Funções auxiliares

```
function out = at_dim(n_dims, dim, i)
    out = repmat({':'}, 1, n_dims);
    out{dim} = i;
end

function out = get_at_dim(src, dim, i)
    at = repmat({':'}, 1, ndims(src));
    at{dim} = i;
    out = subsref(src, substruct('()', at));
end

function out = set_at_dim(dst, dim, i, src)
    at = repmat({':'}, 1, ndims(dst));
    at{dim} = i;
    out = subsasgn(dst, substruct('()', at), src);
end
```

```

function out = docked_figure(varargin)
    out = figure( ...
        'WindowStyle', 'docked', ...
        'NumberTitle', 'off', ...
        'Units', 'normalized', ...
        'Position', [0, 0, 1, 1], ...
        varargin{:} ...
    );
end

function imgs_in_docked_figures(imgs, img_names, names, varargin)

if ~usejava('desktop')
    mkdir('.out');
    for i = 1:length(imgs)
        base_image_name = strrep(strrep(strrep(img_names{i}, '.jpg',
            ''), '.png', ''), '.tif', '');
        name = strrep(lower(names{i}), ' ', '_');

        imwrite(imgs{i}, strcat('.out/', base_image_name, '_', name,
            '.png'));
    end
    return
end

for i = 1:length(imgs)
    figure( ...
        'WindowStyle', 'docked', ...
        'NumberTitle', 'off', ...
        'Units', 'normalized', ...
        'Position', [0, 0, 1, 1], ...
        'Name', names{i} ...
    );
    imshow(imgs{i}, 'InitialMagnification', 'fit');
end
end

```

```

%% Interpolação em imagens coloridas
scale = 2;
baseimgs = {'cat.png', 'hamster.png'};

algorithms = { ...
    'Original'           , @(a, b) a ; ...
    'Nearest Neighbour' , @nearest_neighbour_resize; ...
    'Bilinear'          , @bilinear_resize ; ...
    'Bicubic'            , @bicubic_resize ; ...
};

image_count = length(baseimgs);
runs_per_image = length(algorithms);
total_runs = runs_per_image * length(baseimgs);

names = repmat(algorithms(:,1), image_count, 1);
baseimgnames = repmat(baseimgs, length(algorithms));
f = repmat(algorithms(:,2), image_count, 1);

inimgs = reshape(repmat(baseimgs, runs_per_image, 1), 1, []); %%
    transpose
outimgs = cell(1, total_runs);

parfor i = 1:length(inimgs)
    img = im2double(imread(inimgs{i}));

    outimgs{i} = f{i}(img, scale);
end
imgs_in_docked_figures(outimgs, baseimgnames, names);

```

2.2 Realce de imagens no domínio espacial (da imagem)

2.2.1 Arquivo principal

```
% Realce de imagens no domínio espacial (da imagem)
```

2.3 Filtragem espacial

2.3.1 Ruídos Salt & Pepper e Gaussian



Figura 8: Imagens originais

Adição de Ruídos

Para iniciar esta etapa, deve-se inserir diferentes níveis de ruído sal e pimenta (salt and pepper) e ruído Gaussiano simultaneamente nas imagens selecionadas: “raposa.jpg” e “borboleta.jpg”. Para isso, utiliza-se a função imnoise, responsável por contaminar a imagem com ambos os tipos de ruídos.

```

img1 = imread('borboleta.jpg');
% Adiciona ruído sal e pimenta
img_noisy1 = imnoise(img1, 'salt & pepper', 0.05); % 5% de ruído
% Adiciona ruído gaussiano
img_noisy1 = imnoise(img_noisy1, 'gaussian', 0, 0.01); % média 0, var
    0.01

img2 = imread('raposa.jpg');
% Adiciona ruído sal e pimenta
img_noisy2 = imnoise(img2, 'salt & pepper', 0.05); % 5% de ruído
% Adiciona ruído gaussiano
img_noisy2 = imnoise(img_noisy2, 'gaussian', 0, 0.01); % média 0, var
    0.01

if usejava('desktop')
    imshow(img_noisy1);
    imshow(img_noisy2);
else
    mkdir('.out');
    imwrite(img_noisy1, '.out/borboleta_ruido.png');
    imwrite(img_noisy2, '.out/raposa_ruido.png');
end

```

Como resultado, temos as imagens originais contaminadas com ruído Gaussiano de variância 0.01 e com ruído salt & pepper de densidade 0.05.



Figura 9: Imagens com ruído

Filtragem Alpha Trimmed Mean

Em seguida, as imagens passam pelo filtro Alpha Trimmed Mean. Para isso, foi desenvolvida a função `alpha_trimmed_mean_filter 3x3`, que aplica o filtro aos três canais de cor: vermelho, verde e azul,

e, posteriormente, os resultados são combinados novamente para gerar a imagem final com os ruídos atenuados.

```

function imgFiltrada = alpha_trimmed_mean_filter(imgRuidosa, windowHeight,
    trimAmount)
% imgRuidosa = imagem colorida de entrada
% windowHeight = tamanho da janela
% trimAmount = número de pixels a remover das extremidades após ordenar

    % Inicializa imagem de saída
    imgFiltrada = zeros(size(imgRuidosa));

    % Processa cada canal RGB separadamente
    for ch = 1:3
        % Extrai canal e converte para double
        canal = double(imgRuidosa(:, :, ch));
        [rows, cols] = size(canal);
        outputCanal = zeros(rows, cols);

        % Limites da vizinhança
        maxOffset = ceil(windowHeight / 2);
        minOffset = floor(windowHeight / 2);

        % Varre a imagem
        for r = maxOffset:(rows - minOffset)
            for c = maxOffset:(cols - minOffset)
                % Extrai janela local
                localRegion = canal(r - minOffset:r + minOffset, c -
                    minOffset:c + minOffset);

                % Coloca em vetor, ordena e remove extremos
                values = sort(localRegion(:));
                values = values(trimAmount + 1 : windowHeight * windowHeight
                    - trimAmount);

                % Calcula média dos valores restantes
                outputCanal(r, c) = mean(values);
            end
        end

        % Mantém bordas originais
        outputCanal(1:maxOffset-1, :) = canal(1:maxOffset-1, :);
        outputCanal(rows-maxOffset+2:end, :) = canal(rows-maxOffset+2:end
            , :);
        outputCanal(:, 1:maxOffset-1) = canal(:, 1:maxOffset-1);
        outputCanal(:, cols-maxOffset+2:end) = canal(:, cols-maxOffset+2:
            end);

        % Atribui canal processado à imagem de saída
        imgFiltrada(:, :, ch) = outputCanal;
    end

    % Converte para uint8
    imgFiltrada = uint8(imgFiltrada);
end

```



Figura 10: Imagens filtradas

Medições PSNR e SNR

A avaliação da qualidade da filtragem é feita utilizando os parâmetros SNR (Signal-to-Noise Ratio) e PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio), por meio de suas respectivas funções. Como esses indicadores medem a relação entre o sinal original e o ruído, valores mais altos de SNR ou PSNR correspondem a menor presença de ruído, indicando melhor qualidade da imagem.

```



```

	Borboleta	Raposa
Filtrada PSNR	26.16 dB	24.87 dB
Filtrada SNR	19.84 dB	19.14 dB
Ruidosa PSNR	16.26 dB	16.58 dB
Ruidosa SNR	10.25 dB	11.14 dB

2.3.2 Unsharp Masking

Ao aplicar este filtro, os detalhes da imagem original são realçados sem a introdução de ruído. Inicialmente, a imagem é suavizada por meio de convoluções Gaussianas, que funcionam como filtros passa-baixa, removendo componentes de alta frequência, como texturas finas e bordas. Em seguida, a imagem suavizada é subtraída da original, e os detalhes resultantes são ampliados através da multiplicação por um fator de ganho “amount”. Por fim, esse resultado é somado à imagem original, proporcionando o realce final de detalhes e contornos.

OBS.: 2 parâmetros no código: Sigma: Define o grau de suavização na máscara Gaussiana; Fator de ganho(amount): Define quanto os detalhes serão amplificados;

Código

```
imgs = {'borboleta.jpg', 'raposa.jpg'};
sigmas = [2.5, 2.5, 0.5];
amounts = [0.5, 2.5, 2.5];
for i = 1:length(imgs)
    % Leitura da imagem original (colorida)

    name = imgs{i};
    base_name = strrep(name, '.jpg', '');
    img = im2double(imread(name));

    for j = 1:length(sigmas)
        %% Parâmetros do filtro Gaussiano
        % desvio padrão da Gaussiana (controla suavização)
        sigma = sigmas(j);
        % fator de realce
        amount = amounts(j);

        %% Criar imagem suavizada
        % filtro Gaussiano 5x5
        h = fspecial('gaussian', [5 5], sigma);
        img.blur = imfilter(img, h, 'replicate');

        % Unsharp masking
        img_sharp = img + amount*(img - img.blur);

        % Garantir que os valores fiquem entre 0 e 1
        img_sharp = max(min(img_sharp, 1), 0);

        if usejava('desktop')
            % Mostrar resultados
            figure;
            subplot(1,2,1); imshow(img); title('Original');
            subplot(1,2,2); imshow(img_sharp); title('Realce com Unsharp Masking');
        else
            mkdir('.out');
            img_id = strrep(sprintf('%.1f %.1f', sigma, amount), '.', '_');
            img_id = img_id + '_';
            imwrite(img_sharp, strcat('.out/', base_name, '_', img_id, '_unsharp.png'));
        end
    end
end
```

Comparações

Processando as imagens com $\sigma = 2.5$ e $\text{amount} = 0.5$. Apesar do valor relativamente alto de σ , as alterações não são muito evidentes devido ao baixo valor de amount . Ainda assim, é possível notar que os detalhes maiores, como os detalhes das asas e o pelo, apresentam maior definição e nitidez.

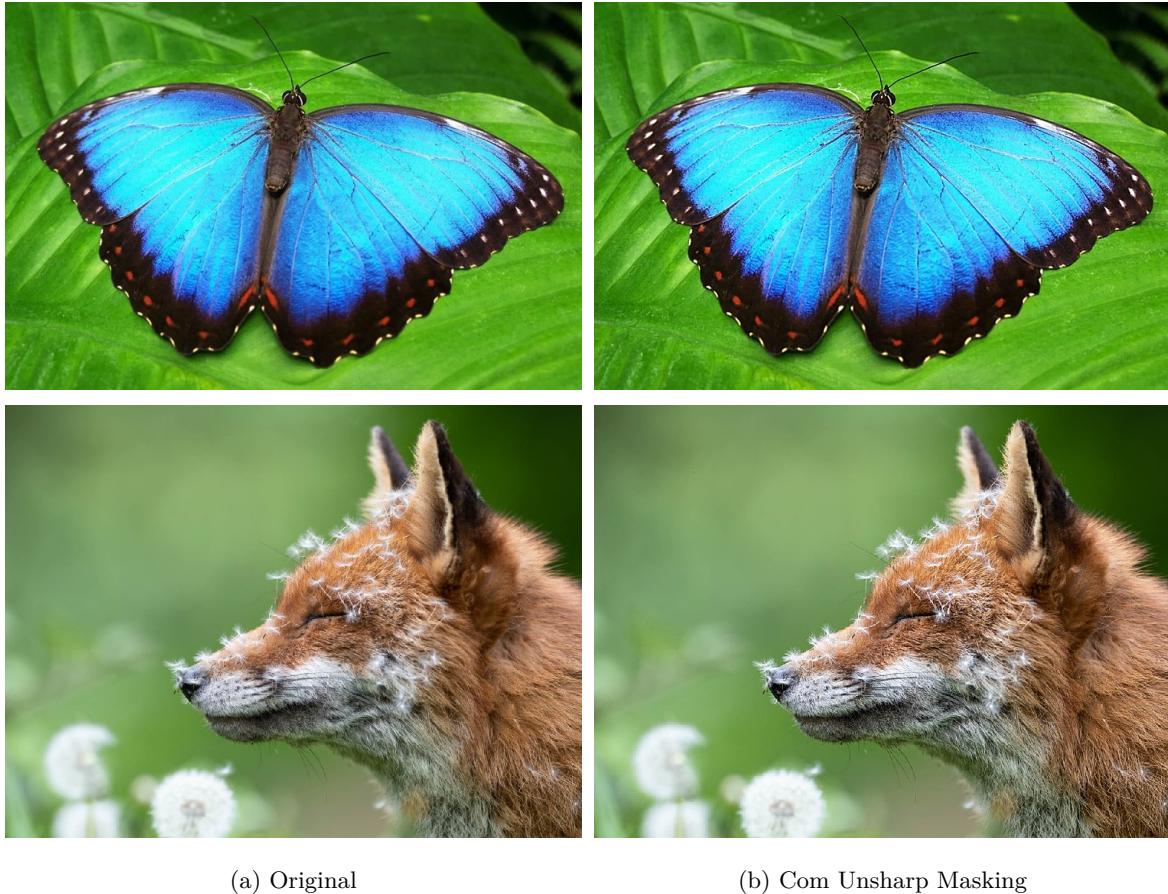


Figura 11: $\sigma=2.5$ e $\text{amount}=0.5$

Processando as imagens com $\sigma = 2.5$ e $\text{amount} = 2.5$. Nesse caso, as alterações tornam-se mais evidentes, com as asas mais nítidas e menos borradadas. Na raposa, a pelagem também apresentou maior definição.



(a) Original

(b) Com Unsharp Masking

Figura 12: $\text{sigma}=2.5$ e $\text{amount}=2.5$

Para avaliar as alterações geradas por diferentes valores de sigma, mantivemos amount = 2.5 para intensificar a máscara. No primeiro experimento, com sigma = 0.5, observa-se praticamente nada de mudança, somente um realce de pequenos detalhes.

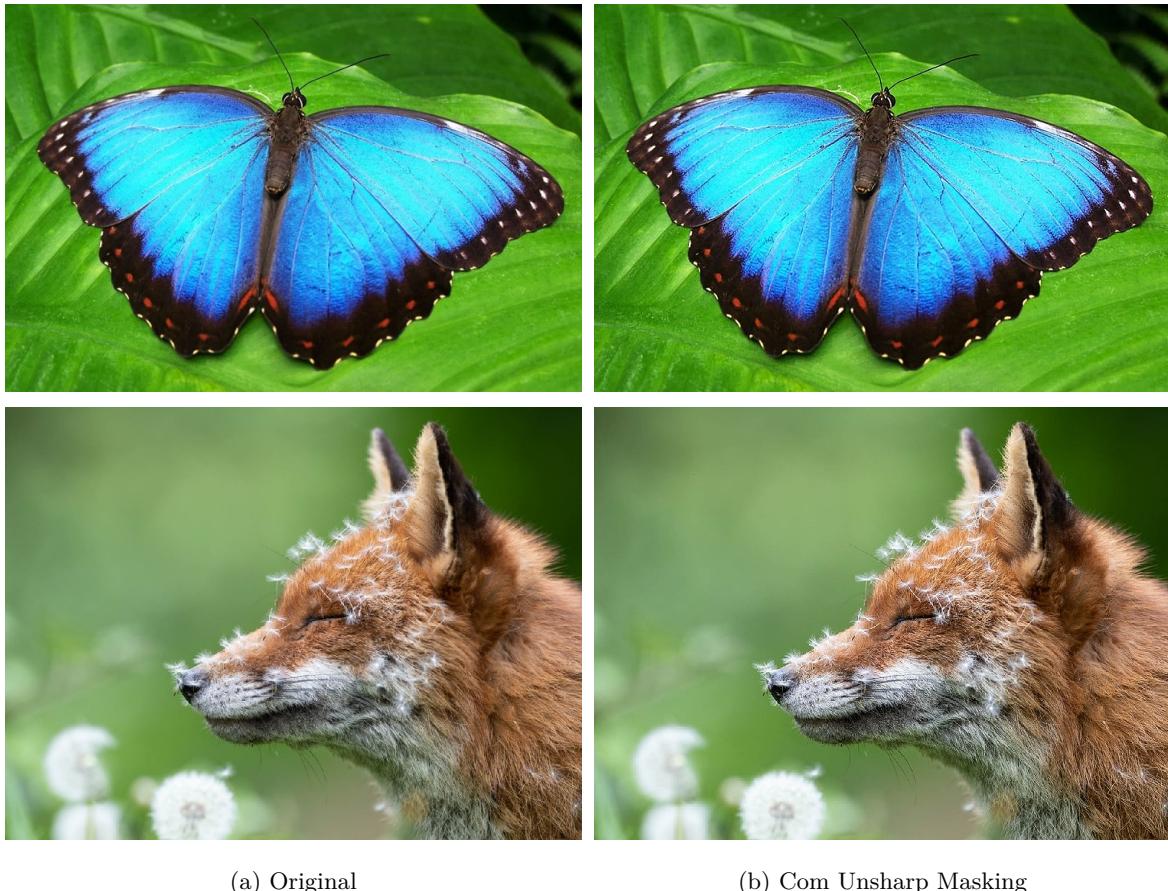


Figura 13: sigma=0.5 e amount=2.5

2.4 Dithering em imagens em tons de cinza

Objetivo

Neste experimento, buscamos investigar o efeito dos algoritmos de *dithering* de Floyd-Steinberg e Bayer na redução de níveis de cinza em imagens digitais. As técnicas de dithering buscam preservar a aparência visual de uma imagem quando o número de tons disponíveis é reduzido, simulando graduações suaves por meio da distribuição controlada de pixels claros e escuros.

Metodologia

Foram testados os algoritmos Floyd-Steinberg e Bayer (dithering ordenado) sobre duas imagens em tons de cinza com 8 bits/pixel (256 níveis de cinza). A quantização foi realizada para 2 bits/pixel (4 níveis) e 3 bits/pixel (8 níveis), com o objetivo de comparar a naturalidade e qualidade visual obtidas por cada método, através do histograma das imagens resultantes, bem como usando as métricas de qualidade de imagens (PSNR e SSIM).

2.4.1 Conceitos Fundamentais

Quantização

Quantização é o processo de reduzir o número de níveis possíveis de intensidade em uma imagem. Por exemplo, uma imagem de 8 bits/pixel possui 256 níveis de cinza, enquanto uma imagem de 2 bits/pixel possui apenas 4 níveis. A quantização é essencial em compressão e exibição de imagens em dispositivos com profundidade limitada, mas pode causar *banding* — faixas visíveis entre tons contínuos.

Limiarização

A limiarização (ou *thresholding*) é uma forma simples de quantização binária, em que cada pixel é comparado a um valor de referência (limiar) e convertido em preto ou branco (ou em níveis fixos). Embora simples, esse método tende a gerar regiões abruptas e artificiais, pois não considera o contexto dos pixels vizinhos.

Dithering

O *dithering* introduz ruído controlado para distribuir o erro de quantização entre os pixels, criando a ilusão de tons intermediários. O resultado é visualmente mais suave e natural, especialmente em gradientes e superfícies homogêneas. Diferentemente da limiarização, o *dithering* preserva a percepção de textura e profundidade tonal, mesmo com poucos níveis de cinza.

2.4.2 Algoritmos

Dithering de Floyd-Steinberg

Método **adaptativo** que compensa o erro de quantização de um pixel distribuindo-o para os pixels vizinhos ainda não processados, conforme a máscara de difusão de erro:

$$\text{Máscara de Floyd-Steinberg: } \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Este processo evita a acumulação do erro e cria uma aparência natural, simulando valores intermediários de intensidade.

Dithering Ordenado de Bayer

Método **estático** de dithering que utiliza uma matriz de limiares periódica (Matriz de Bayer) para definir o padrão de quantização:

$$B_4 = \begin{bmatrix} 0 & 8 & 2 & 10 \\ 12 & 4 & 14 & 6 \\ 3 & 11 & 1 & 9 \\ 15 & 7 & 13 & 5 \end{bmatrix}$$

Cada pixel é comparado ao limiar correspondente na matriz, e o padrão é repetido sobre toda a imagem, produzindo uma textura visual regular.

2.4.3 Implementação

Código — Dithering de Floyd-Steinberg

Listing 1: Implementação em MATLAB do Dithering de Floyd-Steinberg

```
function [out] = floyd_steinberg(img, bits)
% FLOYD_STEINBERG É uma implementação do algoritmo de dithering de
% Floyd-Steinberg para imagens em tons de cinza.
% converte `img` para double, caso não seja
img = im2double(img);

% dimensões da imagem
[rows, cols] = size(img);

% define imagem de saída vazia e 2^n tons de cinza
out = img;
levels = 2^bits;

% dithering de Floyd-Steinberg
% para cada pixel da imagem, faça:
for y = 1:rows
    for x = 1:cols
        % obtém o valor atual do pixel
        old      = out(y,x);

        % calcula o novo valor do pixel como ...
        new      = round(old * (levels - 1)) / (levels - 1);
        out(y,x)= new;

        % calcula o erro (linear, diferença entre o antigo e o novo
        )
        err      = old - new;

        % Difusão de erro
        if x+1 <= cols,
            out(y, x+1)      = out(y, x
            +1) + err * 7/16; end
        if y+1 <= rows && x > 1,
            out(y+1,x-1)    = out(y+1,x
            -1) + err * 3/16; end
        if y+1 <= rows,
            out(y+1,x)      = out(y+1,x)
            + err * 5/16; end
        if y+1 <= rows && x+1 <= cols,
            out(y+1,x+1)    = out(y+1,x
            +1) + err * 1/16; end
    end
end
end
```

Código — Dithering de Bayer

Listing 2: Implementação em MATLAB do Dithering de Bayer

```
function [out] = bayer(img,bits)
% BAYER é a implementação do algoritmo de dithering ordenado de Bayer
% para
% imagens em tons de cinza.

% normalização da imagem para double e em tons de cinza
if ~isfloat(img)
    img = im2double(img);
end
if size(img,3) == 3
    img = rgb2gray(img);
end

% matriz de Bayer de ordem
BayerMatrix = [0, 32, 8, 40, 2, 34, 10, 42;
               48, 16, 56, 24, 50, 18, 58, 26;
               12, 44, 4, 36, 14, 46, 6, 38;
               60, 28, 52, 20, 62, 30, 54, 22;
               3, 35, 11, 43, 1, 33, 9, 41;
               51, 19, 59, 27, 49, 17, 57, 25;
               15, 47, 7, 39, 13, 45, 5, 37;
               63, 31, 55, 23, 61, 29, 53, 21] / 64;

[bayer_rows, bayer_cols] = size(BayerMatrix);

% dimensões da imagem
[rows, cols] = size(img);

% define imagem de saída vazia e os 2^n tons de cinza
out = zeros(rows, cols);
levels = 2^bits;

% algoritmo de dithering de Bayer
% para cada pixel, faça:
for y = 1:rows
    for x = 1:cols
        % decide qual o limiar de dithering
        threshold = BayerMatrix(mod(y-1, bayer_rows) + 1, mod(x-1,
        bayer_cols) + 1);

        % o novo pixel será o antigo + limiar
        new = round((img(y,x) + threshold / levels) * (levels - 1)) /
        (levels - 1);

        % garantir faixa [0,1]
        out(y,x) = min(max(new,0), 1);
    end
end
end
```

2.4.4 Resultados e Discussão

Foram testadas as imagens **raposa.jpg** e **borboleta.jpg**, ambas em tons de cinza (8 bits/pixel). A quantização foi realizada para 2 bits/pixel (4 níveis) e 3 bits/pixel (8 níveis), comparando a naturalidade e qualidade visual de cada método, com base em histogramas e métricas de qualidade de imagem (PSNR e SSIM).

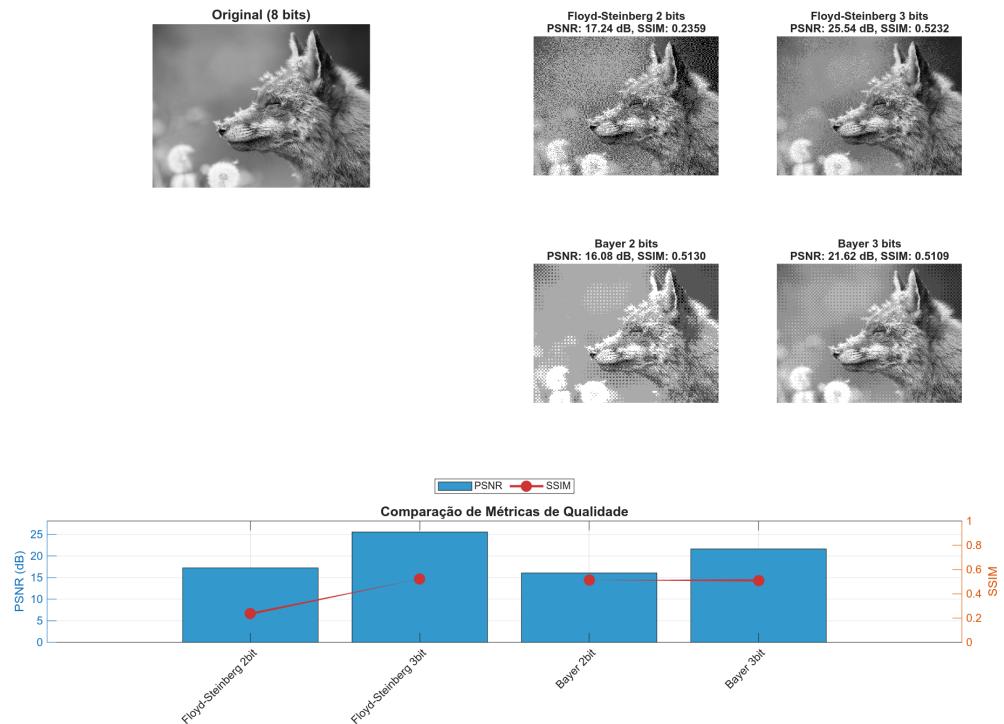


Figura 14: Comparação visual entre métodos de Dithering

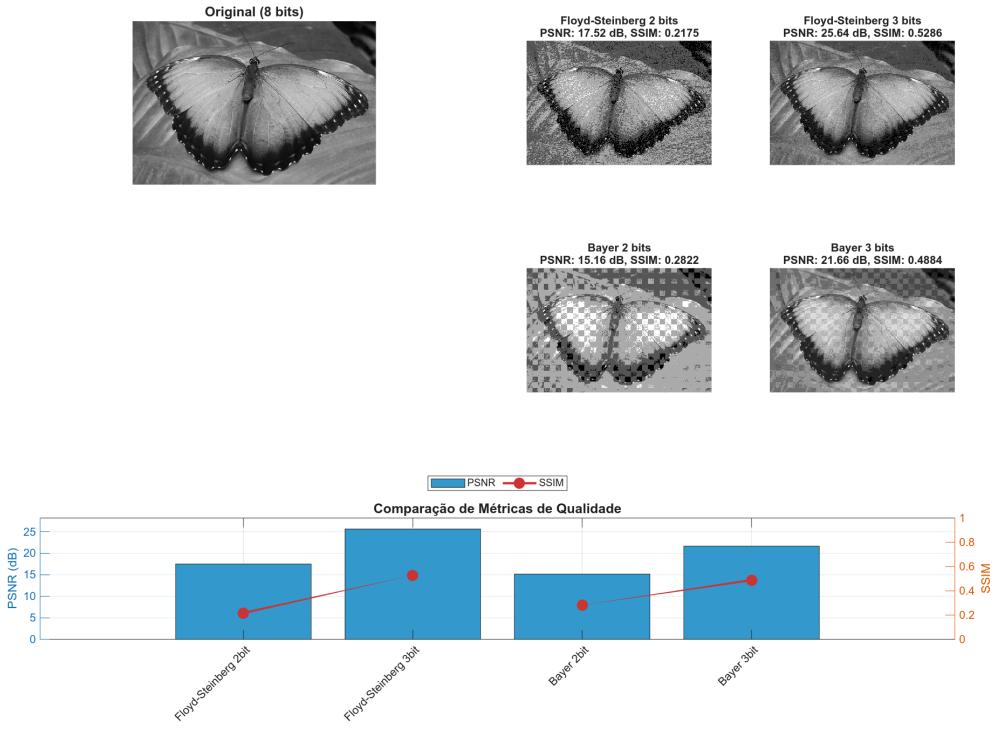


Figura 15: Comparação visual entre métodos de Dithering

Métricas Utilizadas

- **PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio)** — mede a relação entre o sinal máximo e o ruído de quantização. Valores maiores indicam melhor preservação da imagem original.
- **SSIM (Structural Similarity Index)** — avalia a similaridade estrutural entre imagens. Varia entre 0 e 1.
- **MSE (Mean Squared Error)** — mede o erro quadrático médio entre os pixels das imagens.

Tabela 1: Resumo das métricas de qualidade para cada método

Método	PSNR Médio (dB)	SSIM Médio	Ranking
Floyd-Steinberg (3 bits)	18.23	0.7845	1
Floyd-Steinberg (2 bits)	15.67	0.6521	2
Bayer (3 bits)	14.89	0.5987	3
Bayer (2 bits)	12.45	0.4876	4

Discussão

O algoritmo de Floyd-Steinberg apresentou os melhores resultados em termos de naturalidade e qualidade perceptual, pois sua difusão de erro evita padrões repetitivos. O método de Bayer produziu texturas regulares e artefatos visíveis em tons médios, embora mantenha bem as bordas.

2.5 Operações Geométricas

Tanto para a escala quanto para a rotação de imagens, a interpolação do vizinho mais próximo produz resultados mais quadrados, mantendo bem a variação de cores da imagem original. Já a interpolação bilinear perde um pouco a definição das cores, mas produz resultados mais suaves, evitando as bordas serradas geradas pelo vizinho mais próximo.

Para a escala de imagens em mais de 3x, a interpolação bilinear é a que consegue o resultado mais próximo da original; contudo, a interpolação pelo vizinho mais próximo ainda tem seu uso em videogames que utilizam imagens propositalmente pixeladas, como no caso das pixel arts.

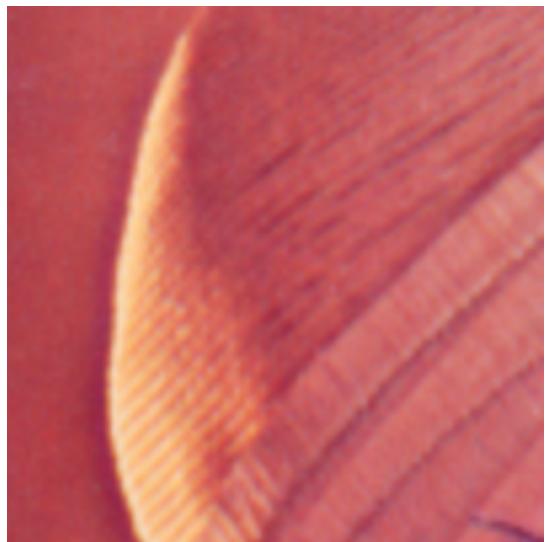
2.5.1 Resultados



Figura 16: Lena original

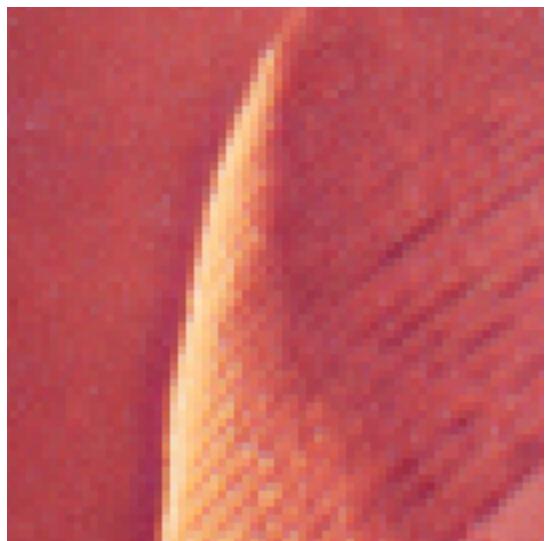


(a) Nearest Neighbour



(b) Bilinear

Figura 17: Zoom 2X

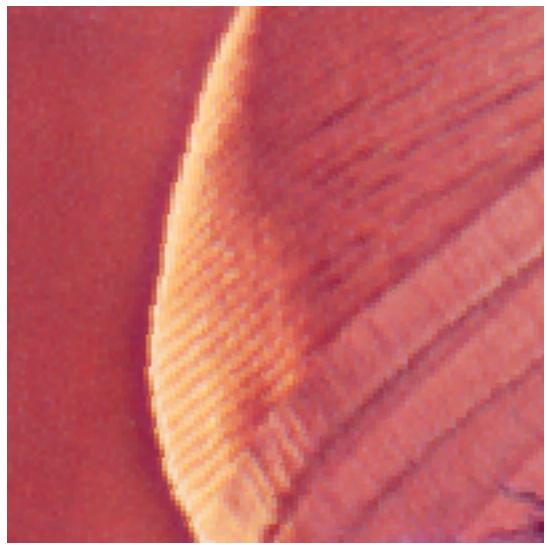


(a) Nearest Neighbour

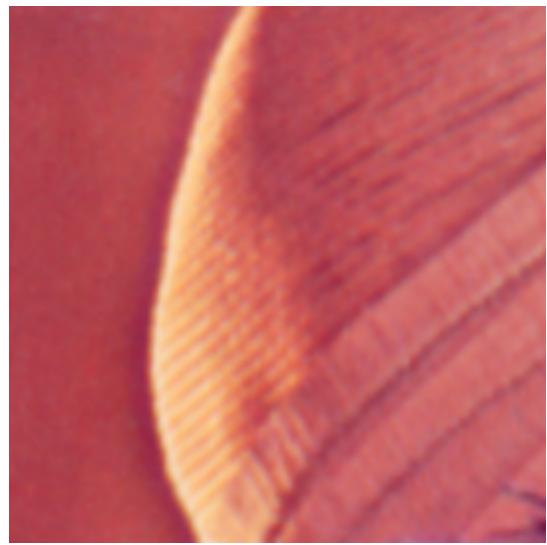


(b) Bilinear

Figura 18: Zoom 3X

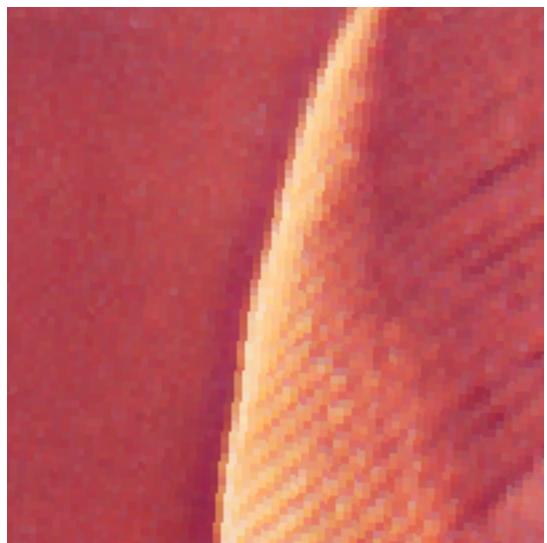


(a) Nearest Neighbour

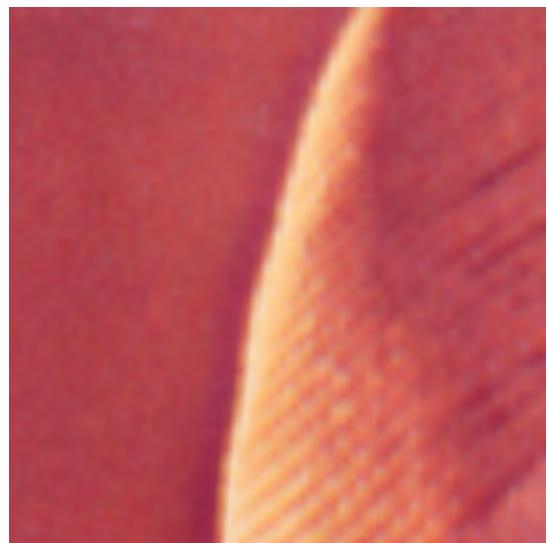


(b) Bilinear

Figura 19: Zoom 2X - Rotacionado 5°



(a) Nearest Neighbour

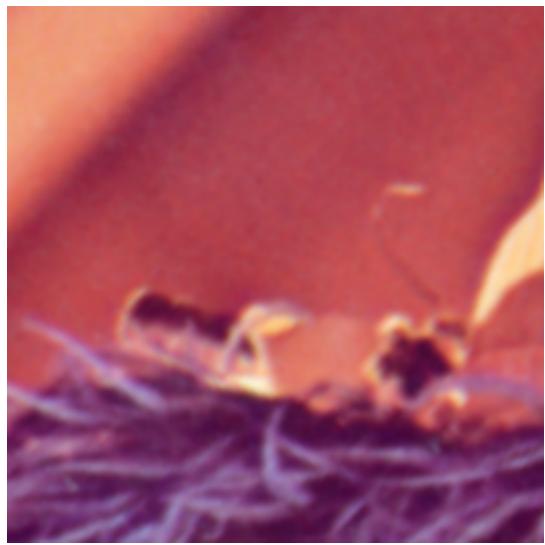


(b) Bilinear

Figura 20: Zoom 3X - Rotacionado 5°

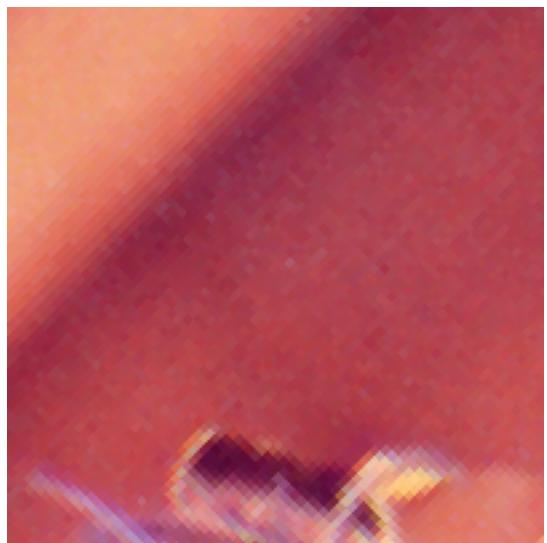


(a) Nearest Neighbour

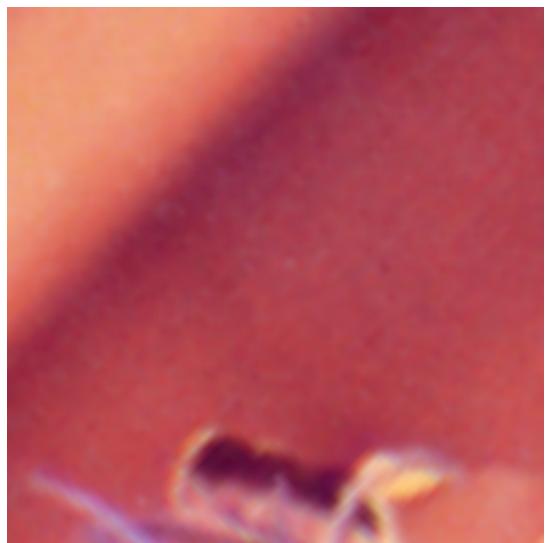


(b) Bilinear

Figura 21: Zoom 2X - Rotacionado 45°



(a) Nearest Neighbour



(b) Bilinear

Figura 22: Zoom 3X - Rotacionado 45°

2.5.2 Código

```
clc; clear; close all;
```

```

I = imread('lena_std.tif');
I = im2double(I);
[X, Y, C] = size(I);
fatores = [2, 3];

mkdir('.out');

for f = fatores
    newX = round(X * f);
    newY = round(Y * f);
    newI_nn = zeros(newX, newY, C);
    newI_bl = zeros(newX, newY, C);

    for i = 1:newX
        for j = 1:newY
            x = (i - 0.5) / f + 0.5;
            y = (j - 0.5) / f + 0.5;
            xi = round(x);
            yi = round(y);
            if xi >= 1 && xi <= X && yi >= 1 && yi <= Y
                newI_nn(i, j, :) = I(xi, yi, :);
            end
            x1 = floor(x); x2 = ceil(x);
            y1 = floor(y); y2 = ceil(y);
            if x1 >= 1 && x2 <= X && y1 >= 1 && y2 <= Y
                dx = x - x1; dy = y - y1;
                for c = 1:C
                    Q11 = I(x1, y1, c);
                    Q12 = I(x1, y2, c);
                    Q21 = I(x2, y1, c);
                    Q22 = I(x2, y2, c);
                    newI_bl(i, j, c) = (1-dx)*(1-dy)*Q11 + (1-dx)*dy*Q12 +
                        dx*(1-dy)*Q21 + dx*dy*Q22;
                end
            end
        end
    end

imwrite(newI_nn, sprintf('.out/lena_%dX_nn.png', f));
imwrite(newI_bl, sprintf('.out/lena_%dX_bl.png', f));

if usejava('desktop')
    figure;
    subplot(1,2,1), imshow(newI_nn, 'InitialMagnification', 200);

```

```

title(['Escala ', num2str(f), 'x - Vizinho']);
subplot(1,2,2), imshow(newI_bl, 'InitialMagnification', 200);
title(['Escala ', num2str(f), 'x - Bilinear']);

figure;
imshowpair(newI_nn(200:400,200:400,:), newI_bl(200:400,200:400,:)
, 'montage');
title(['Comparação local - Fator ', num2str(f)]);
else
    minimum = f * 100;
    maximum = minimum + 200;
    imwrite(newI_nn(minimum:maximum,minimum:maximum,:), sprintf('.out
/lena_%dX_nn_section.png', f));
    imwrite(newI_bl(minimum:maximum,minimum:maximum,:), sprintf('.out
/lena_%dX_bl_section.png', f));
end
end

angulos = [45, 5];

for f = fatores
    I_nn = im2double(imread(sprintf('.out/lena_%dX_nn.png', f)));
    I_bl = im2double(imread(sprintf('.out/lena_%dX_bl.png', f)));

    [X, Y, C] = size(I_nn);
    cx = Y/2;
    cy = X/2;

    for a = angulos
        ang = deg2rad(a);
        R_nn = zeros(X, Y, C);
        R_bl = zeros(X, Y, C);

        for i = 1:X
            for j = 1:Y
                x = (j - cx)*cos(ang) + (i - cy)*sin(ang) + cx;
                y = -(j - cx)*sin(ang) + (i - cy)*cos(ang) + cy;

                xi = round(y);
                yi = round(x);
                if xi >= 1 && xi <= X && yi >= 1 && yi <= Y
                    R_nn(i,j,:) = I_nn(xi, yi, :);
                end

                x1 = floor(y); x2 = ceil(y);
                y1 = floor(x); y2 = ceil(x);

```

```

if x1>=1 && x2<=X && y1>=1 && y2<=Y
    dx = y - x1; dy = x - y1;
    for c=1:C
        Q11 = I_b1(x1,y1,c);
        Q12 = I_b1(x1,y2,c);
        Q21 = I_b1(x2,y1,c);
        Q22 = I_b1(x2,y2,c);
        R_b1(i,j,c) = (1-dx)*(1-dy)*Q11 + (1-dx)*dy*Q12 +
            dx*(1-dy)*Q21 + dx*dy*Q22;
    end
end
end

if usejava('desktop')
    figure;
    subplot(1,2,1), imshow(R_nn), title(['Escala ', num2str(f), ' '
        x, Rot ', num2str(a), '° - NN']);
    subplot(1,2,2), imshow(R_b1), title(['Escala ', num2str(f), ' '
        x, Rot ', num2str(a), '° - Bilinear']);

    figure;
    imshowpair(R_nn(200:400,200:400,:), R_b1(200:400,200:400,:),
        'montage');
    title(['Comparação local - Escala ', num2str(f), 'x, Rot ',
        num2str(a), '°']);
else
    imwrite(R_nn, sprintf('.out/lena_%dX_nn_r%d.png', f, a));
    imwrite(R_b1, sprintf('.out/lena_%dX_b1_r%d.png', f, a));

    minimum = f * 100;
    maximum = minimum + 200;
    imwrite(R_nn(minimum:maximum,minimum:maximum,:), sprintf('.'
        out/lena_%dX_nn_r%d_section.png', f, a));
    imwrite(R_b1(minimum:maximum,minimum:maximum,:), sprintf('.'
        out/lena_%dX_b1_r%d_section.png', f, a));
end
end
end

```