

Processamento e Análise de Imagens

Fundamentos

Felipe Augusto Lima Reis



PUC Minas

Percepção Visual

Percepção Visual

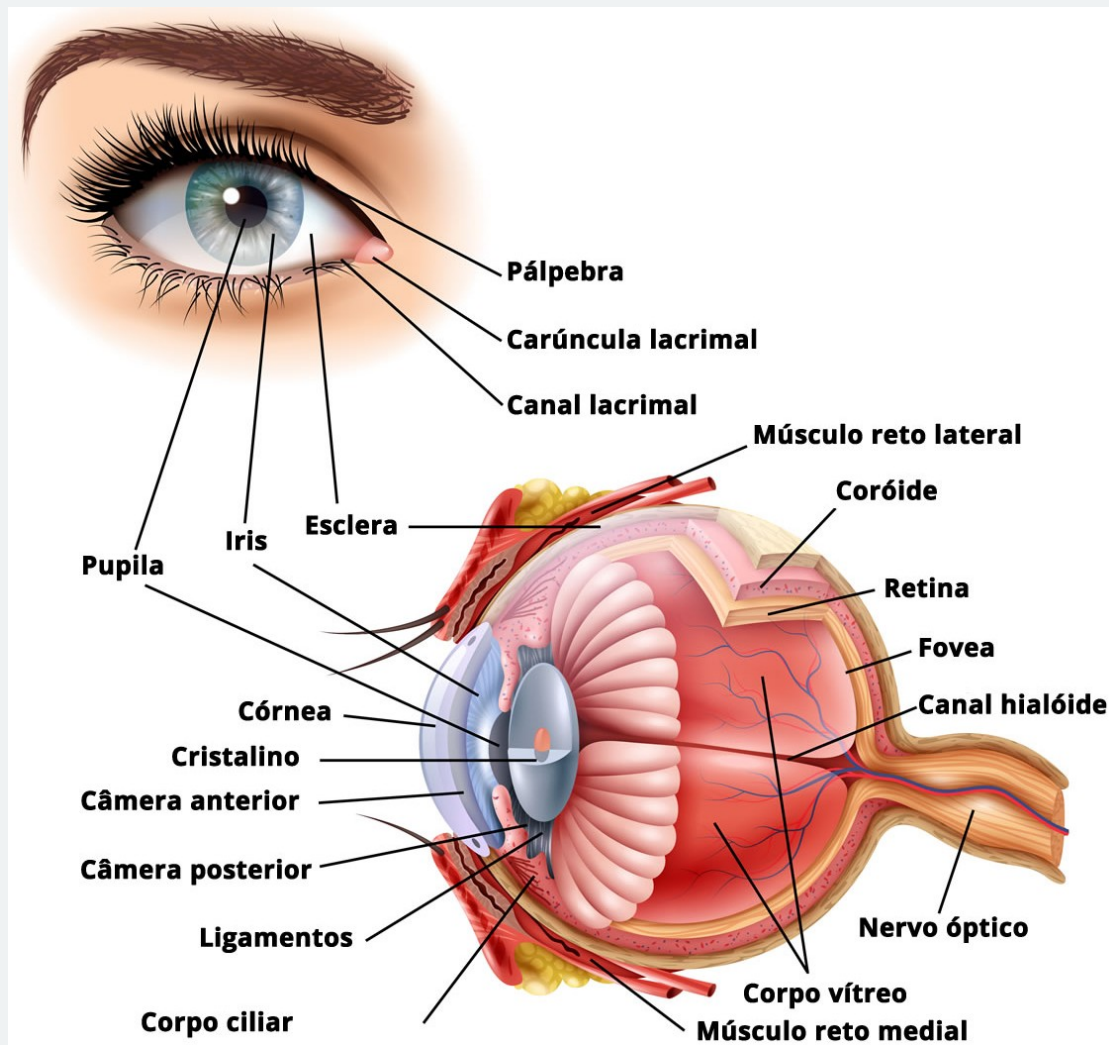
- A área de processamento digital de imagens ser fundamentada basicamente em conceitos matemáticos,
 - No entanto, a intuição e a subjetividade humana exercem considerável influência sobre os resultados produzidos pelos algoritmos;
 - Cada técnica é avaliada, muitas vezes, sobre critérios subjetivos, oriundos da percepção dos analistas, engenheiros e usuários.

Percepção Visual

- Segundo Gonzalez (2018), a visão é considerado o nosso principal sentido;
- Apesar de sua importância, esta é consideravelmente limitada
 - Seu alcance é limitado, não possibilitando o reconhecimento de objetos muito pequenos ou muito distantes;
 - Além disso, a visão humana está sujeita a “defeitos” fisiológicos (ex.: miopia, hipermetropia, etc.);
 - O processamento das informações também é sujeito a incorreções (ex.: ilusão de ótica).

Estrutura do Olho Humano

- **Córnea:** atribuição de proteger o olho humano contra traumas e contaminações;
- **Íris:** estrutura mais escura do olho, algumas vezes colorida;
 - Possui o controle de abertura e fechamento da pupila;

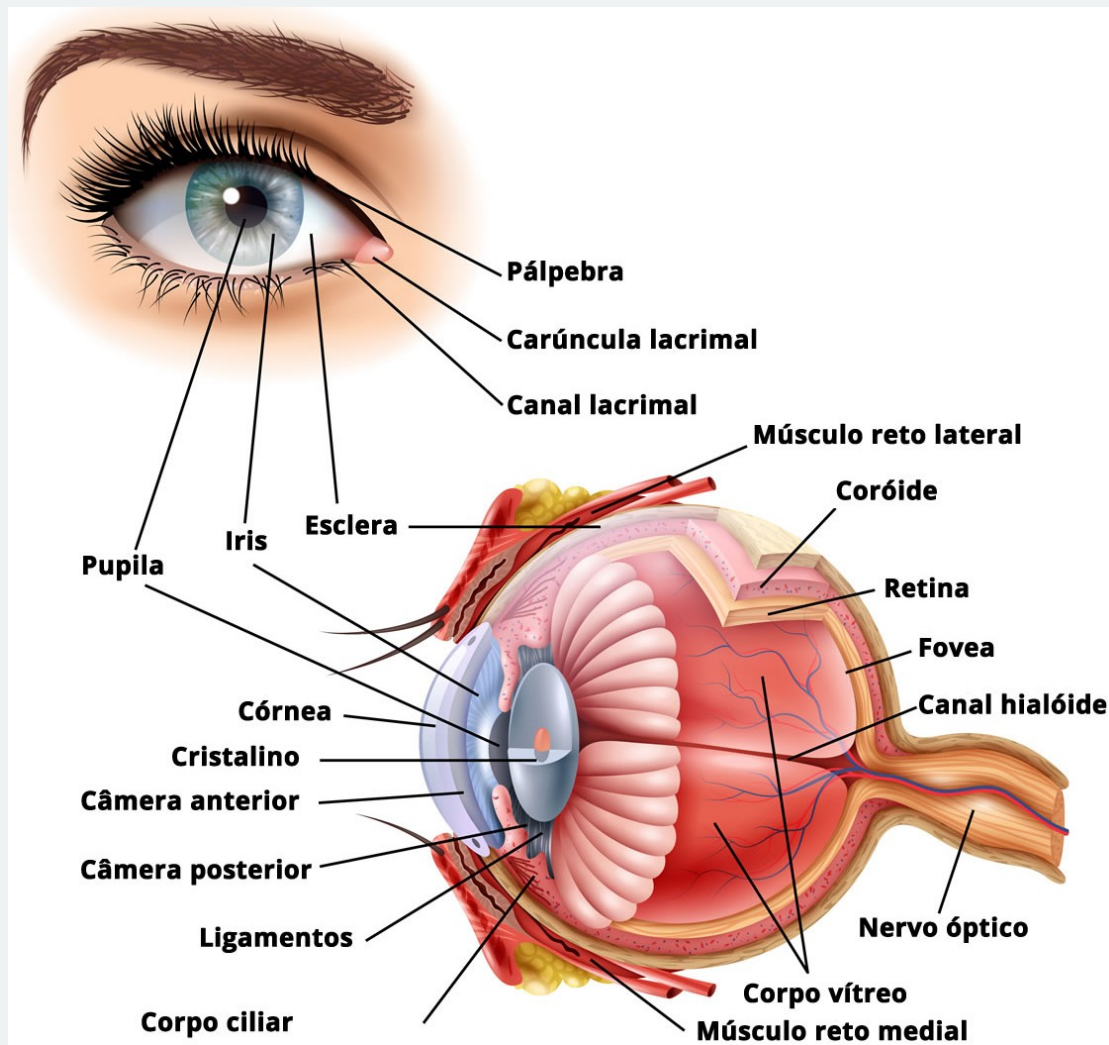


Fonte: Retina Curitiba (2023).

Estrutura do Olho Humano

- **Pupila:** responsável pela permissão de entrada de luz nos olhos, variando conforme a intensidade;
 - Em baixa luminosidade, a pupila dilata, para que entre mais luz;
 - Em alta luminosidade, a pupila se contrai, protegendo o olho;
- **Corpo Vítreo:** parte gelatinosa que ocupa o centro do olho;

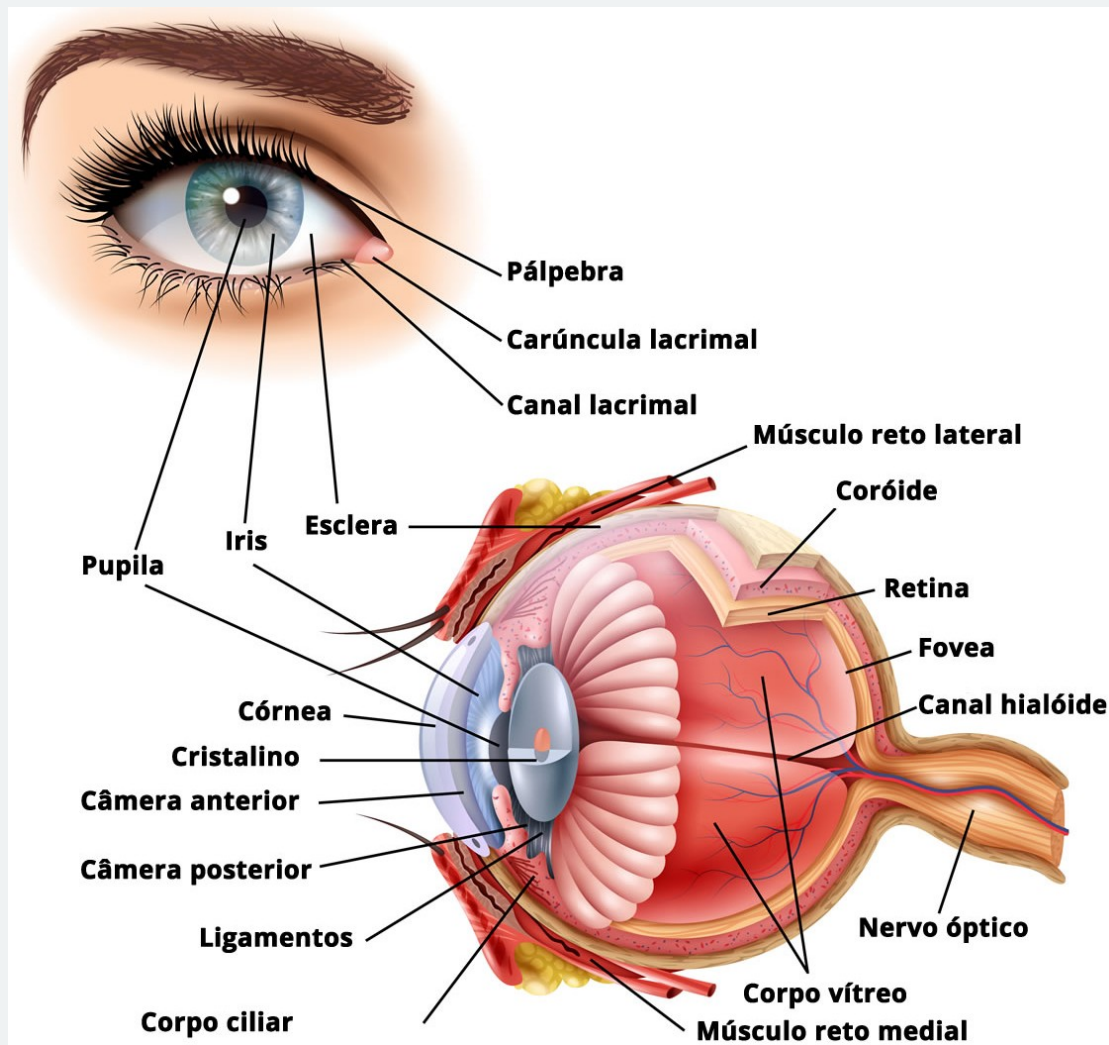
Fonte: Retina Curitiba (2023).



Estrutura do Olho Humano

- **Cristalino:** estrutura convergente que focaliza a luz que entra na pupila e possibilita a formação de imagens na retina
- Possui uma distância focal variável, conforme a necessidade;
- Realiza o ajuste fino do foco para as diferentes tarefas;

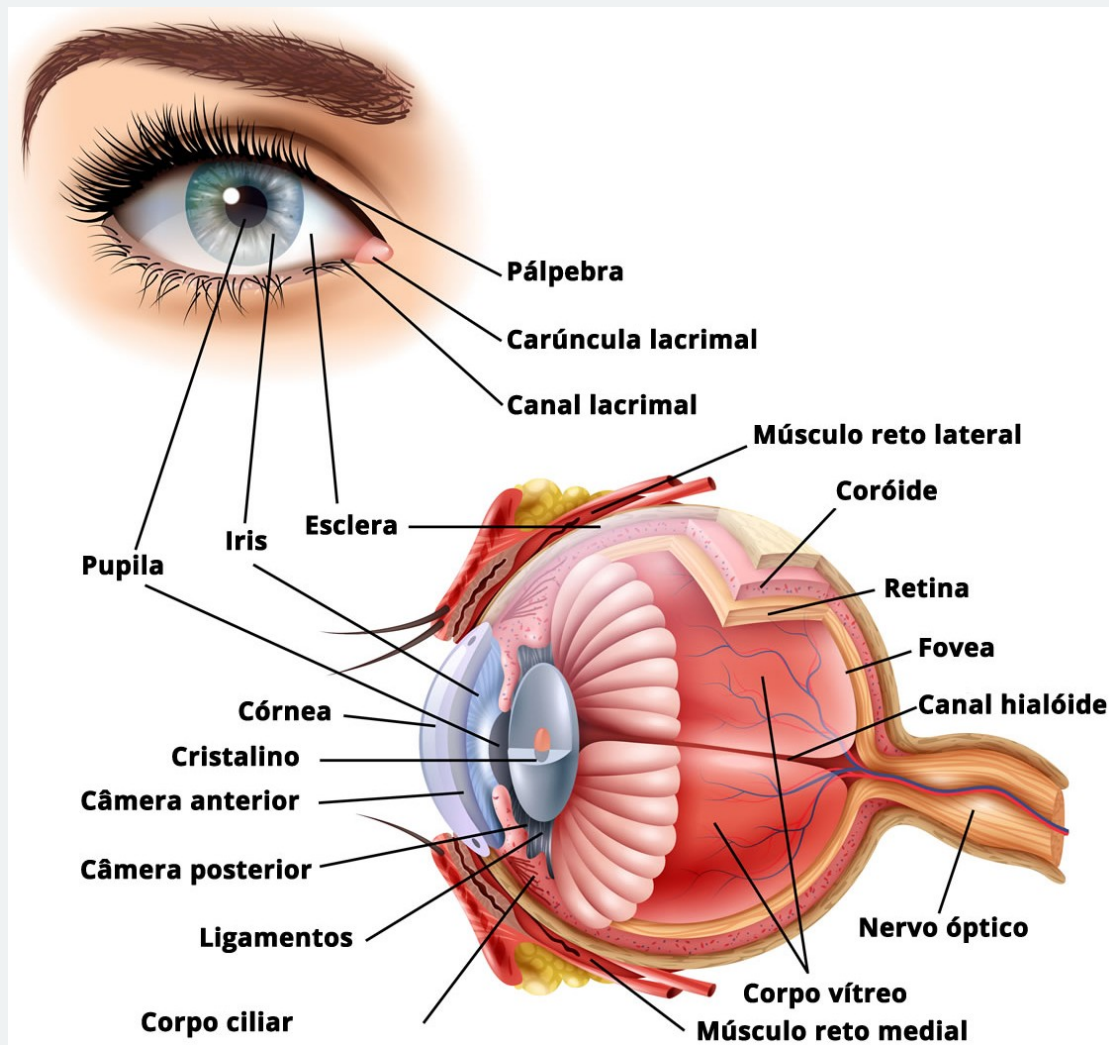
Fonte: Retina Curitiba (2023).



Estrutura do Olho Humano

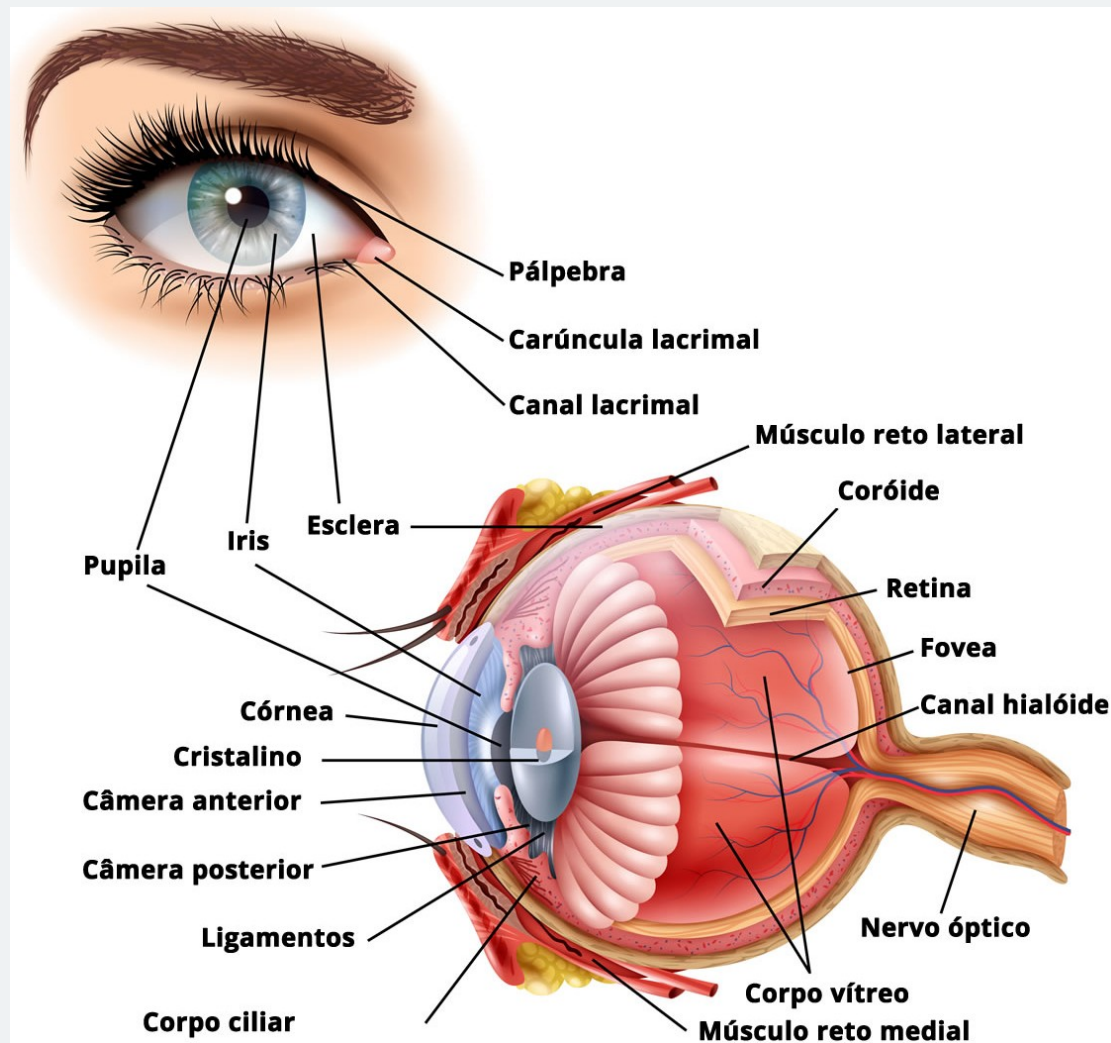
- **Retina:** parte do globo ocular onde são formadas as imagens
 - Possui células fotossensíveis, os cones e os bastonetes;
 - Cones: percebem a noção de cor;
 - Bastonetes: percebem a noção de intensidade.

Fonte: Retina Curitiba (2023).



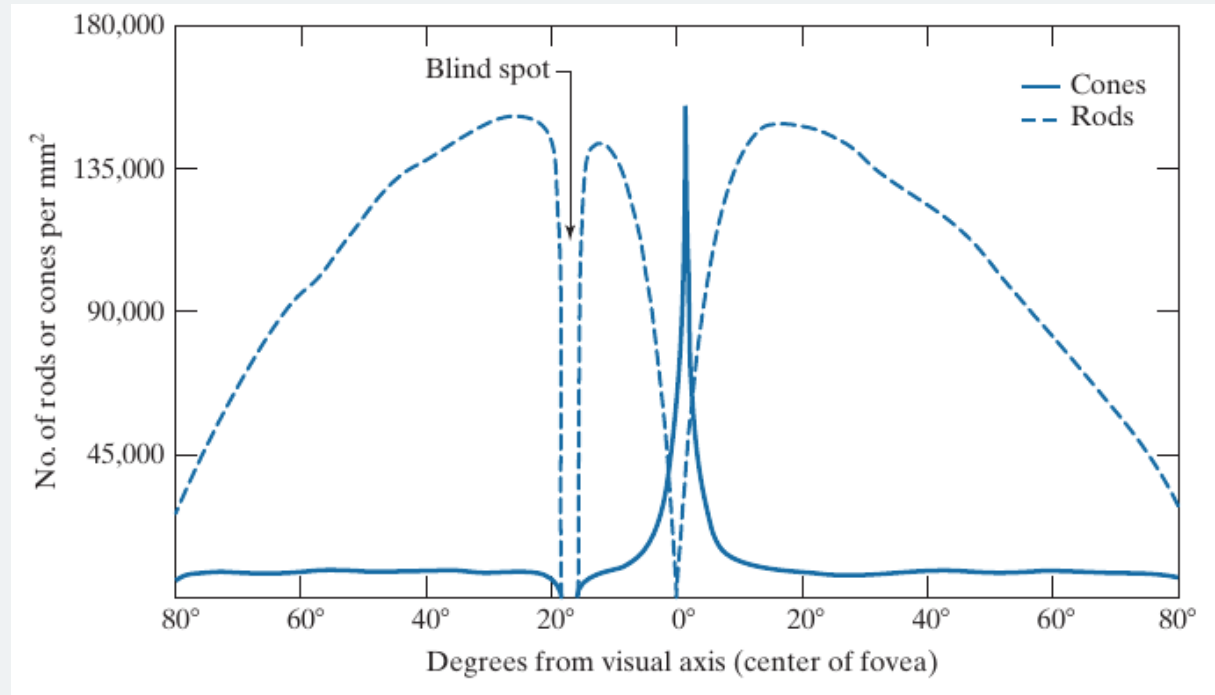
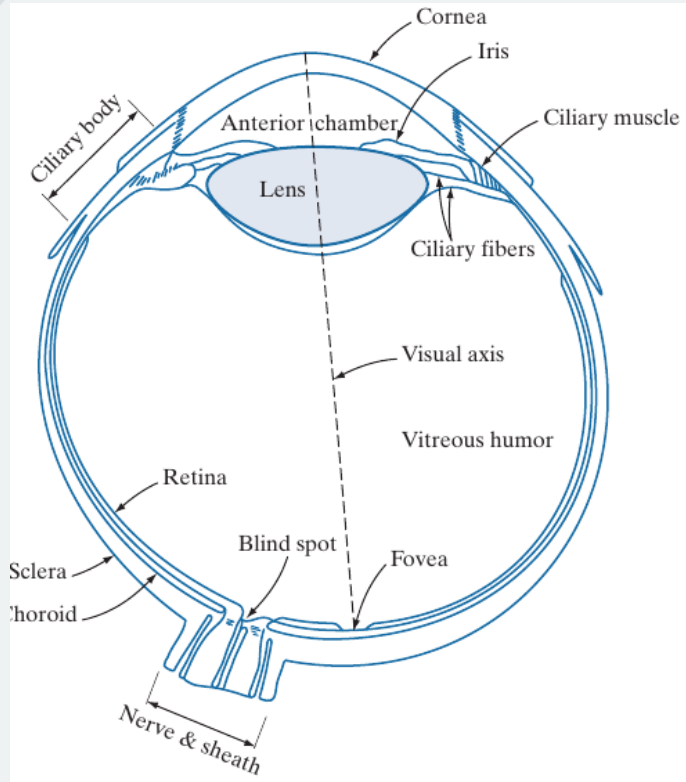
Estrutura do Olho Humano

- **Fóvea:** região especializada da retina, que permite perceber detalhes de objetos e das cores;
- **Nervo óptico:** responsável por enviar os sinais nervosos produzidos pelo olho humano para o cérebro



Fonte: Retina Curitiba (2023).

Estrutura do Olho Humano



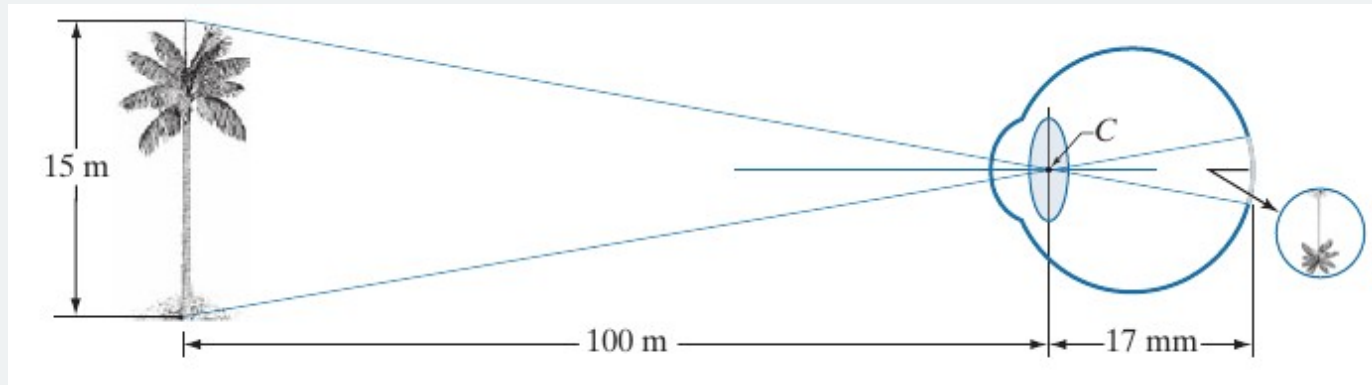
Fonte: Gonzalez & Woods (2018).

Mudança de Foco

- Para adequação às necessidades humanas, o olho deve possibilitar variação do foco
 - A distância entre o centro da lente e o sensor de imagem (a retina) é fixa, e a distância focal necessária para atingir o foco adequado é obtida variando a forma da lente (cristalino);
 - As fibras do corpo ciliar fazem isso achatando ou engrossando a lente para objetos distantes ou próximos, respectivamente;
 - A gama de distâncias focais é de aproximadamente 14 mm a 17 mm, esta última ocorrendo quando o olho está relaxado e focado a distâncias superiores a cerca de 3m;
 - Câmeras fotográficas, por outro lado, variam a distância entre as lentes e o plano de imagem.

Processamento de Informação Visual

- A percepção então ocorre pela excitação relativa dos receptores de luz, que transformam a energia radiante em impulsos elétricos que, por fim, são decodificados pelo cérebro.
- A imagem capturada é processada pelo cérebro, encarregado de ajustes necessários para entendimento da imagem.



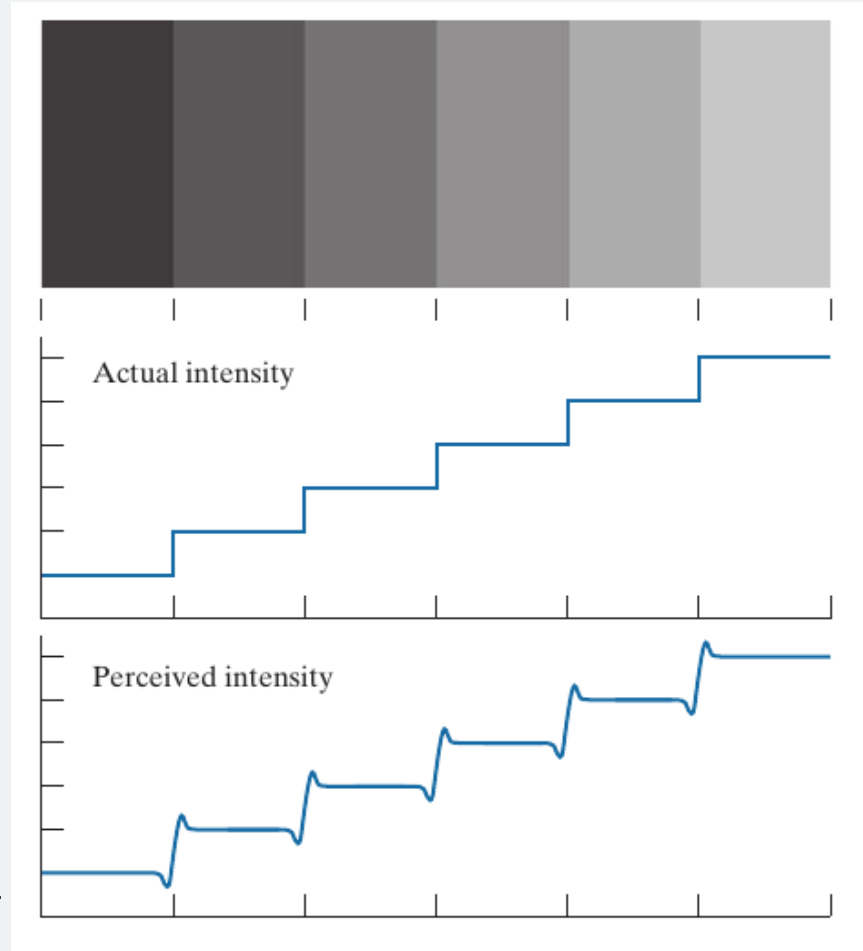
Adaptação à Luz

- Para realização de tarefas, o olho humano deve ser capaz de se adequar a diferentes níveis de luminosidade
 - Existem evidências que a percepção luminosa do olho humano possa ser representada por uma função logarítmica em relação à luz incidente no olho;
 - Um fenômeno conhecido é a capacidade de adaptação à luminosidade, que varia desde a visão escotópica (produzida pelo olho em condição de baixa luminosidade) até o limite de brilho.

Adaptação à Luz

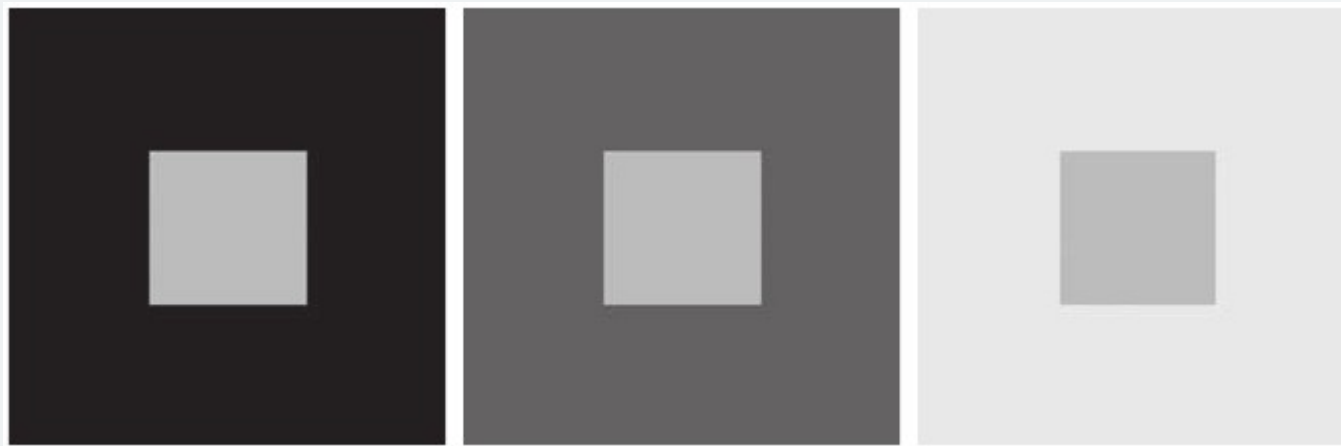
- No entanto, estudos sugerem que a percepção de luz está limitada a doze níveis máximos de intensidade – a percepção de brilho não pode ser descrita como uma simples função de intensidade
- O olho tende a supervalorizar (*overshoot*) ou subvalorizar (*undershoot*) as bordas de regiões de diferentes intensidades.

Fonte: Gonzalez & Woods (2018).



Adaptação à Luz

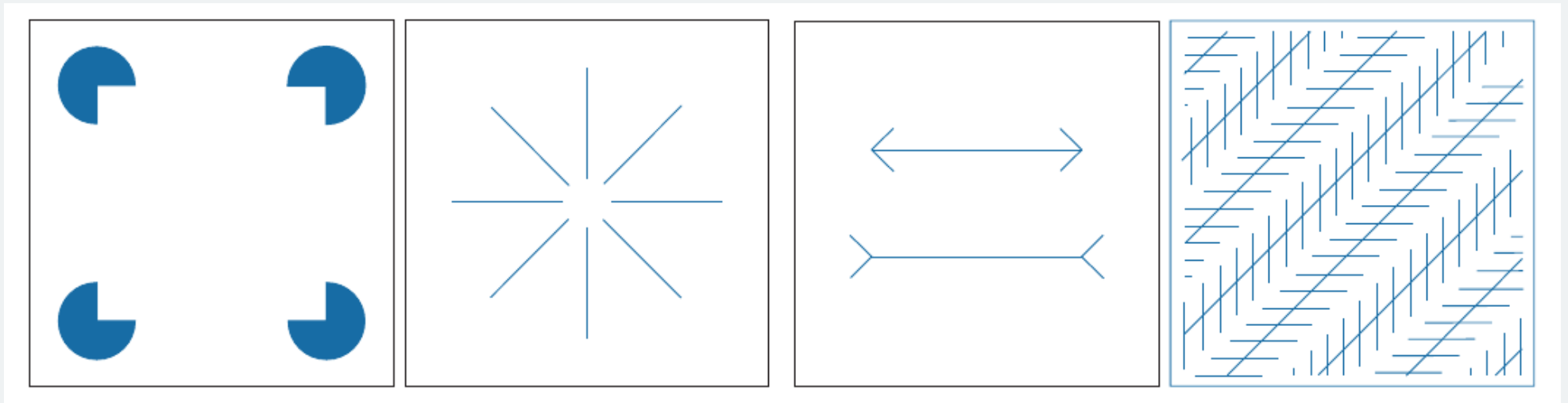
- A percepção da luz não depende apenas da luminosidade, porém é sujeita à variação do contraste da região subjacente (*simultaneous contrast*)
- Os quadrados centrais possuem todas as mesmas cores, porém são percebidos de maneira distinta.



Fonte: Gonzalez & Woods (2018).

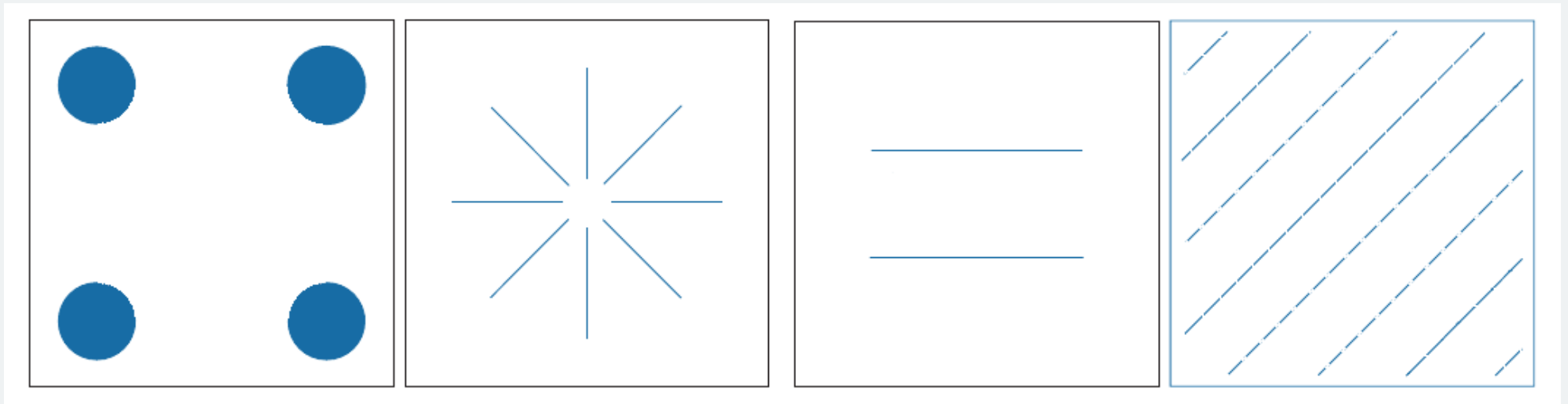
Ilusão de Ótica

- Ilusão de ótica corresponde a adição de detalhes inexistentes ou a percepção incorreta de propriedades geométricas em imagens.



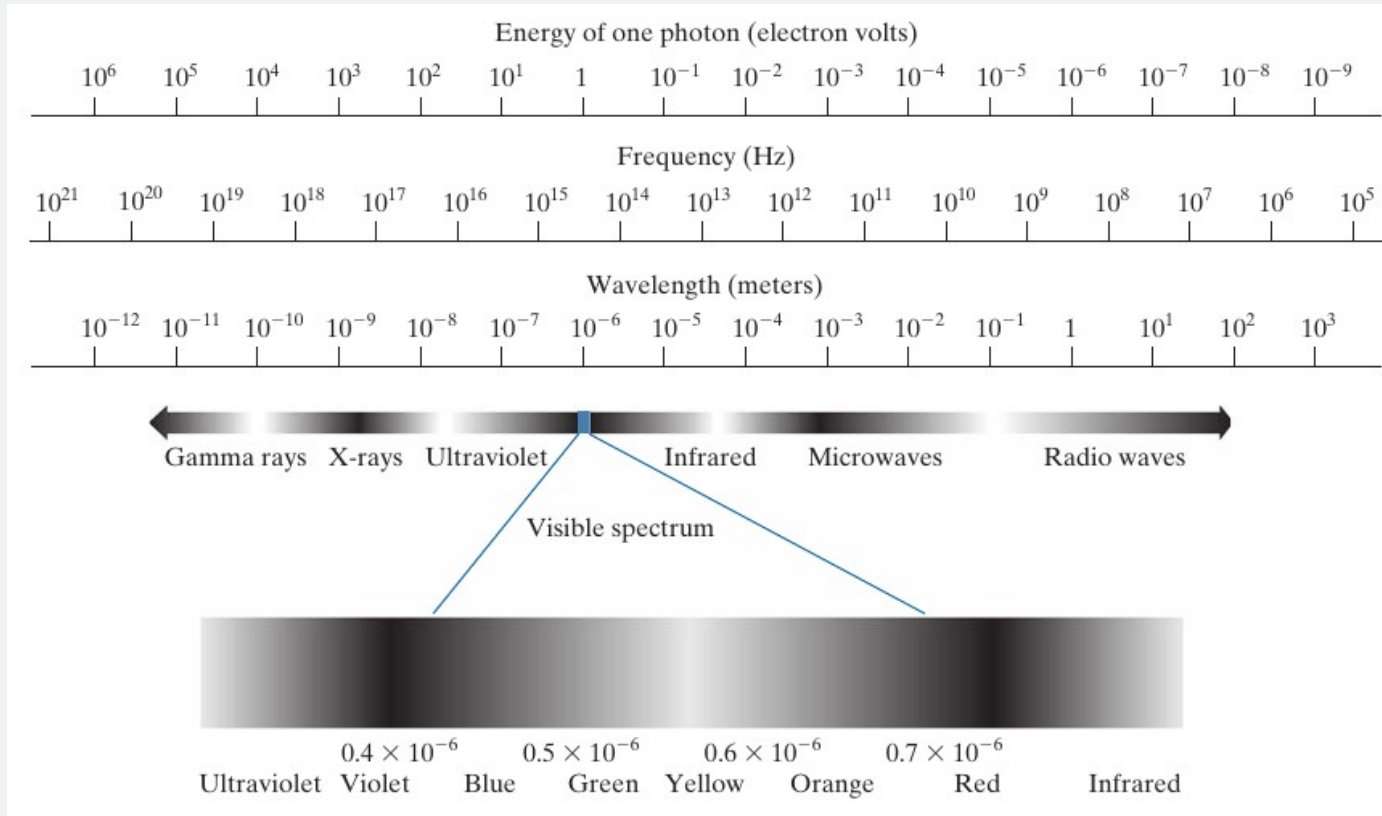
Ilusão de Ótica

- Ilusão de ótica corresponde a adição de detalhes inexistentes ou a percepção incorreta de propriedades geométricas em imagens.



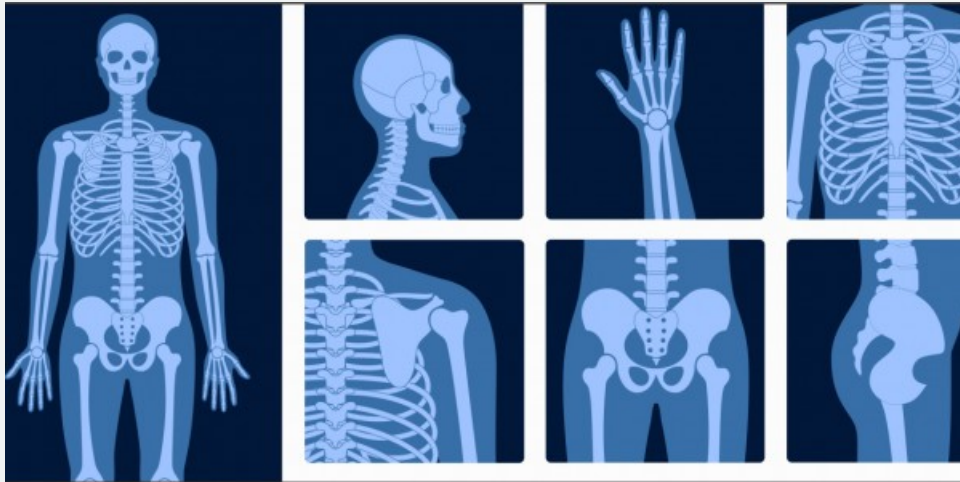
Luz e Espectro Eletromagnético

Luz e Espectro Eletromagnético



Luz e Espectro Eletromagnético

- Apesar de sermos incapazes de ver uma gama grande de espectro luminosos, podemos converter a luz em outros espectros para valores visíveis, com auxílio de equipamentos ou anteparos.



Fonte: DAPI (2023).

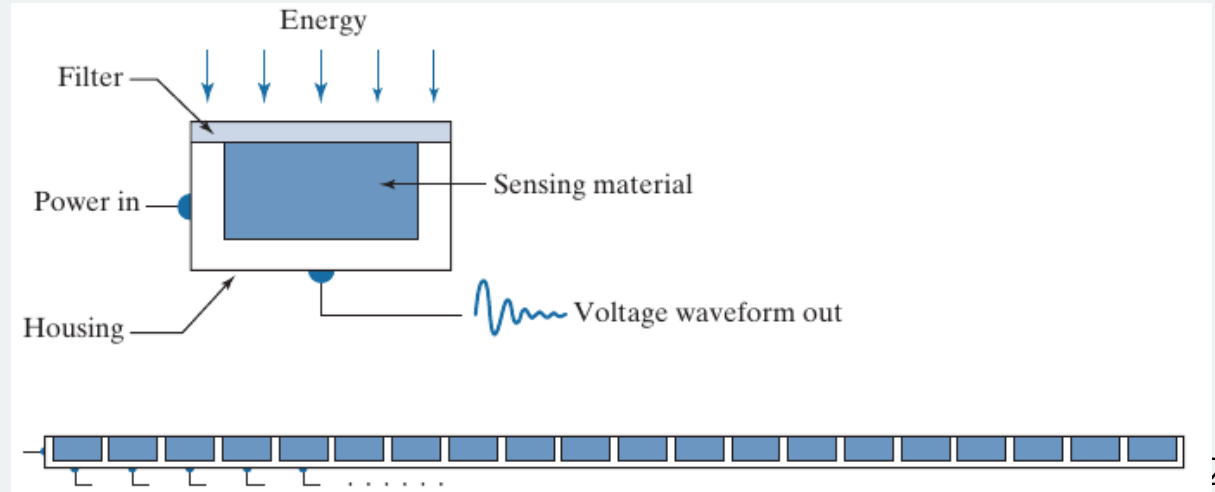


Fonte: Brasil Escola (2023).

Aquisição de Imagens

Aquisição de Imagens

- A aquisição de imagens de interesse é feita com base em uma fonte de iluminação, seguida da reflexão ou absorção de energia pelos elementos da cena
- Observe que a definição é genérica, sendo adequada desde a cenas naturais até fontes de energia eletromagnética, como radares, infravermelhos e sistemas de raio x.



Fonte: Gonzalez & Woods (2018).

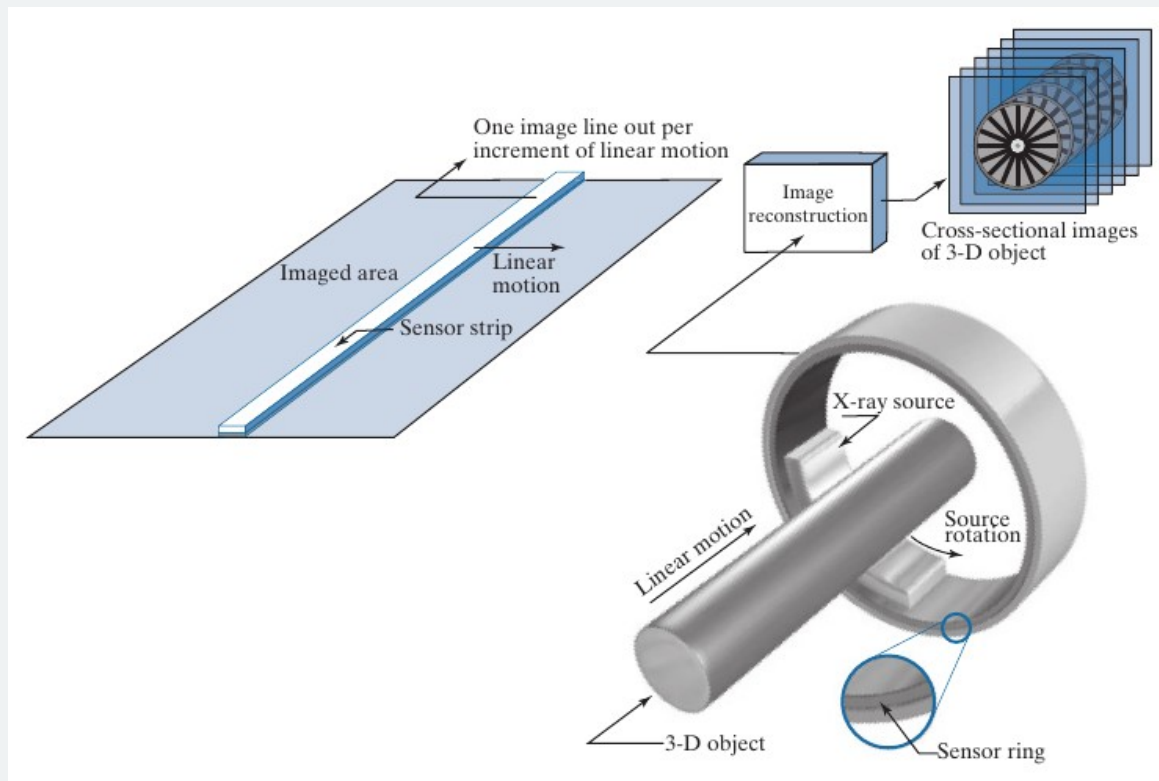
Aquisição de imagens usando faixa de sensores

- Uma faixa de sensores é um mecanismo mais comum que sensores individuais
 - As faixas proveem elementos de imagem em uma direção, enquanto movimentos perpendiculares das faixas proveem imagens em outra direção;
 - Tal mecanismo é usado em sensores de mesa;
 - Esses sensores são comuns em aplicações de sensoriamento aéreo
 - O sistema de imageamento é montado em uma aeronave que voa a uma altitude e velocidade constantes sobre a área geográfica a ser imageada.

Aquisição de imagens usando faixa de sensores

- Uma faixa de sensores produz uma linha da imagem por vez e o movimento relativo das faixas em outra direção produzem imagens em 2-D.
- Sensores em faixa em uma configuração de anel são usados em setores médicos e industriais, para obter imagens transversais (“fatias”) de objetos 3-D
 - Um raio-x rotativo provê iluminação, enquanto sensores de raio-x do lado oposto coletam a energia que passa sobre os sensores;
 - O mecanismo acima descrito é base para tomografias axiais computadorizadas (*computerized axial tomography* – CAT).

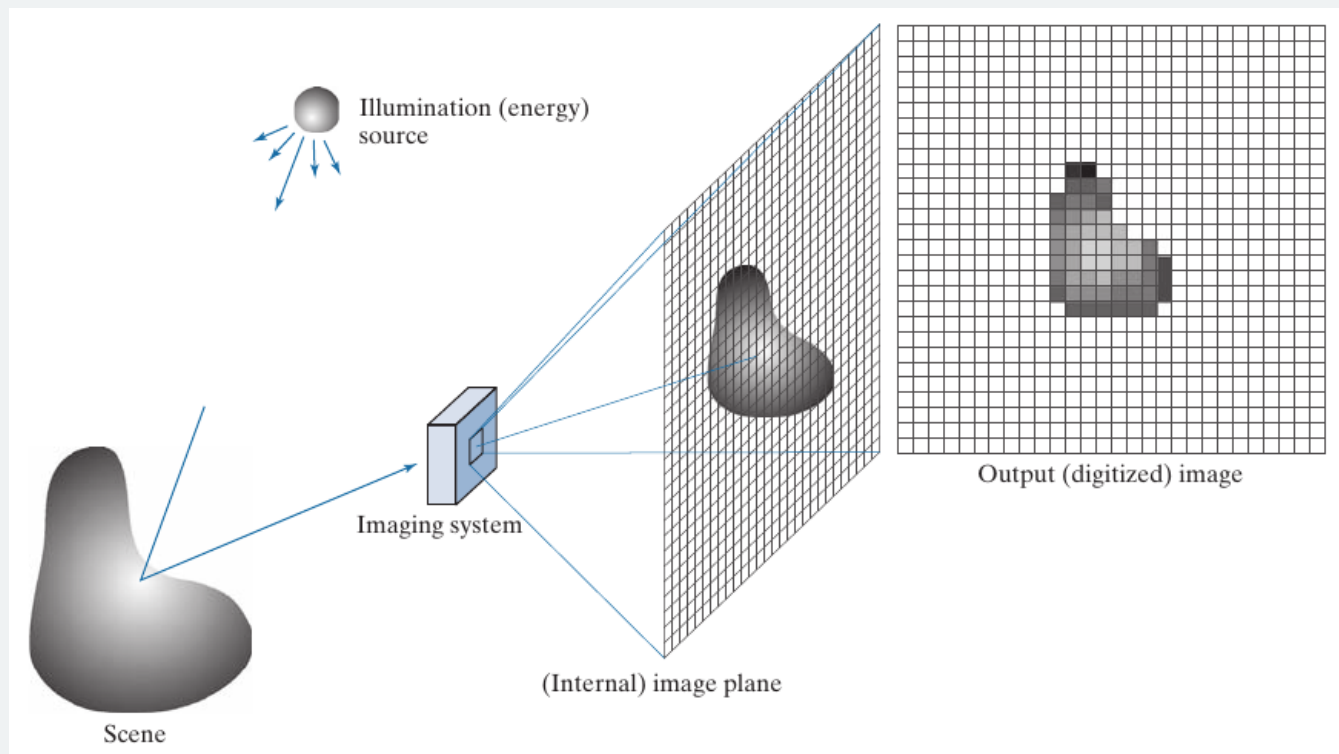
Aquisição de imagens usando faixa de sensores



Aquisição de imagens usando arrays

- Dispositivos eletromagnéticos, ultrasônicos e câmeras digitais frequentemente são dispostos na forma de arrays em 2 dimensões;
 - Câmeras digitais frequentemente utilizam sensores do tipo CCD (dispositivos de carga acoplada), que podem ser fabricados com uma ampla gama de propriedades de detecção, embalados em matrizes 4.000 x 4.000 elementos.
- Para aquisição de imagens usando arrays, não é necessário movimentação dos sensores, uma vez que os mesmos já estão dispostos em grid.

Aquisição de imagens usando arrays

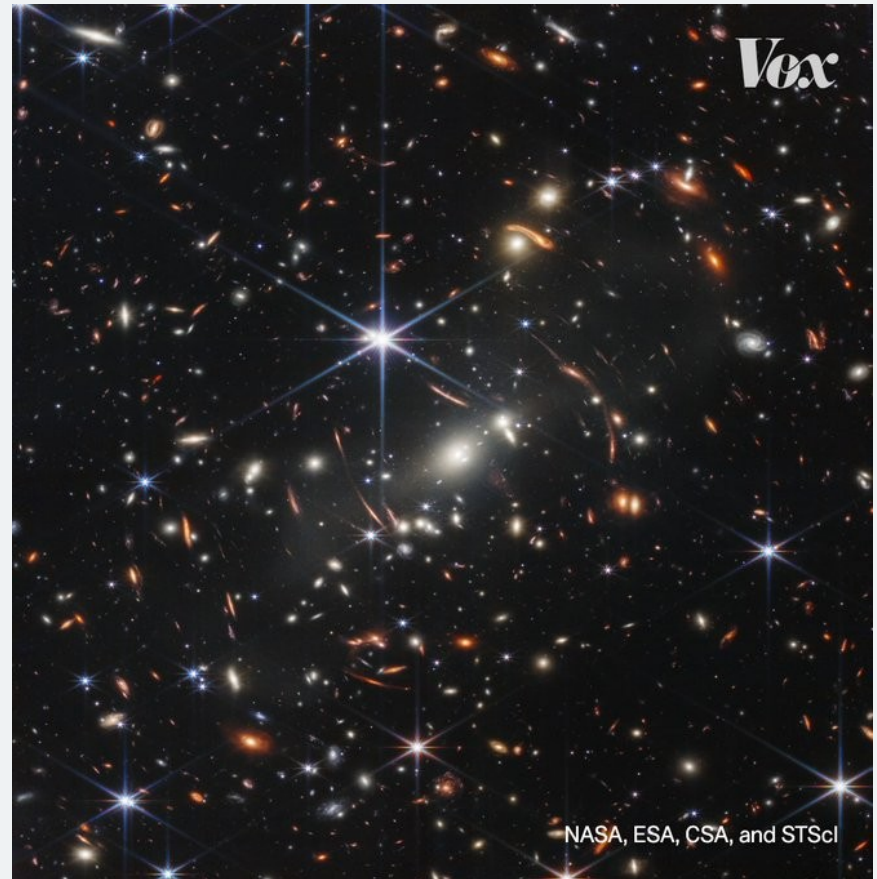


Aquisição de imagens usando arrays

- A resposta de cada sensor é proporcional à da energia da luz projetada em sua superfície do sensor
 - Tal mecanismo, dependendo do tempo de exposição à luz, pode gerar ruídos indesejados;
 - A redução de ruído é obtida ao permitir que o sensor integre o sinal de luz de entrada durante minutos ou mesmo horas.

Aquisição de imagens usando arrays

- Em imagens de telescópios, o tempo de exposição pode atingir horas, permitindo a menor quantidade de ruídos possíveis
- A imagem ao lado, produzida pelo telescópio espacial James Webb, levou 12,5h para ser tirada.



Fonte: Vox (2022).

Modelos de Imagens

Representação de imagens

- Uma imagem é uma função bidimensional de intensidade de luz $f(x, y)$, onde

$$0 < f(x, y) < \infty$$

- A natureza dos tons da imagem pode ser caracterizada por duas componentes:
 - **Intensidade luminosa**, $i(x, y)$, dependente da fonte de energia
 - **Reflectância**, $r(x, y)$, que depende das propriedades do material.

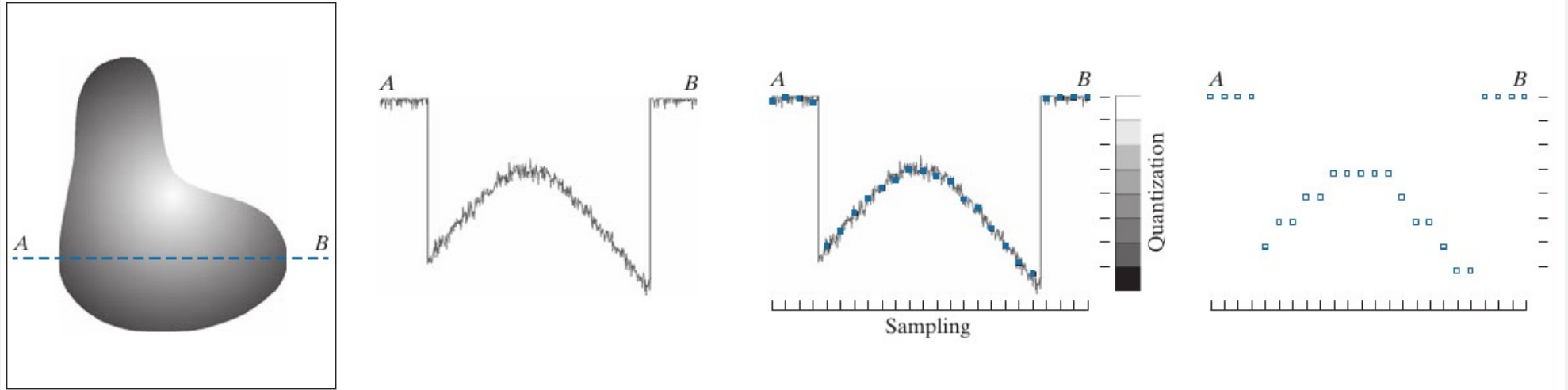
$$f(x, y) = i(x, y) \times r(x, y)$$

, onde $0 < i(x, y) < \infty$ e $0 < r(x, y) < 1$.

Nota: Reflectância, $r(x, y)$, com valores próximos a 1 tendem a refletir a luz que incide sobre o material (superfície branca), enquanto valores próximos a zero indicam que o material tende a absorver a luz incidente (superfície preta).

Amostragem e Quantização

- Considere a imagem mais a esquerda, que deve ser convertida para a forma digital
- Para digitalização, devem ser geradas funções que representem as coordenadas xy e a amplitude.

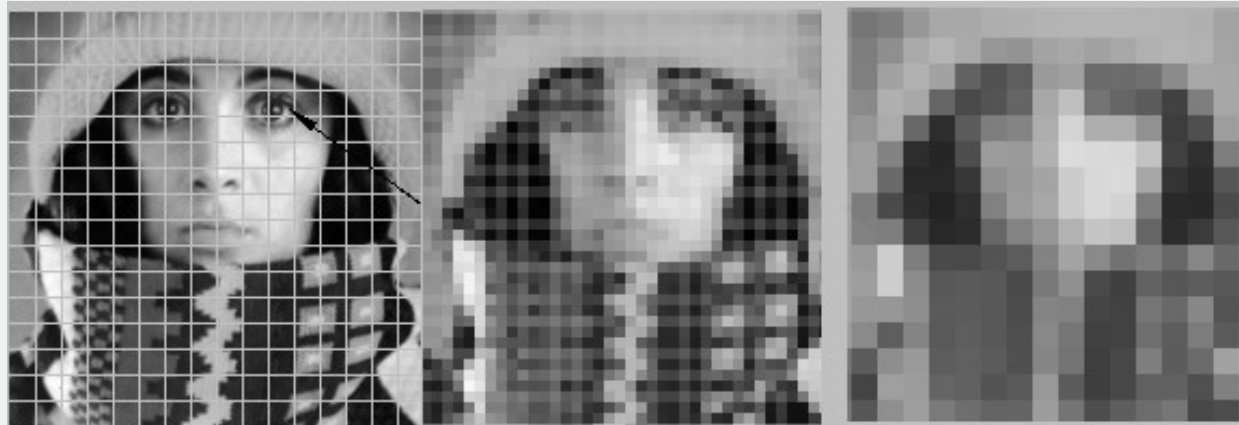


Amostragem e Quantização

- A digitalização das coordenadas é denominada **amostragem**
 - Deve ser feita em função de linhas e colunas ($M_{\text{linhas}} \times N_{\text{colunas}}$);
- A digitalização das amplitude é denominada **quantização**
 - No número de níveis utilizados para representar cada pixel, denotado por $G = 2^m$, onde m é a quantidade de bits usada para representação.
 - Com $m=8$, cada pixel pode representar até 256 tons de cinza, suficientes para distinção pelo olho humano.

Amostragem

- A redução de pontos de amostragem pode causar a perda de informação e detalhes da imagem
- Como possível “benefício”, reduz-se também o espaço necessário para armazenamento da imagem.



Quantização

- A redução da quantidade de bits para representação dos pixels, reduz a qualidade da imagem em relação às cores (ou ao tom de cinza)
- Podem criar falsos contornos, em imagens com 16 tons de cinza ou menos.

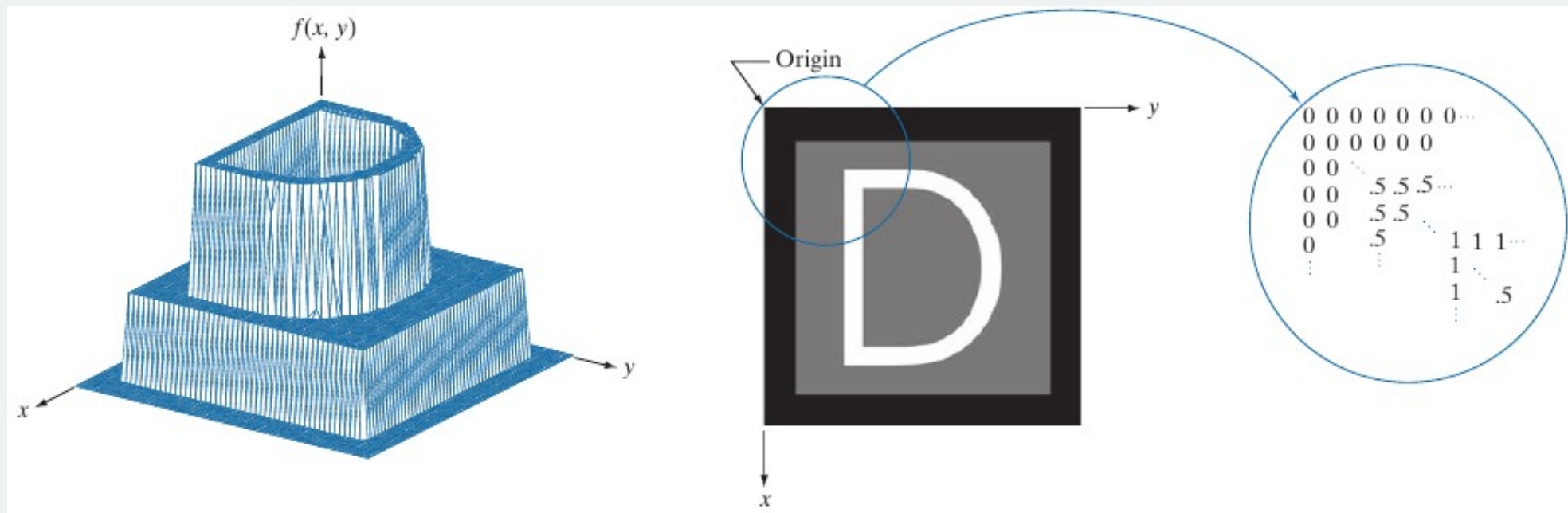


Fonte: Matan Weksler (2020).

Representação de imagens

- Considere uma imagem contínua $f(s, t)$, de duas variáveis s e t ;
- A imagem é convertida para uma imagem digital por meio de amostragem e quantização, produzindo $f(x, y)$, com coordenadas discretas
 - A seção do plano real abrangida pelas coordenadas é denominada **domínio espacial**, com x e y sendo referidos como **coordenadas espaciais**.
- Uma imagem digital pode ser representada das seguintes formas:
 - Plotagem da imagem como uma superfície;
 - Array com intensidade visual;
 - Array numérico 2-D (matriz).

Representação de imagens



Representação de imagens

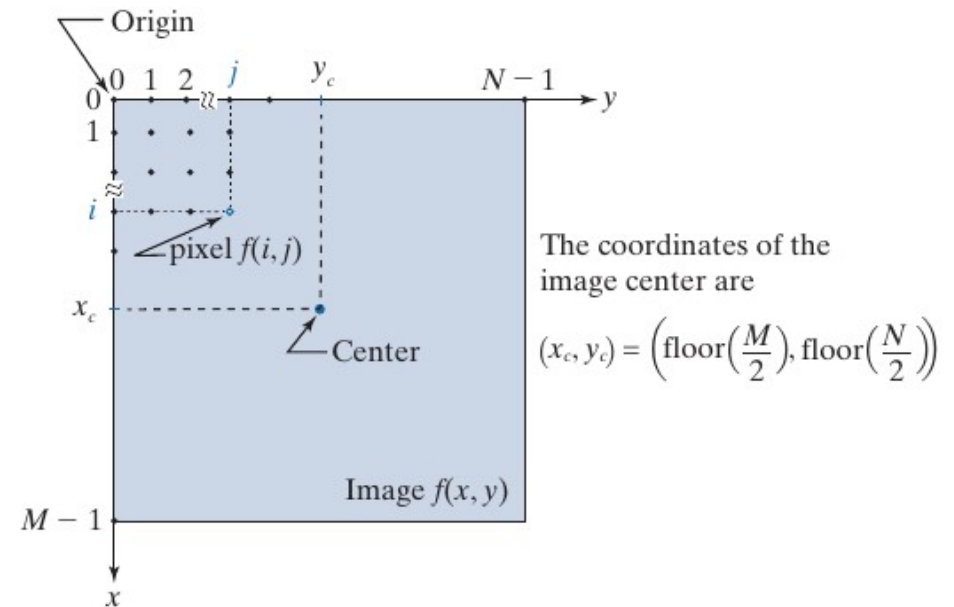
- A representação numérica usando matrizes é frequentemente utilizada para processamento computacional;
 - Cada elemento da matriz $M \times N$ é um pixel;
 - A origem da matriz é definida no canto esquerdo superior (ordem de varredura para exibição de pixels em monitores e TVs);

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{0,0} & a_{0,1} & \cdots & a_{0,N-1} \\ a_{1,0} & a_{1,1} & \cdots & a_{1,N-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{M-1,0} & a_{M-1,1} & \cdots & a_{M-1,N-1} \end{bmatrix}$$

Fonte: Gonzalez & Woods (2018).

Representação de imagens

- Para representação das posições na matriz, Utiliza-se a nomenclatura x e y intercambiavelmente com *linhas* e *colunas*.
- Podemos perceber que a imagem tem seu eixo cartesiano rotacionado em 90° , permitindo que a origem esteja no canto superior esquerdo.



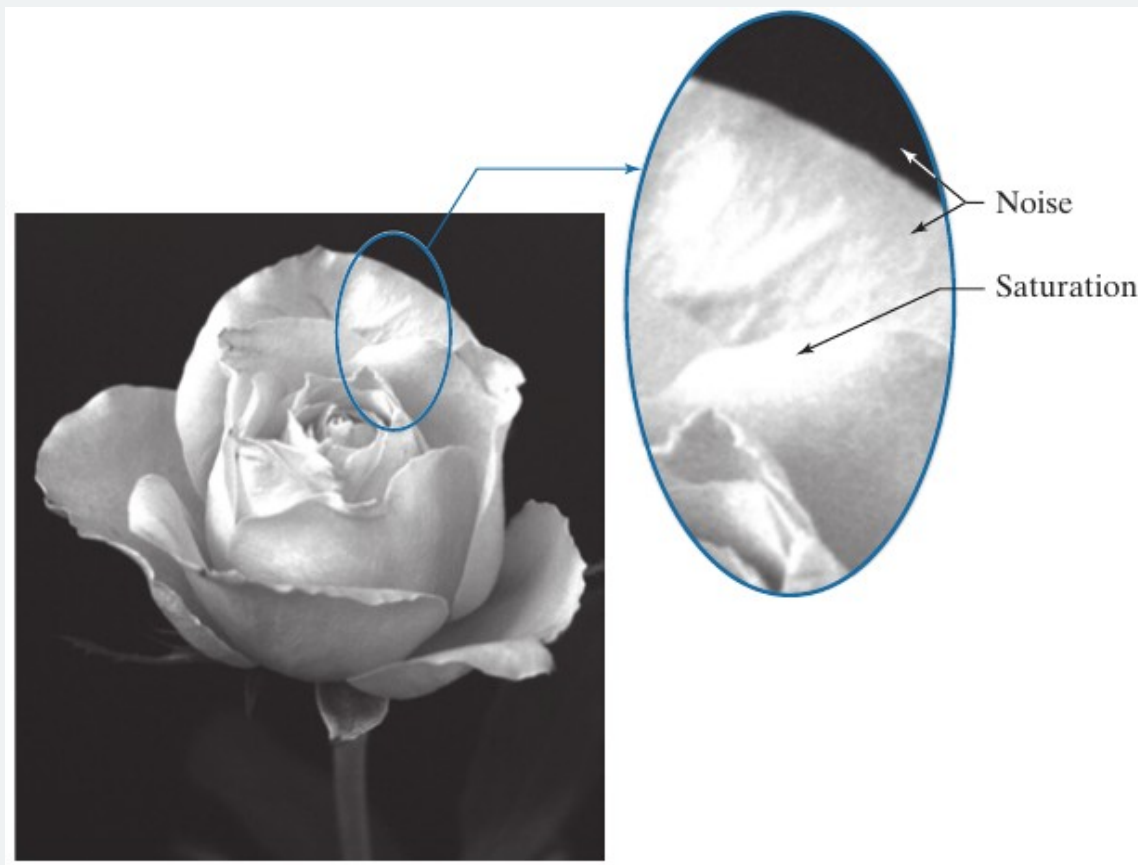
Saturação e Ruído

Saturação, Ruído e Contraste

- A faixa de valores abrangidos pela escala de cinza é chamada de **faixa dinâmica**, um termo usado de maneiras diferentes em diferentes campos;
- Define-se como faixa dinâmica a razão do máximo mensurável de intensidade até o nível mínimo de intensidade detectável no sistema;
 - O limite superior é determinado pela **saturação**;
 - O limite inferior é determinado pelo **ruído** (apesar de ruídos estarem presentes em intensidades mais claras);
 - Como as regiões mais escuras são aquelas onde houve menor captura de luminosidade, esta região é aquela onde, frequentemente, há maior quantidade de ruído.

Saturação, Ruído e Contraste

- A imagem ao lado mostra um exemplo de ruído (*noise*) e saturação (*saturation*)
 - Pode-se observar que os ruídos ocorrem principalmente em áreas escuras das imagens;
 - A saturação é o limite superior de intensidade luminosa.



Saturação, Ruído e Contraste

- A faixa dinâmica estabelece a diferença entre os níveis mais baixos e altos de intensidade que podem ser representados e que a imagem pode ter
 - O **contraste** da imagem corresponde à diferença de intensidade entre os níveis mais altos e mais baixos;
 - A **taxa de contraste** é a razão entre ambas as quantidades;
- Quando uma grande quantidade de pixels de uma imagem possui uma alta faixa dinâmica, espera-se que a imagem possua alto contraste
 - Imagens com baixa faixa dinâmica possuem aparência cinza, opaca e desbotada.

Armazenamento

Armazenamento

- Para armazenamento de imagens monocromáticas, o espaço necessário em termo de bits b , é:

$$b = M \times N \times k$$

- O valor de k corresponde à quantidade de bits necessários para armazenamento da intensidade (tonalidade);
- Quando uma imagem possui 2^k níveis de intensidade, uma prática comum é defini-la como uma “imagem de k bits” (para 256 cores, a imagem é definida como uma “imagem de 8 bits”).

Armazenamento

- Ex. 1: Para armazenar uma imagem de 640x480 monocromática de 256 cores, qual a quantidade de bits necessários?

Armazenamento

- Ex. 1: Para armazenar uma imagem de 640x480 monocromática de 256 cores, qual a quantidade de bits necessários?
 - Para 256 cores, serão necessários 8 bits (2^8);
 - Logo, teremos $640 \times 480 \times 8 = 2.457.600$ bits
 - Em bits: 2.457.600
 - Em bytes: 307.200
 - Em kilobytes: 300
 - Em megabytes: 0,3

Resolução Espacial e de Intensidade

Resolução Espacial

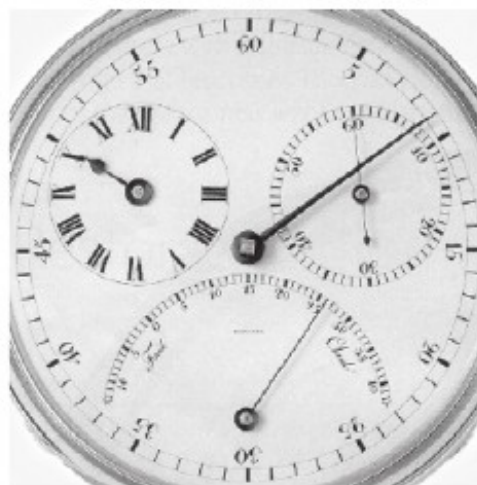
- A **Resolução Espacial** é a medida do menor detalhe discernível em uma imagem
 - Quantitativamente, pode ser expressa de várias maneiras, sendo *pares de linhas por unidade de distância* e *pixels (dots) por unidade de distância* as medidas mais comuns;
 - A unidade **pixels por polegadas (DPI – dots per inches)** é, talvez, a métrica de resolução mais utilizada para impressão e publicação de informações.
 - Jornais utilizam, em geral, 75 dpi, enquanto revistas utilizam resolução de 133 dpi.

Resolução Espacial

- Resoluções espaciais, para que façam sentido, precisam ter unidades de medidas de espaço a elas relacionadas
 - Uma imagem com resolução de 1024×1024 pixels não contém informações suficientes para indicar a qualidade da mesma;
 - Se a imagem for impressa em tamanho A4 e A3, para a mesma imagem, a qualidade será consideravelmente diferente.

Resolução Espacial

- Imagens de mesmo tamanho com resoluções espaciais diferentes possuem qualidade diferente
- As imagens à direita possuem resoluções de 930, 300, 150 e 72dpi, respectivamente.



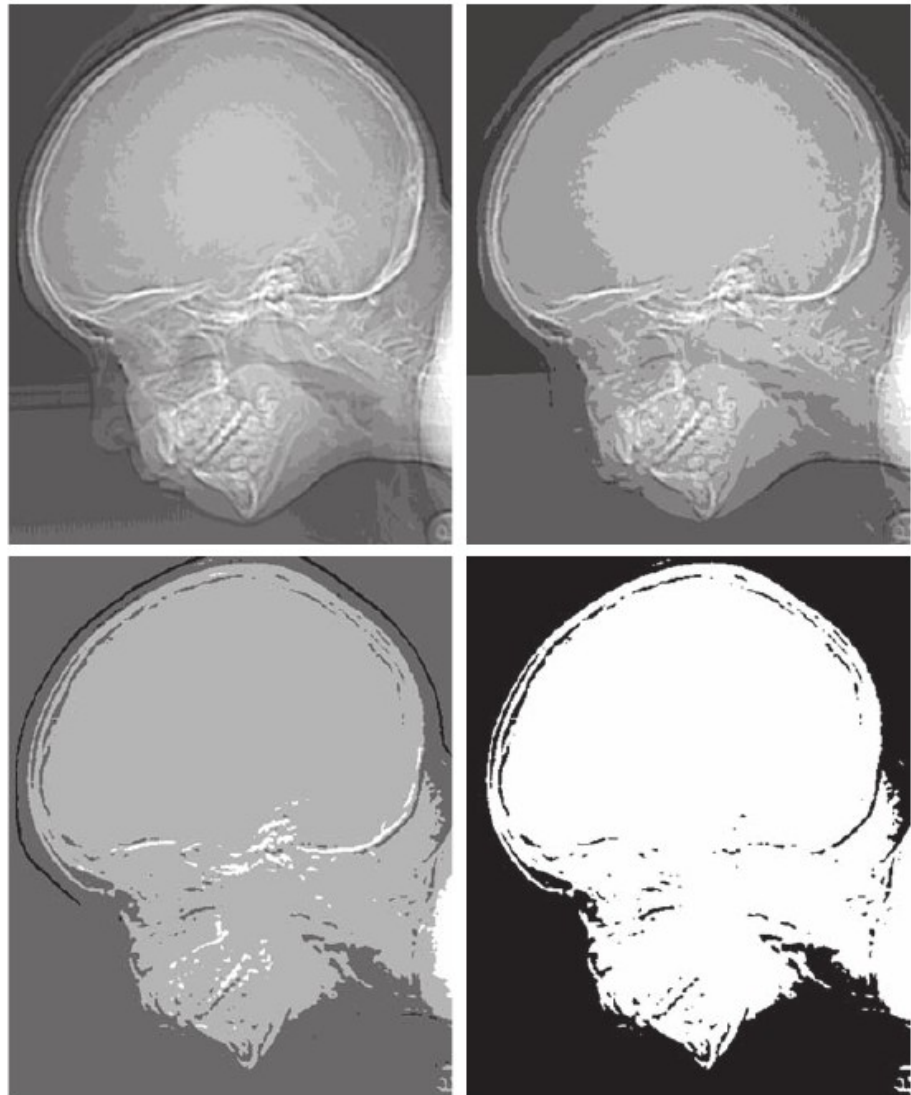
Fonte: Gonzalez & Woods (2018).

Resolução de Intensidade

- A **Resolução de Intensidade** se refere à menor mudança perceptível no nível de intensidade.
 - Níveis de intensidade, usualmente definidos em potência de 2 com 8 bits (2^8), são utilizados para especificar as variações de tonalidade dos pixels;
 - Quantidades superiores de bits para representação de pixels são possíveis, porém pouco usuais;
 - A resolução de intensidade normalmente é definida em função do número de pixels utilizados para quantizar os valores.

Resolução de Intensidade

- Imagens com resoluções de intensidade diferentes, para um valor de resolução espacial, constante possuem qualidades diferentes.
- As imagens ao lado possuem 16, 8, 4 e 2 níveis de cores, respectivamente.



Fonte: Gonzalez & Woods (2018).

Interpolação de Imagens

- **Interpolação** é o processo de estimar pontos desconhecidos com base no pontos existentes
 - No contexto de imagens, a interpolação é utilizada para estimar o valor dos pixels, principalmente em tarefas de ampliação de imagens;
 - Interpolação também pode ser usada em tarefas de redução, rotação e correção de imagens digitais;

Interpolação de Imagens

- Os métodos de interpolação mais comuns são:
 - **Nearest neighbor interpolation** (*interpolação pelo vizinho mais próximo*): define para cada nova localização a intensidade do vizinho mais próximo;
 - Possui como desvantagem a produção de efeitos indesejados e distorções;
 - **Bilinear interpolation**: quatro dos vizinhos mais próximos são utilizados para estimativa da intensidade em um determinado *pixel*;
 - **Bicubic interpolation**: envolve a estimativa de intensidade dos 16 vizinhos mais próximos para estimativa de intensidade de um determinado *pixel*.

Interpolação de Imagens

- As imagens abaixo foram reduzidas para 72 dpi e, em seguida, retornadas para 930 dpi usando interpolação pelo vizinho mais próximo, bilinear e bicubica.



Relações básicas entre pixels

Relações básicas entre pixels

- Um pixel p com coordenadas (x, y) possui vizinhos verticais e horizontais com as seguintes coordenadas

$$(x+1, y), (x-1, y), (x, y+1), (x, y-1)$$

- Esse conjunto é denominado **4-conectado** (*4-neighbors*), denotado por $N_4(p)$.

Relações básicas entre pixels

- Além das 4 vizinhanças anteriores, é possível adicionar as vizinhanças nas diagonais

$$(x+1, y+1), (x+1, y-1), (x-1, y+1), (x-1, y-1)$$

- Esse conjunto é denominado **8-conectado** (*8-neighbors*), denotado por $N_8(p)$.

Adjacência

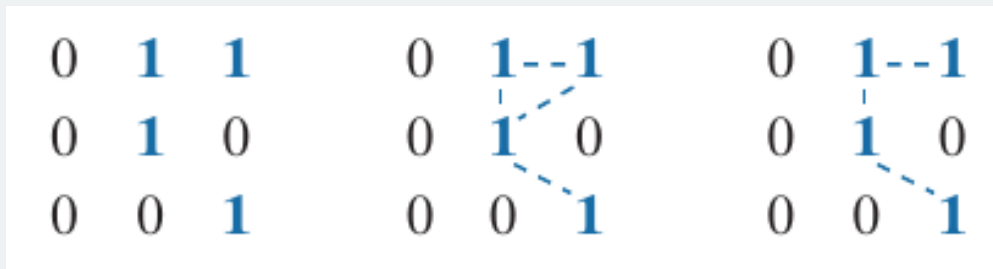
- As relações de adjacência entre pixels são baseadas em um critério de similaridade entre os níveis de cinza semelhantes (definido pela letra “ V ”);
- Para uma imagem binária, $V = 1$;
- Para uma imagem em tons de cinza, o conjunto é determinado por uma faixa de tons de cinza, $V = 16, 17, \dots$;

Adjacência

- Tipos de adjacência:
 - **4-adjacência**: 2 pixels, p e q , com valores em V são 4-adjacentes se q está no conjunto $N_4(p)$;
 - **8-adjacência**: 2 pixels, p e q , com valores em V são 8-adjacentes se q está no conjunto $N_8(p)$;
 - **M-adjacência (adjacência mista)**: 2 pixels, p e q , com valores em V são m -adjacentes se:
 - q está no conjunto $N_4(p)$, ou
 - q está em $N_D(p)$ e o conjunto $N_4(p) \cap N_4(q)$ não possuem pixels cujos valores são de V .

Adjacência

- A adjacência mista surgiu como uma modificação da 8-adjacência para eliminar possíveis ambiguidades da última.
 - Entenda por ambiguidade, múltiplas conexões entre os vértices;
 - Se um vértice possui 2 relações, a adjacência é definida como ambígua.



Fonte: Gonzalez & Woods (2018).

Adjacência

- Para entender melhor as ambiguidades possíveis na 8 adjacência, analise o exemplo abaixo:
 - Em ambos os casos, as matrizes são 8-adjacentes;
 - No entanto, somente no primeiro caso a matriz é m-adjacente, se considerarmos que $V = \{1\}$.

0	0	0	0	0	0	0
0	p	0	0	0	p	0
q	0	0	0	q	1	0

Fonte: Próprio autor.

Caminho Digital (Curva)

- Um **caminho digital (curva)** de um pixel p , com coordenadas (x_0, y_0) para um pixel q , com coordenadas (x_n, y_n) é uma sequência distinta de pixels com coordenadas

$$(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$$

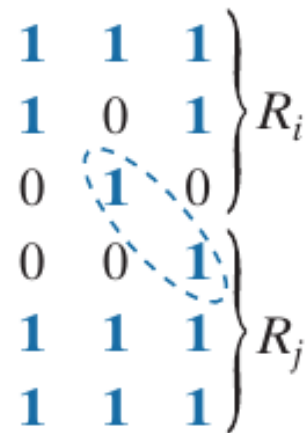
- onde os pontos (x_i, y_i) e (x_{i-1}, y_{i-1}) são adjacentes para $1 \leq i \leq n$.
- Nesse caso, n é o tamanho do caminho;
- Se $(x_0, y_0) = (x_n, y_n)$, então o caminho é um caminho fechado;
- É possível definir 4-, 8- ou m-caminhos, dependendo do tipo de adjacência utilizada.

Componentes conexos

- Dois pixels p e q são **conexos** em S se existe um caminho entre eles consistindo somente de pixels em S ;
- Para cada pixel p em S , o conjunto de pixels que são conectados a ele em S são chamados de **componentes conexos** de S ;
- Se existe somente um componente e esse componente é conexo, então S é chamado de **conjunto conexo**.

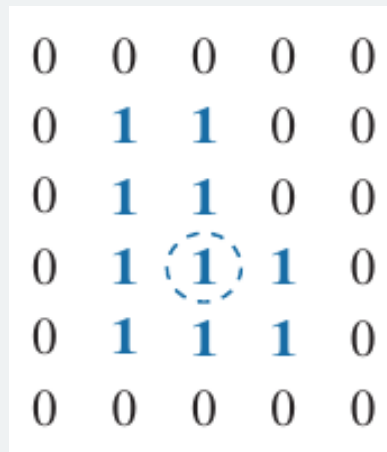
Regiões

- Considere que R represente um subconjunto de pixels.
 - Esse subconjunto de pixels é denominado **região** da imagem se R for um conjunto conexo;
 - Duas regiões R_i e R_j são adjacentes se sua união forma um conjunto conexo;
 - Regiões que não são adjacentes são denominadas **disjuntas** (em relação ao tipo de adjacência – 4 ou 8 adjacência).



Foreground e Background

- Suponha que uma imagem contenha K regiões disjuntas, R_k , onde $k = 1, 2, \dots, K$;
- Seja R_u , a união de todas as K regiões e $(R_u)^c$ o complemento correspondente
 - Todos os pontos em R_u são denominados **foreground** (“primeiro plano” ou “frente”) e todos os pontos em $(R_u)^c$ pertencem ao **background** (fundo) da imagem.



0	0	0	0	0
0	1	1	0	0
0	1	1	0	0
0	1	1	1	0
0	1	1	1	0
0	0	0	0	0

Fonte: Gonzalez & Woods (2018).

Bordas

- As **bordas** (*borders, boundaries ou contours*) de uma região R são o conjunto de pixels em R que são adjacentes aos pixels do complemento de R
 - Bordas, de forma alternativa, podem ser definidas como o conjunto de pixels de uma região que possuem ao menos um vizinho no background;
 - A definição anterior é classificada como borda interna, enquanto a borda pelo visão do background é definida como borda externa.

0	0	0
0	1	0
0	1	0
0	1	0
0	1	0
0	0	0

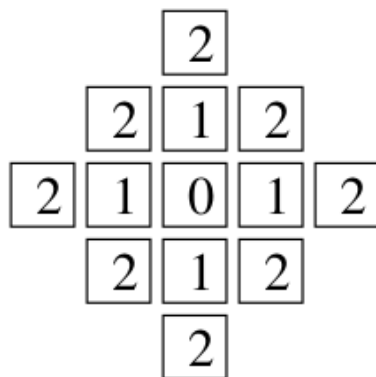
Fonte: Gonzalez & Woods (2018).

Edge

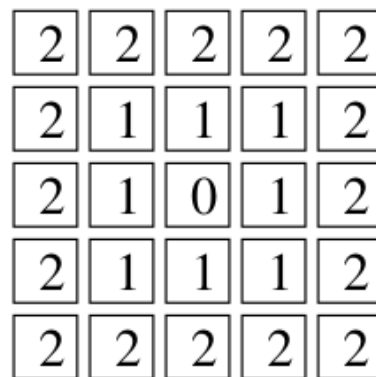
- **Edges** (limites ou, eventualmente, bordas) é associado com bordas e regiões
 - Bordas de regiões finitas formam um caminho fechado e são definidas como um conceito global;
- Um edge é um conceito local, baseado na medida do nível de descontinuidade de um ponto
 - Edges são associados a segmentos, de forma que são linkados de uma forma que eles correspondem a bordas (porém nem sempre)
 - Dependendo do tipo de conector e da conectividade usada, o limite (edge) de uma região binária será o mesmo de uma borda de uma região.

Medidas de Distância

- As medidas de distância entre os pixels $p(x, y)$ e $q(s, t)$, podem ser definidas como:
 - Euclidiana: $D_e(p, q) = \sqrt{(x-s)^2 + (y-t)^2}$
 - D_4 (quarteirão): $D_4(p, q) = ||x-s|| + ||y-t||$
 - D_8 (tabuleiro): $D_8(p, q) = \max(||x-s||, ||y-t||)$



D_4



D_8

Referências

Referências

- Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods. **Digital Image Processing – 4th Edition**. 2018. Pearson. ISBN: 978-9353062989.
- Agostinho Brito Jr. **Processamento digital de imagens – Slides de Aula**. 2018.
- DAPI – Diagnóstico Avançado por Imagens. **Curiosidades sobre o raio X**. 2023. Disponível em <https://dapi.com.br/curiosidades-sobre-o-raio-x/>
- Joab Silas da Silva Júnior. **O que é infravermelho?** 2023. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-infravermelho.htm>.
- Vox. Nasa releases the first Image of James Webb Space Telescope. 2022. Disponível em: <https://twitter.com/voxdotcom/status/1546866088893329408>

Referências

- Wimarshika Thamali. **Sampling & Quantization in Digital Image Processing**. 2020. Disponível em: <https://wimarshikathamali1995.medium.com/sampling-quantization-in-digital-image-processing-8c4490357039>
- Matan Weksler. **Deep Dive Into Multi-Bit Weighted Quantization for CNNs**. 2020. Disponível em: <https://medium.com/swlh/deep-dive-into-multi-bit-weighted-quantization-for-cnns-d2723afdc5db>
- Retina Curitiba. **Quais são as partes que compõem o olho humano?** 2023. Disponível em: <https://retinacuritiba.com.br/quais-sao-as-partes-que-compoem-o-olho-humano/>