

# **Computação Visual**

## **Ciência da Computação**

Prof. André Kishimoto  
2024

# Referências

Este material foi baseado e adaptado a partir das seguintes referências:

- **Processamento digital de imagens, 3ª ed.**

GONZALES, R. C.; WOODS, R. C.  
Pearson Prentice Hall, 2010.

- **Introduction to Visual Computing: Core Concepts in Computer Vision, Graphics, and Image Processing**

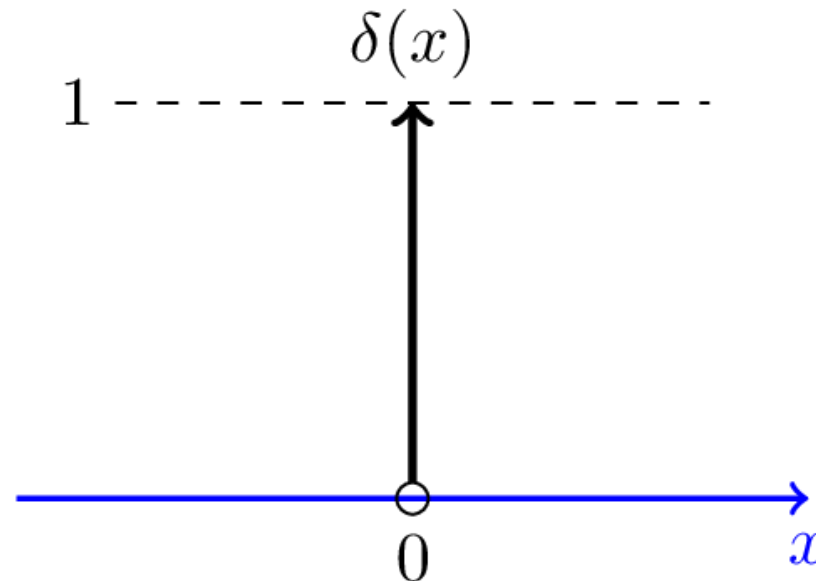
MAJUDER, A.; GOPI, M.  
CRC Press, 2018

# **Filtros e detecção de bordas**

# Resposta de um sistema linear

- Impulso ( $i[t]$ ): Sinal com somente uma amostra diferente de zero.
- Delta ( $\delta[t]$ ): É um impulso com amostra diferente de zero em  $t = 0$ .

$$\delta[0] = 1$$



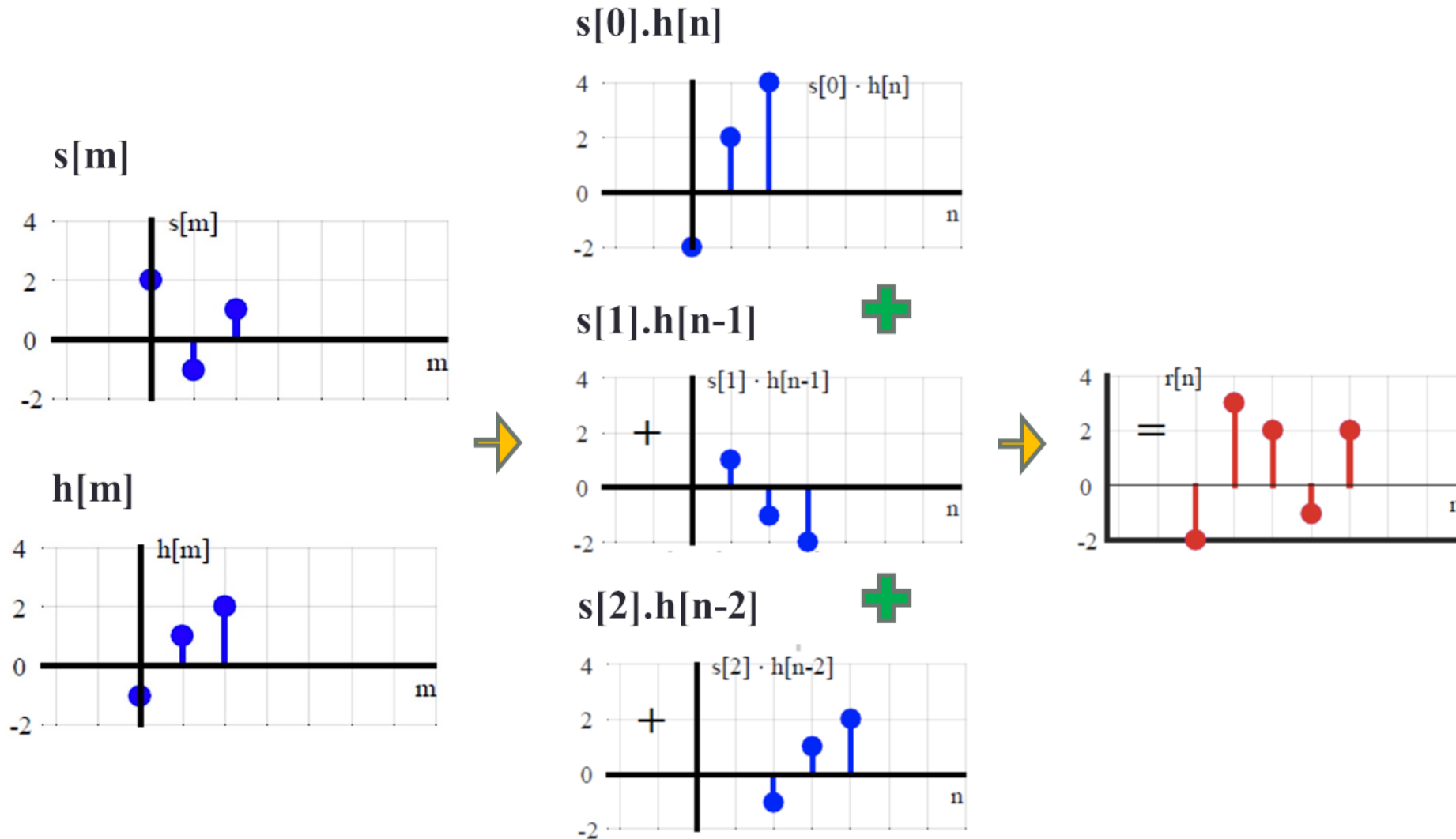
# Resposta de um sistema linear

- Resposta ao impulso ( $h[t]$ ): Saída do sistema para a entrada  $\delta[t]$ .
  - Também chamado de kernel ou filtro.
  - Tamanho de  $h$  (largura se 1D) também é chamado de suporte.
- **Convolução:** Resposta de um sistema linear com resposta ao impulso  $h[t]$  para um sinal ou função generalizada.

$$R = \sum_{l=1}^n x[l]h[t-l] = x[t] \circledast h[t]$$

- $x[t] \circledast h[t]$  é a convolução de  $x[t]$  com a resposta de impulso  $h[t]$ .

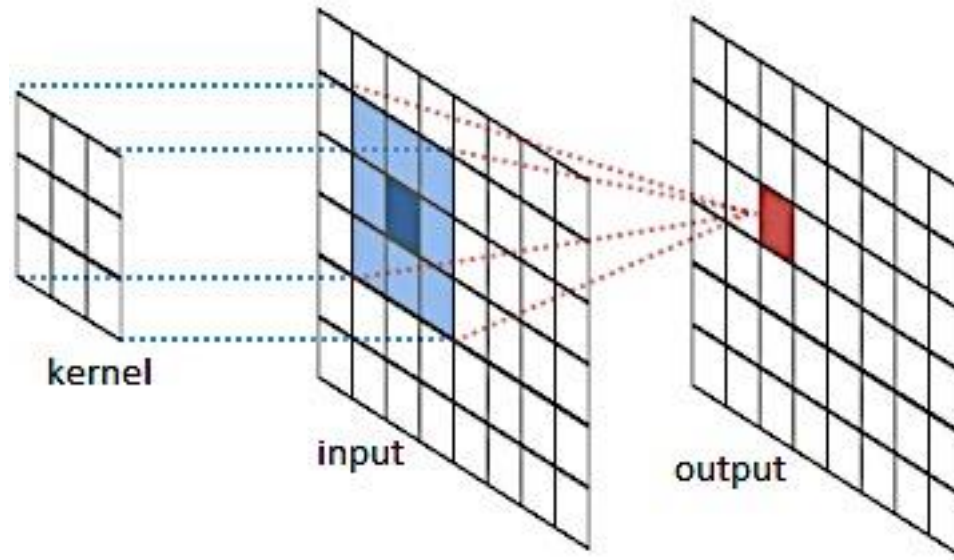
# Convolução



# Filtragem espacial

- A operação de filtragem **cria um novo pixel** com coordenadas iguais às coordenadas do **centro da vizinhança**.
- O **valor desse pixel** é o **resultado** do processo de filtragem espacial.
- Uma **imagem processada** (filtrada) é gerada à medida que o centro do filtro percorre cada pixel da imagem de entrada.
  - A imagem original não é modificada!
  - Todo pixel original filtrado é inserido em uma nova imagem (a imagem processada).

# Convolução 2D

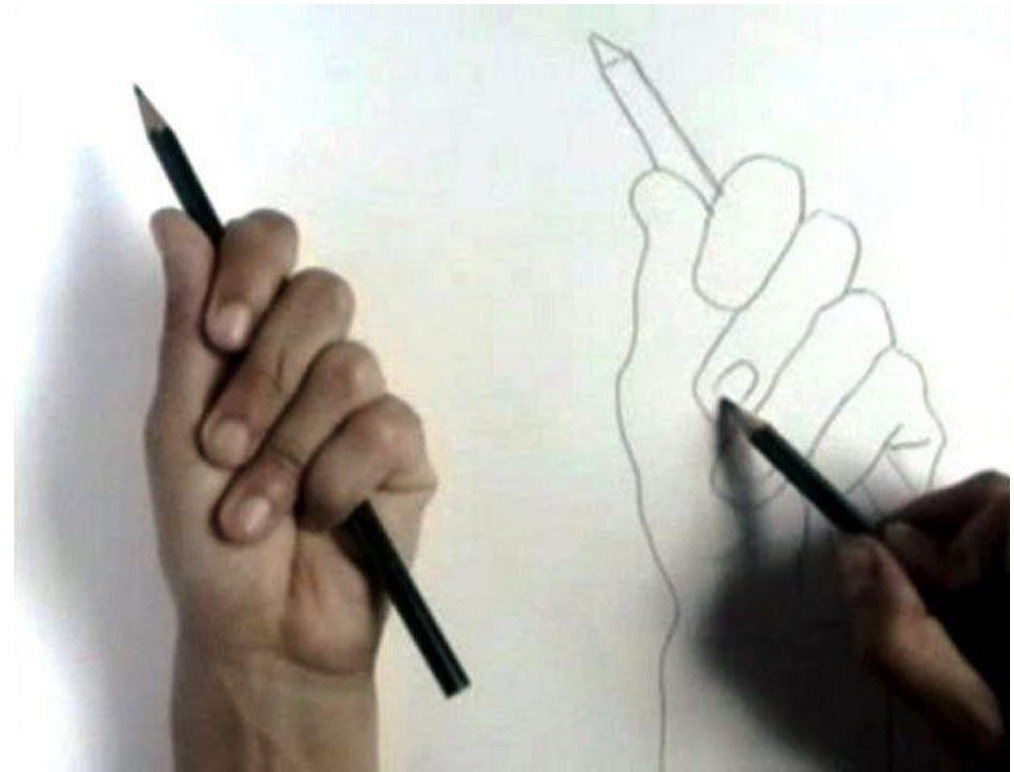


O que acontece quando o filtro (kernel) está nas extremidades da imagem?



# Detecção de bordas

- **Objetivo:** Identificar mudanças bruscas (descontinuidades) em uma imagem.
  - Intuitivamente, muito da informação semântica e de forma da imagem pode ser codificada nas bordas.
- **Ideal:** Desenho das linhas do artista (vide imagem ao lado).

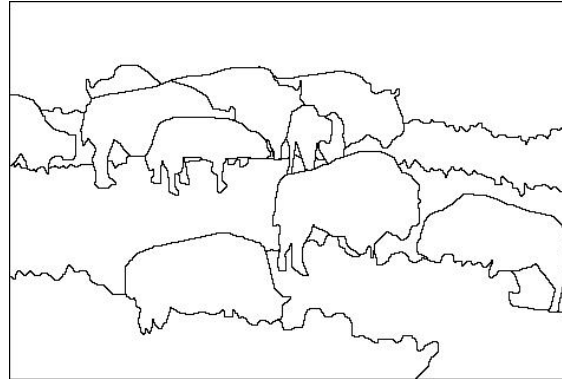


# Bordas: Pessoas vs. Máquinas

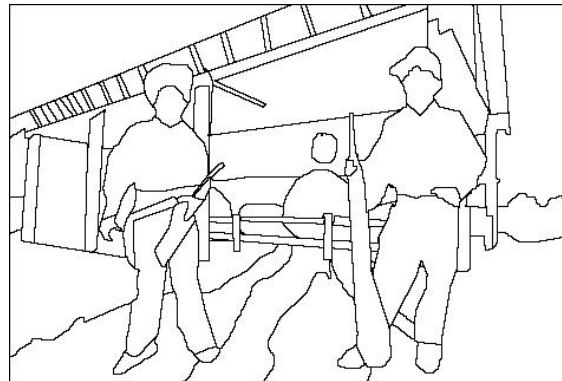
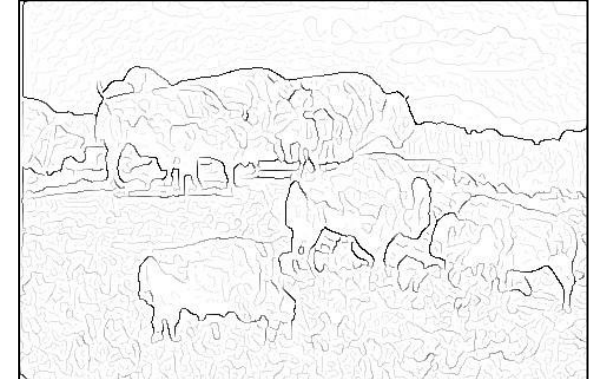
Imagem



Segmentação humana



Magnitude do gradiente

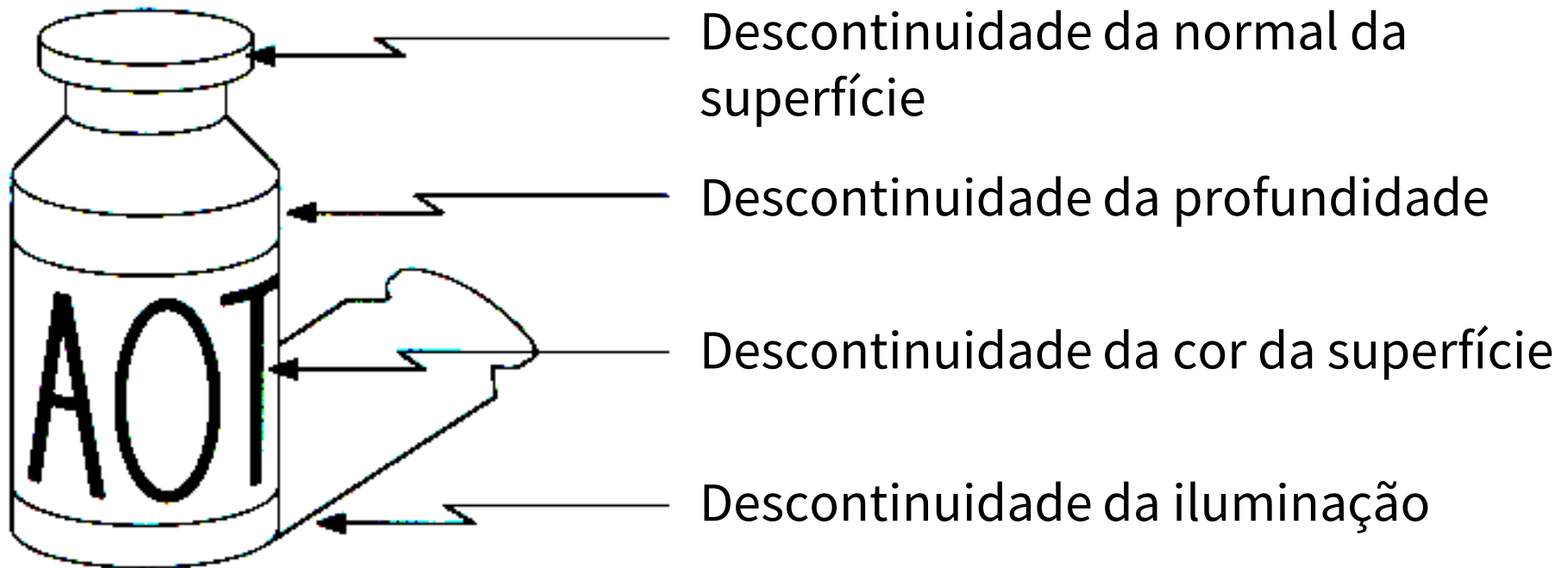


# Fatos intuitivos na detecção de bordas

- Pixels tendem a ser como seus vizinhos.
  - Os valores dos pixels geralmente tem valores próximos entre si.
  - Podemos estimar o valor de um pixel usando seus vizinhos.
- Pixels que são diferentes dos seus vizinhos são importantes.
  - Ocorre quando o gradiente é grande.
  - Mudança brusca pode indicar bordas.
  - Mas imagens com ruído também têm gradientes grandes.
- Ideia:
  - Suprimir ruído da imagem com suavização e então pegar os gradientes (vetor cuja direção indica os locais nos quais os níveis de cinza sofrem maior variação).

# Bordas (edges)

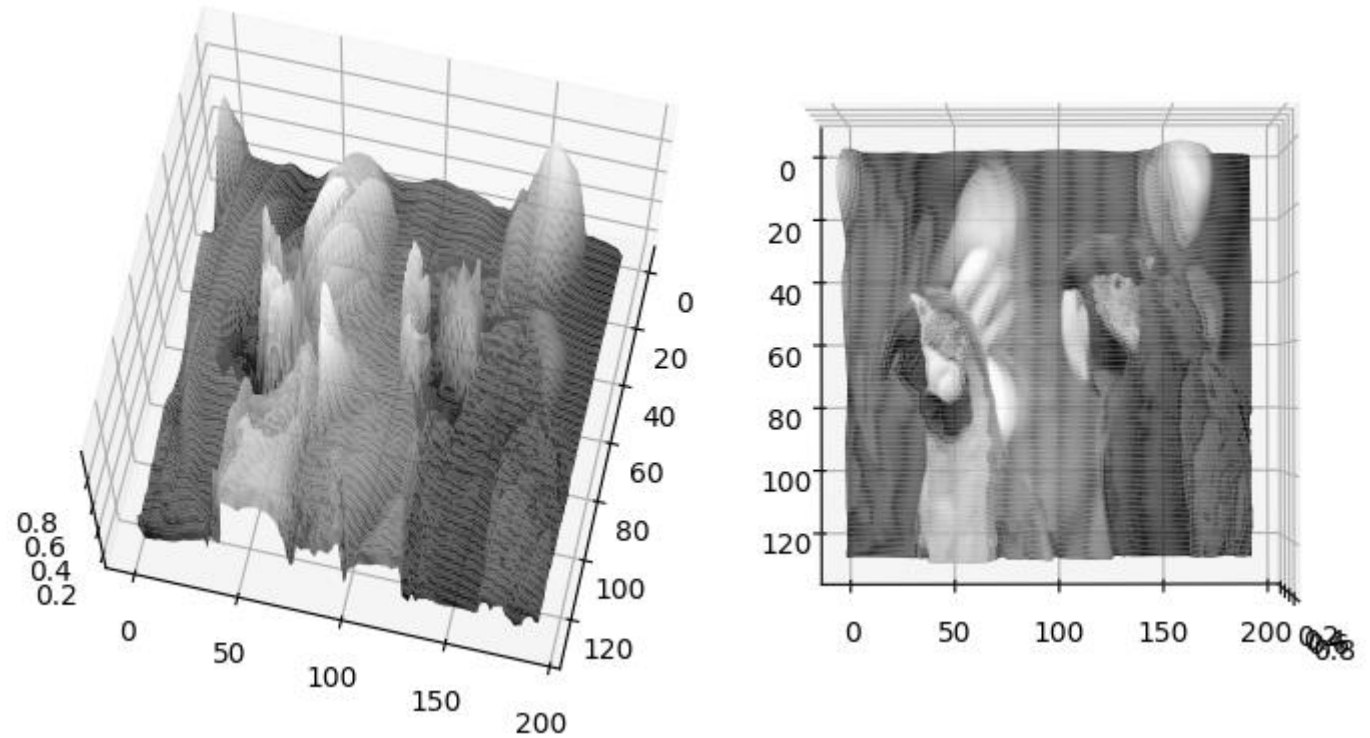
As bordas são resultados de uma variedade de fatores.



# Bordas

- Bordas existem onde as mudanças ocorrem (luz e sombra, materiais, superfícies, objetos).
- Define o limite ou fronteira entre duas regiões com propriedades relativamente distintas de nível de cinza.
  - Descontinuidade dos níveis de cinza.
- Mudanças são calculadas com derivadas parciais.
  - Imagens como funções.

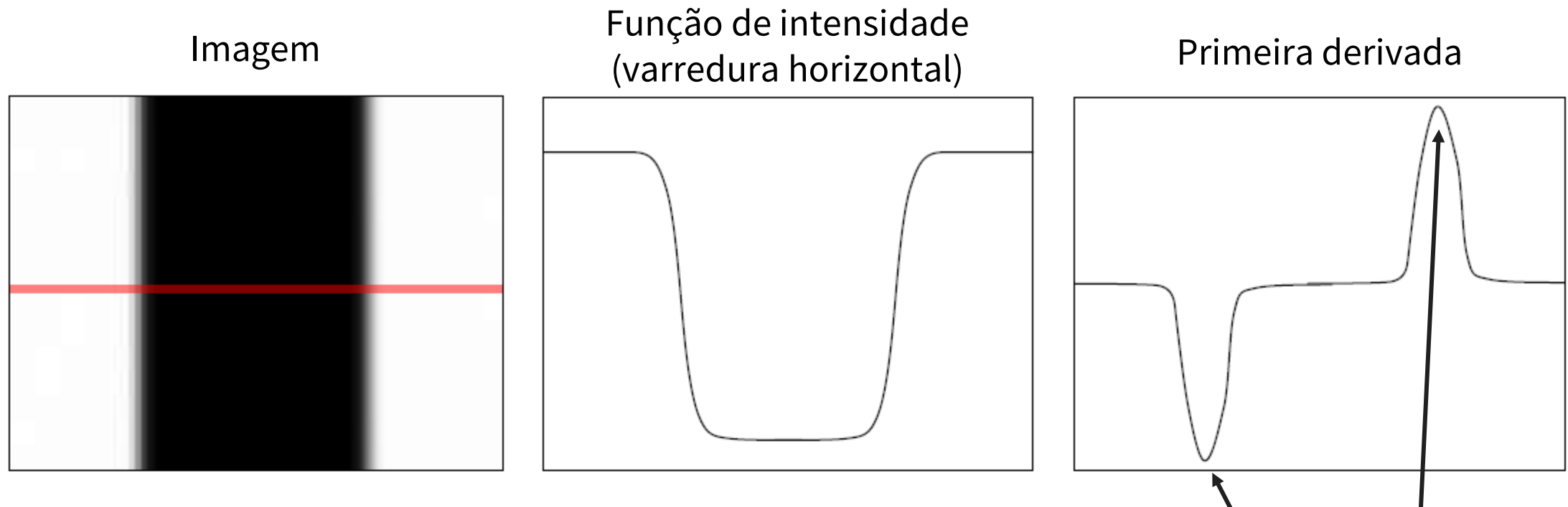
# Imagens como funções



Bordas parecem penhascos íngremes.

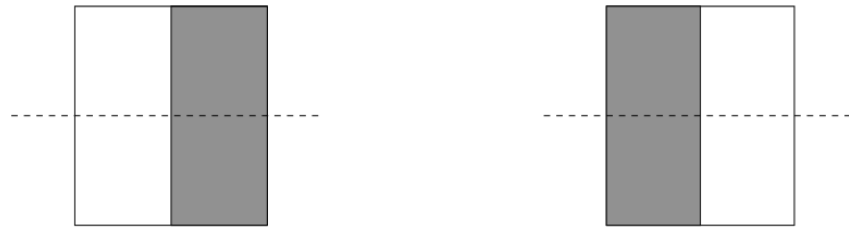
# Derivadas e bordas

- Uma borda é uma região de “rápida” mudança na função de intensidade da imagem.

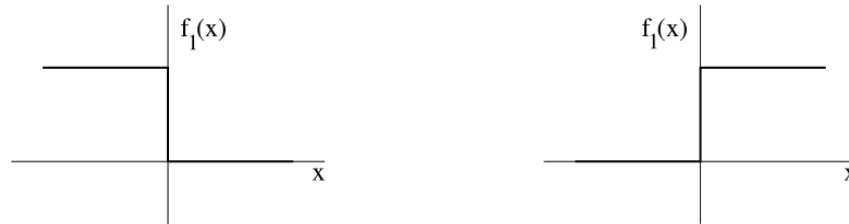


Bordas correspondem aos extremos da derivada.

# Derivadas e bordas



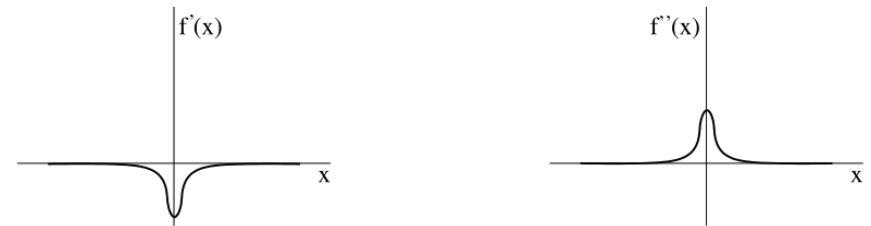
(a) imagens contendo uma região clara e uma região escura



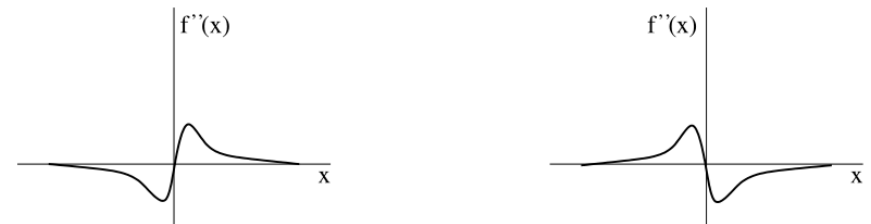
(b) perfil mostrando variação abrupta de intensidade de cinza ao longo de uma linha de varredura horizontal



(c) perfil mostrando variação suave dos níveis de cinza



(d) derivada primeira do perfil de níveis de cinza

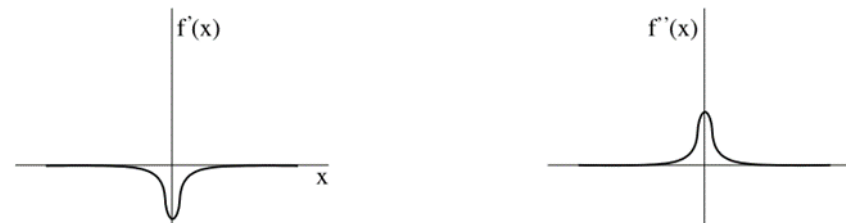


(e) derivada segunda do perfil de níveis de cinza



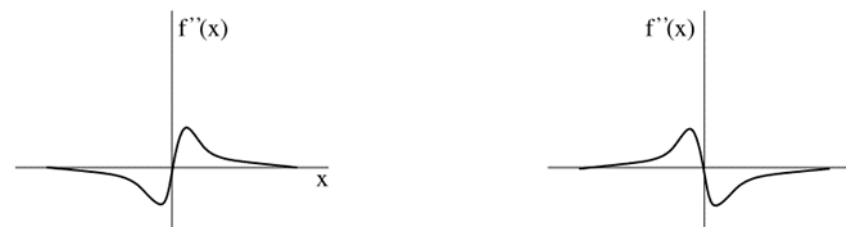
# Derivadas e bordas

- Derivada primeira: Positiva nas transições da região escura para clara, negativa nas transições da região clara para escura e nula nas áreas de nível de cinza constante.
- Derivada segunda: Positiva na parte da transição associada ao lado escuro da borda, negativa na parte da transição associada ao lado claro da borda e nula nas áreas de nível de cinza constante.



(d) derivada primeira do perfil de níveis de cinza

$$\frac{\partial f}{\partial x} = f(x + 1) - f(x)$$

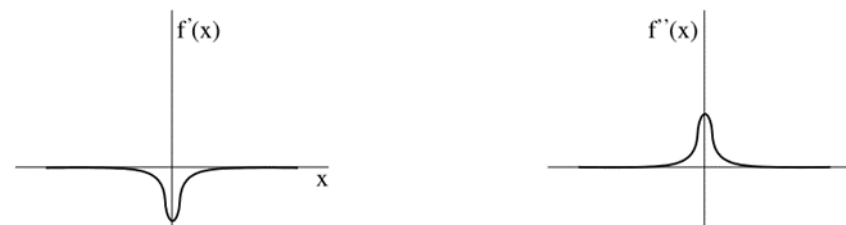


(e) derivada segunda do perfil de níveis de cinza

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = f(x + 1) + f(x - 1) - 2f(x)$$

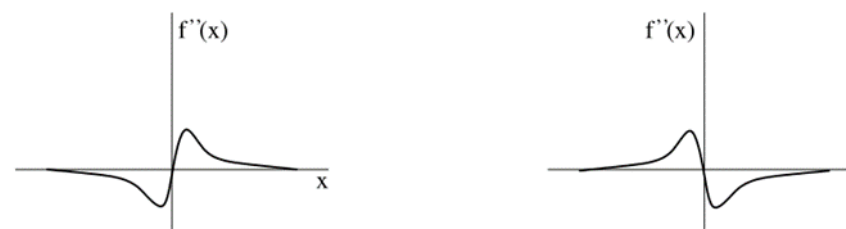
# Derivadas e bordas

- Magnitude da derivada primeira pode ser usada na detecção de uma borda em uma imagem.
- Sinal da derivada segunda possui um cruzamento em zero, indicando que há uma mudança de sinal na transição de níveis de cinza. Permite localizar as bordas em uma imagem.



(d) derivada primeira do perfil de níveis de cinza

$$\frac{\partial f}{\partial x} = f(x + 1) - f(x)$$



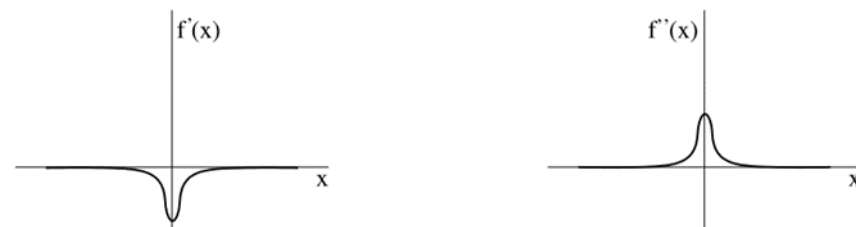
(e) derivada segunda do perfil de níveis de cinza

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = f(x + 1) + f(x - 1) - 2f(x)$$

# Derivadas e bordas

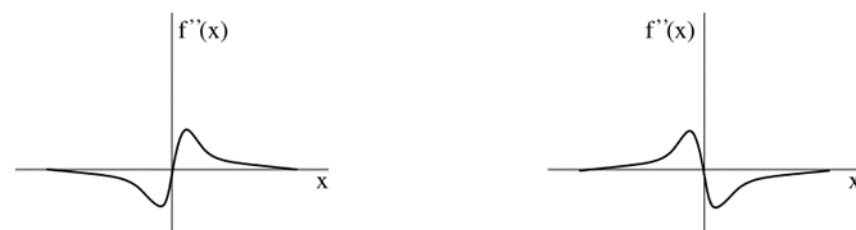
- A magnitude do gradiente é usada para obter a derivada primeira em qualquer ponto da imagem.
- O operador Laplaciano é usado para obter a derivada segunda em qualquer ponto da imagem (ex. kernel 3x3).

0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	0



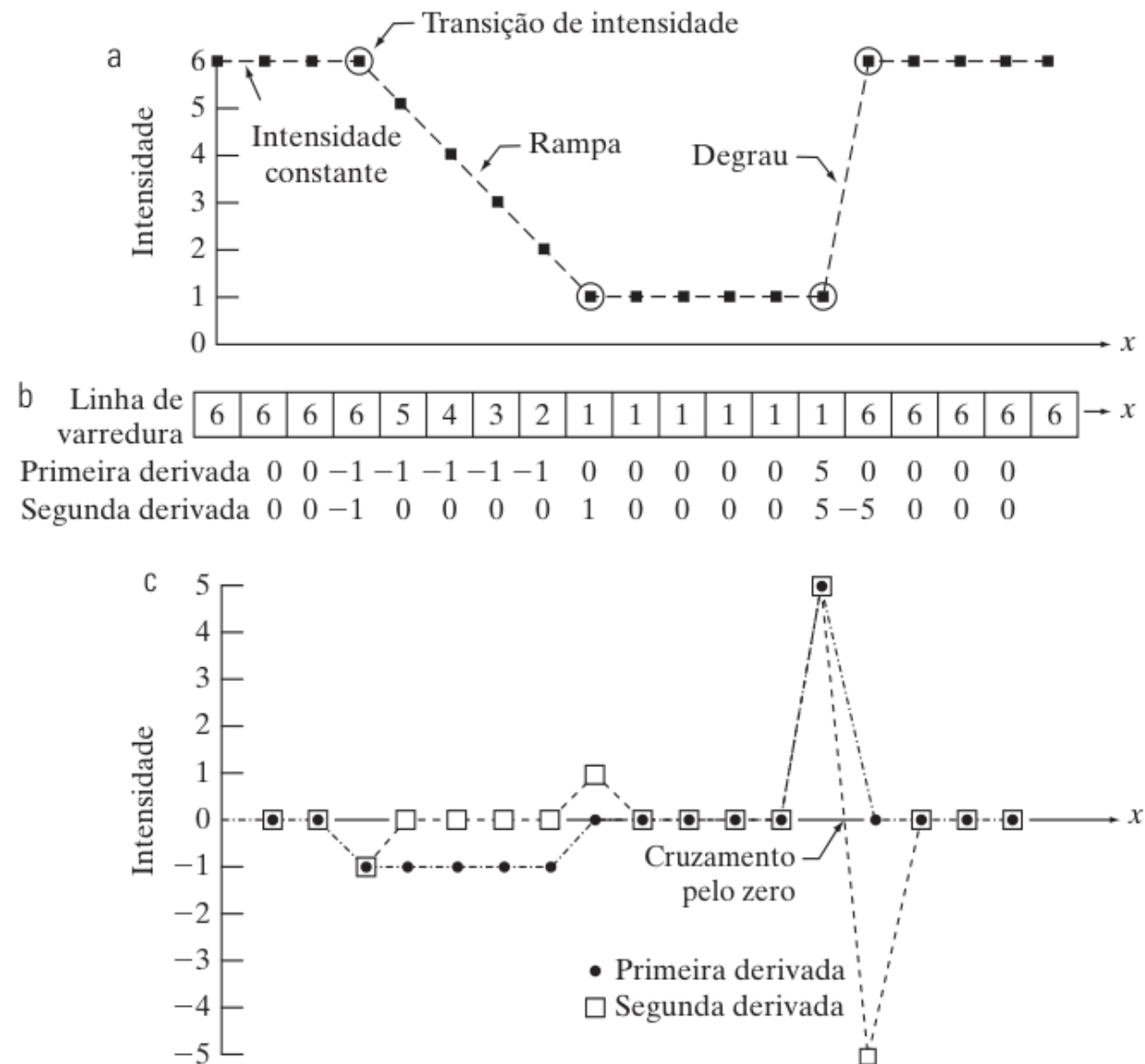
(d) derivada primeira do perfil de níveis de cinza

$$\frac{\partial f}{\partial x} = f(x + 1) - f(x)$$



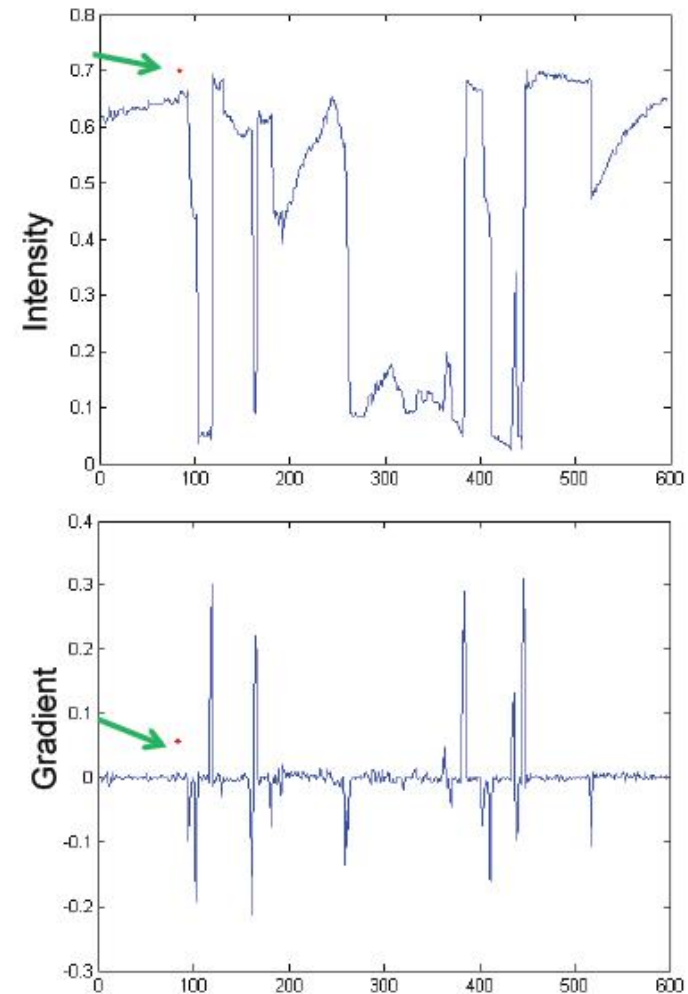
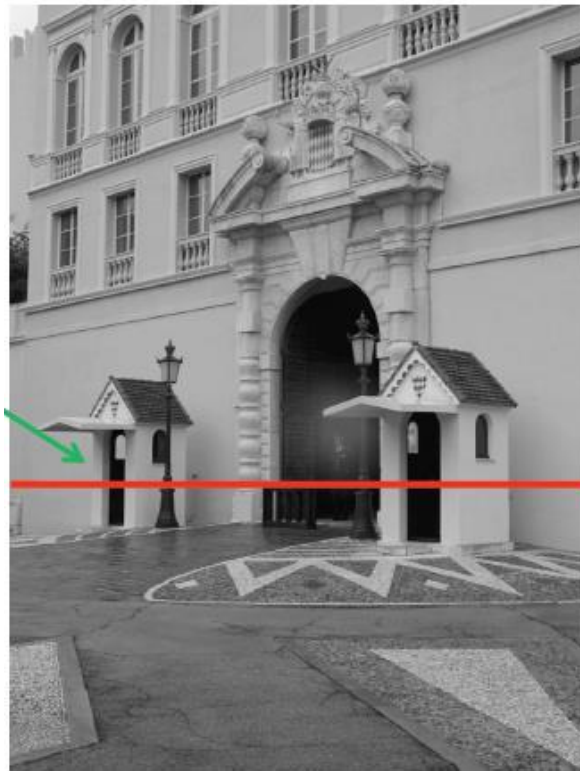
(e) derivada segunda do perfil de níveis de cinza

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = f(x + 1) + f(x - 1) - 2f(x)$$



**Figura 3.36** Ilustração do primeiro e do segundo derivativo de uma função digital unidimensional representando uma seção de um perfil de intensidade horizontal de uma imagem. Em (a) e (c), os pontos de dados são ligados por linhas tracejadas para facilitar a visualização.

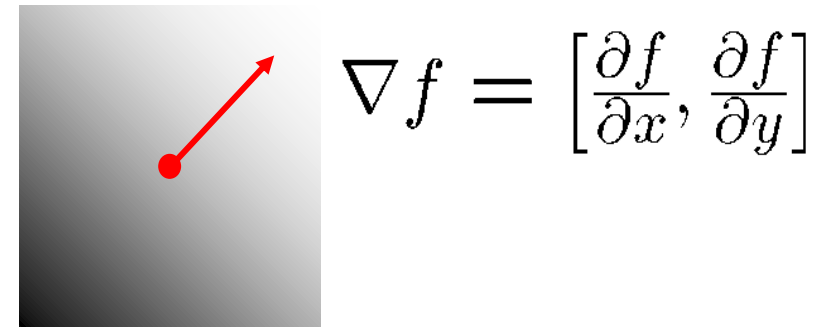
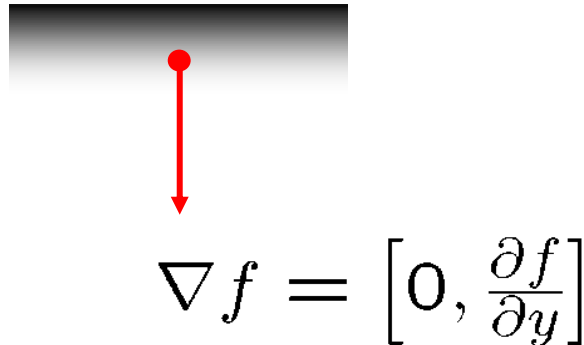
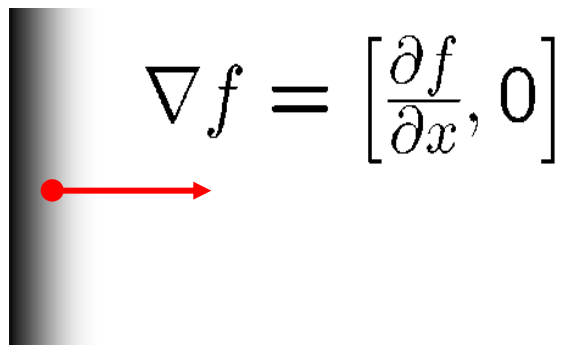
# Derivadas e bordas



Fonte: HOIEM, D.

# Gradiente de uma imagem

- Gradiente de uma imagem:  $\nabla f = \left[ \frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right]$
- O gradiente aponta na direção de mudança mais rápida da intensidade.



# Gradiente de uma imagem

- Direção do gradiente:  $\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\partial f}{\partial y} / \frac{\partial f}{\partial x} \right)$

- Magnitude do gradiente (intensidade da borda):

$$\|\nabla f\| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}$$

- Porém, podemos aproximar a magnitude do gradiente usando valores absolutos de  $(x, y)$ .

# Diferenciação e convolução

Calcular o gradiente de uma imagem?

- Gradiente discreto usando diferenças finitas:

$$h_x = f(x + 1, y) - f(x, y)$$

$$h_y = f(x, y + 1) - f(x, y)$$

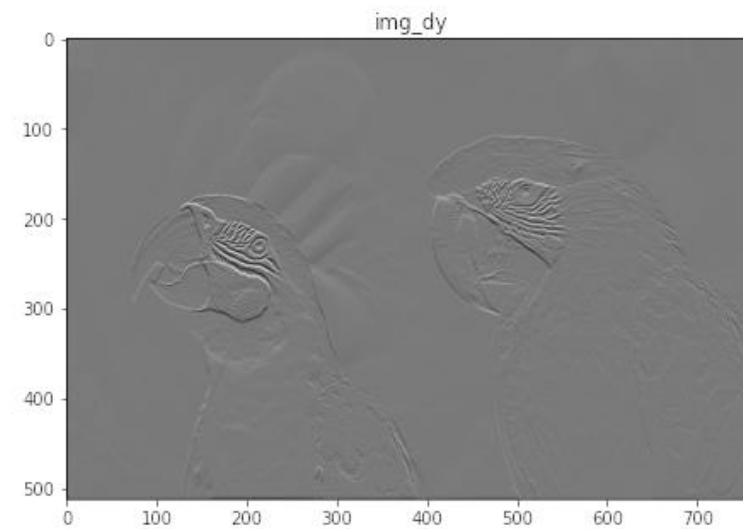
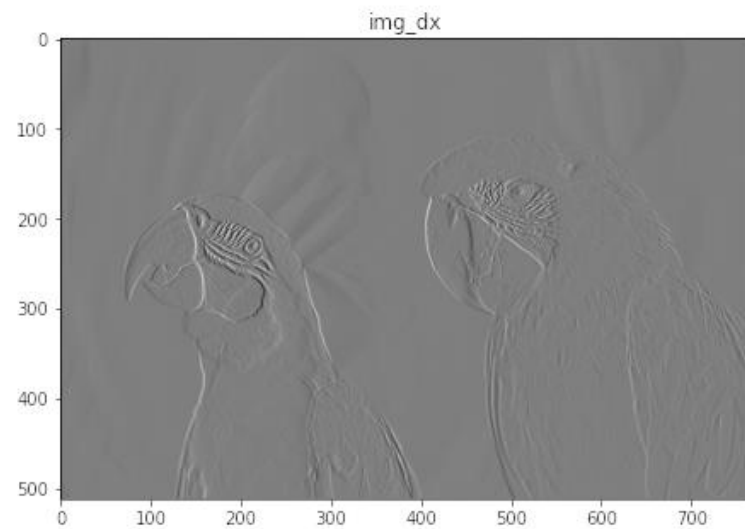
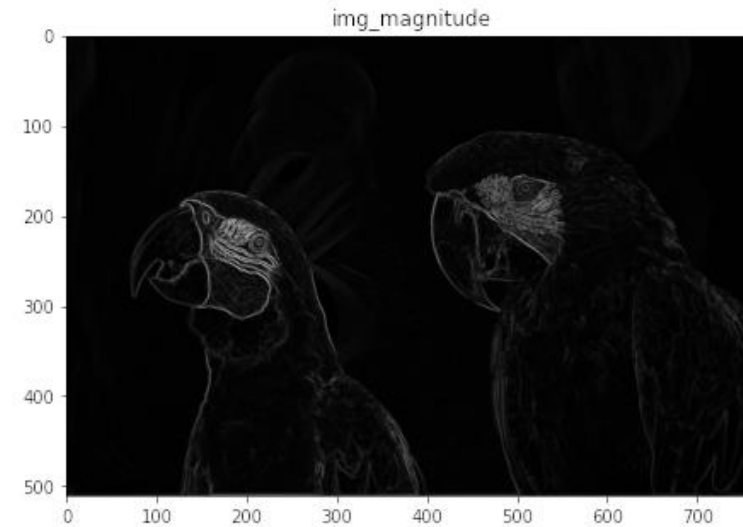
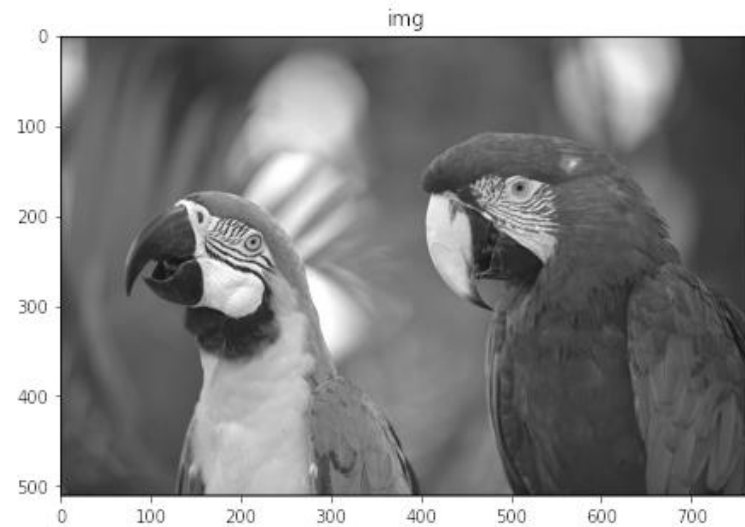
- A partir do gradiente discreto, podemos criar os seguintes filtros:

-1	0	1
----	---	---

-1
0
1

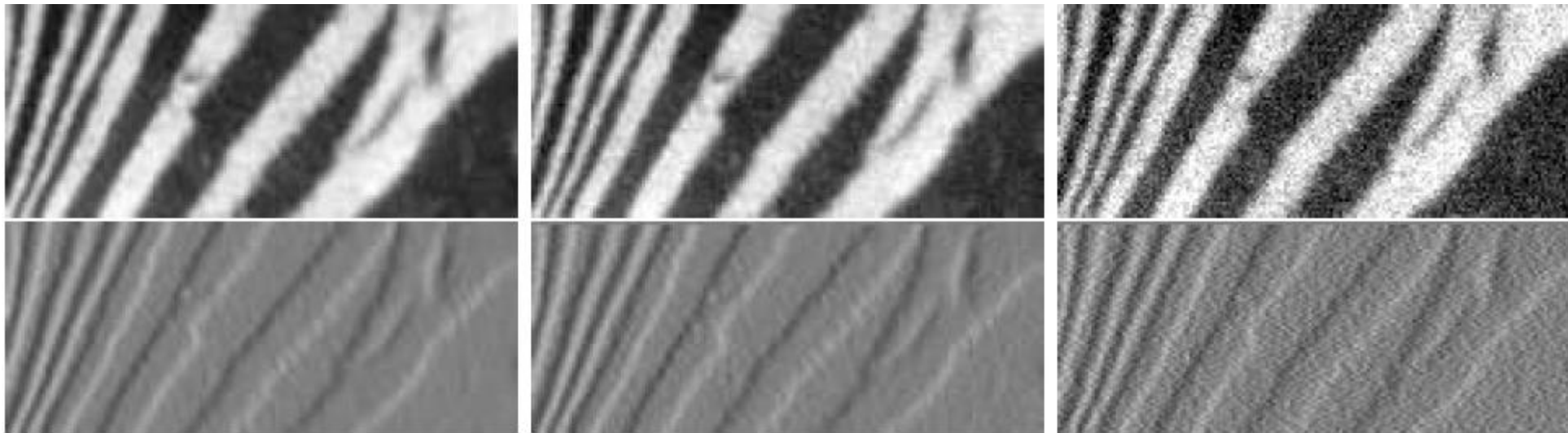


# Diferenciação e convolução



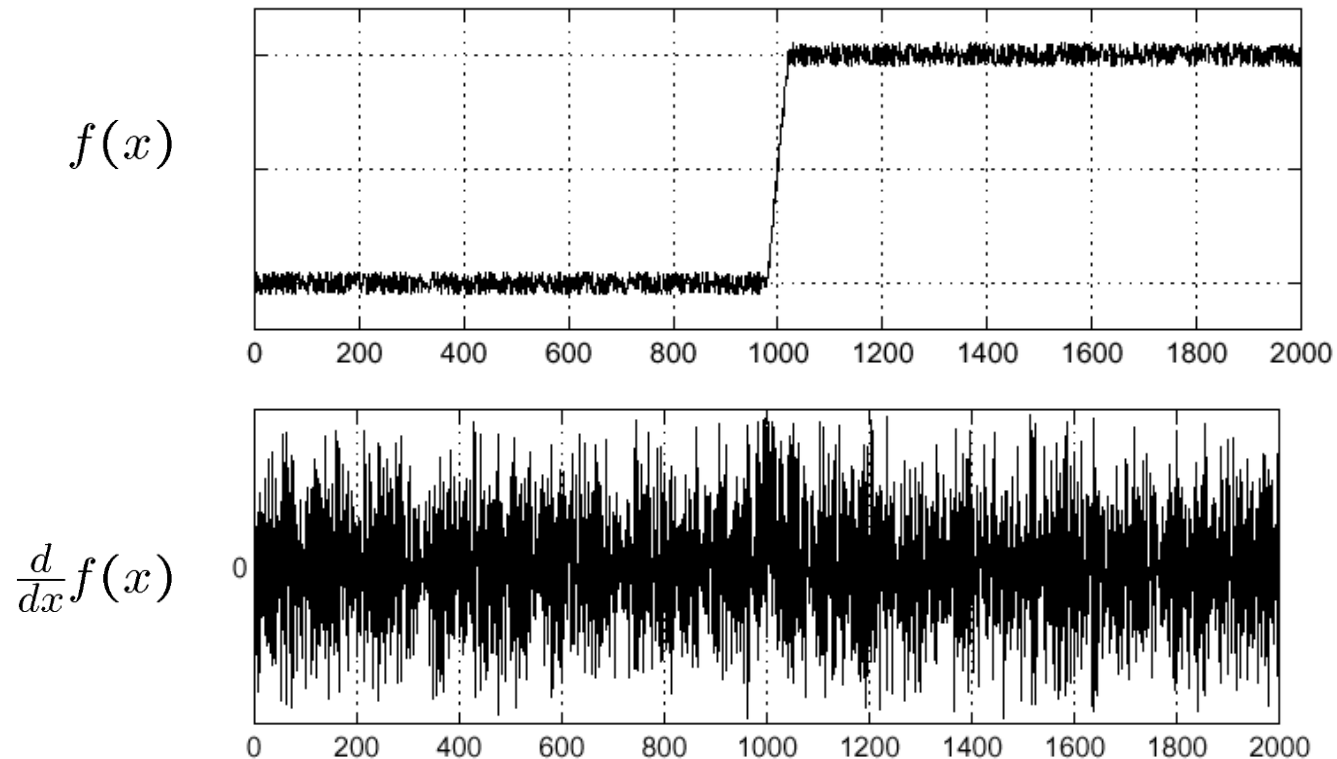
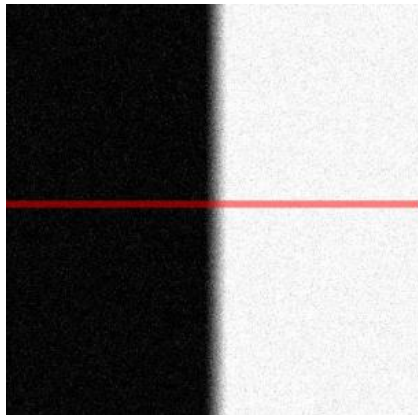
# Efeitos de ruído

- Derivada amplifica ruído.
- Filtros derivativos respondem intensamente aos pixels que diferem de seus vizinhos.



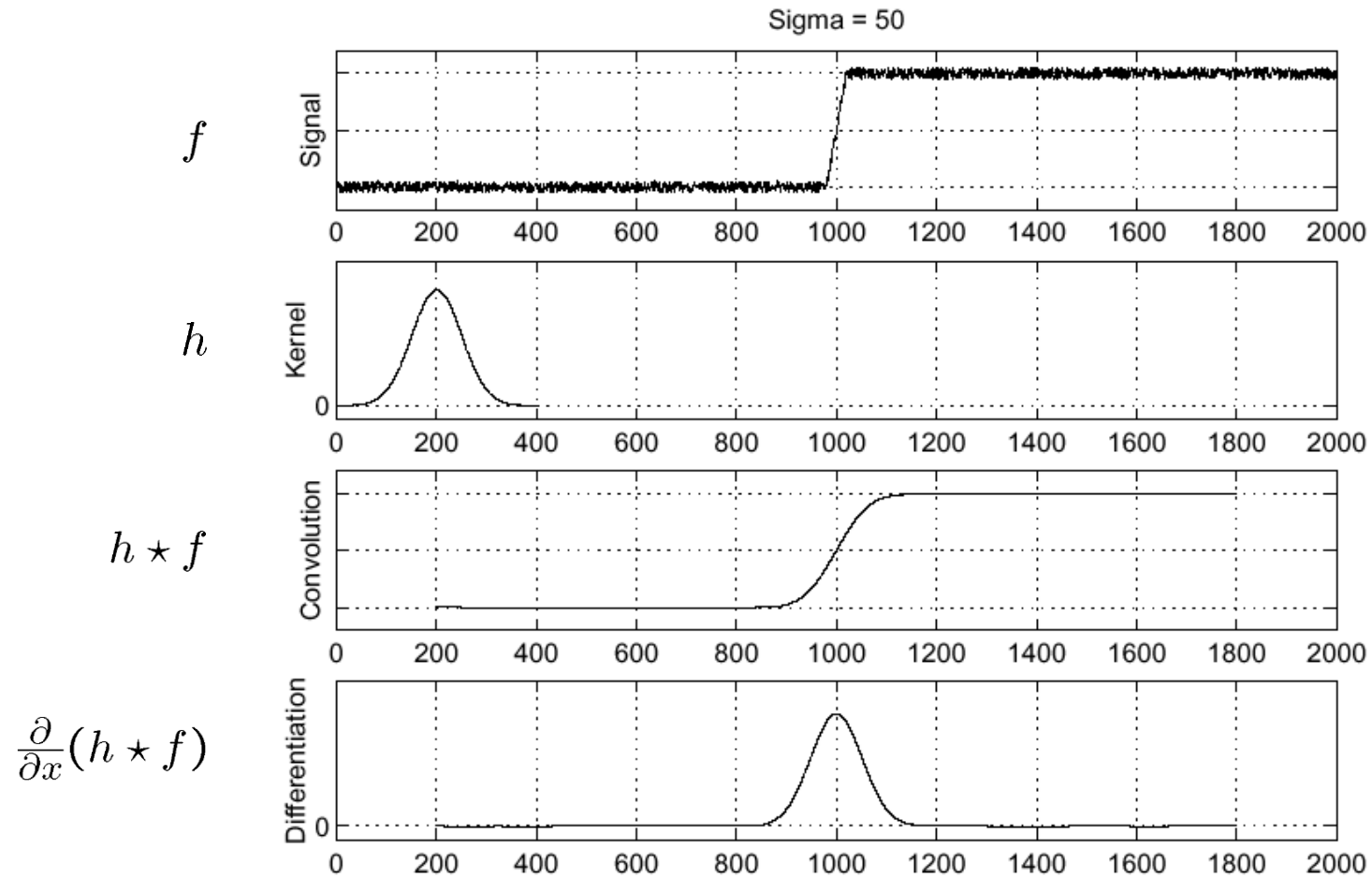
# Efeitos de ruído

- Considere uma única linha ou coluna de uma imagem.
  - Plotando a intensidade como uma função da posição resulta em um sinal:



Onde está a borda?

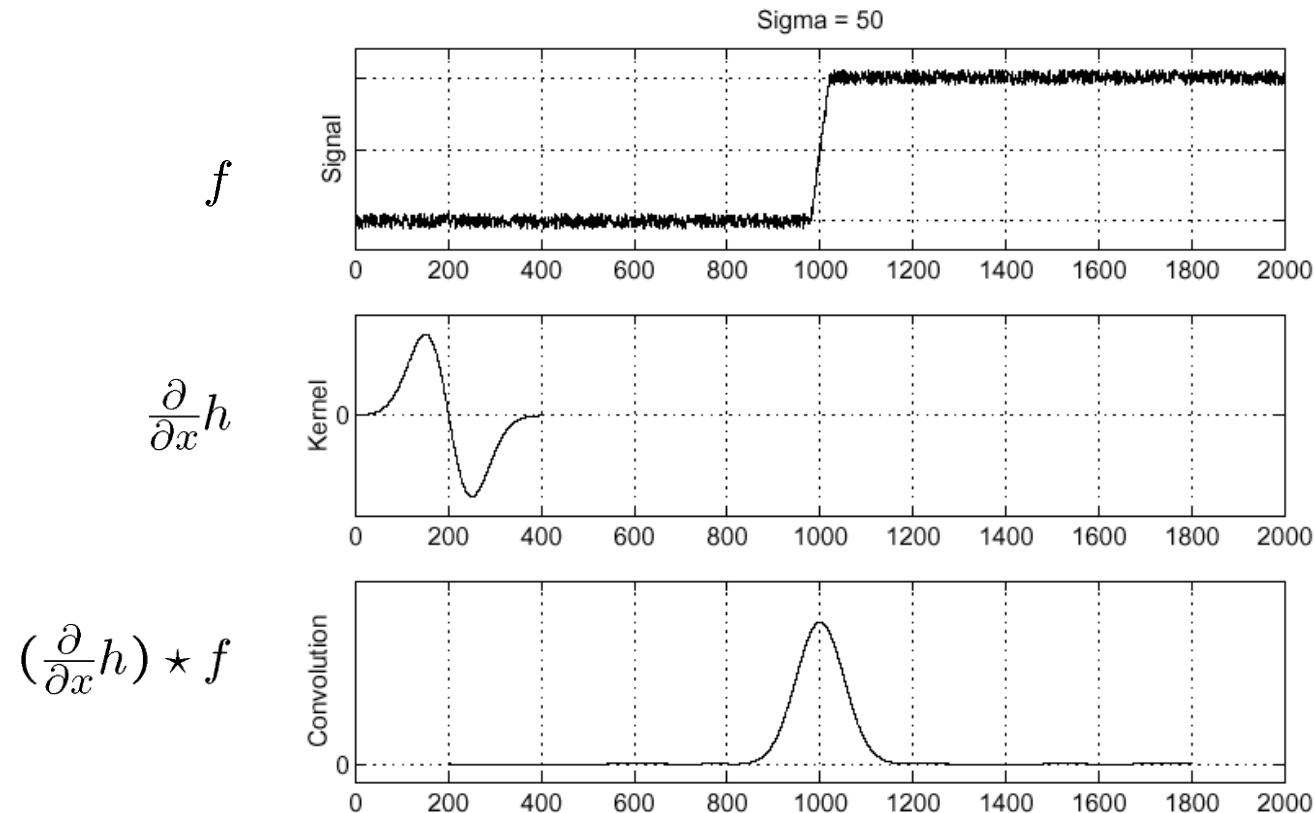
# Solução: suavizar primeiro



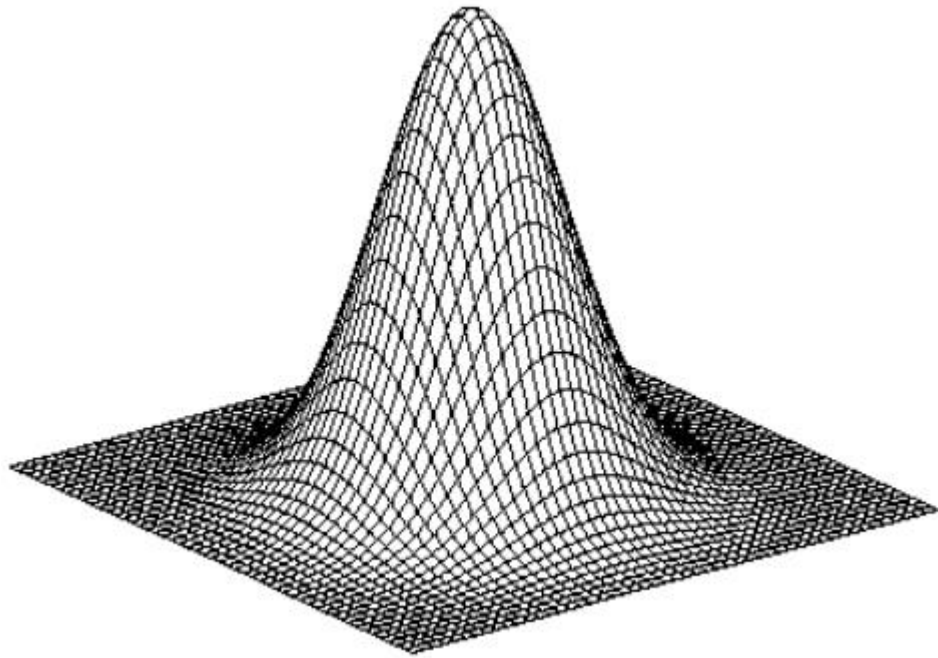
Para encontrar as bordas, veja os picos em  $\frac{\partial}{\partial x}(h \star f)$

# Teorema da derivada da convolução

- Propriedade útil  $\frac{\partial}{\partial x}(h \star f) = (\frac{\partial}{\partial x}h) \star f$ , elimina uma operação:

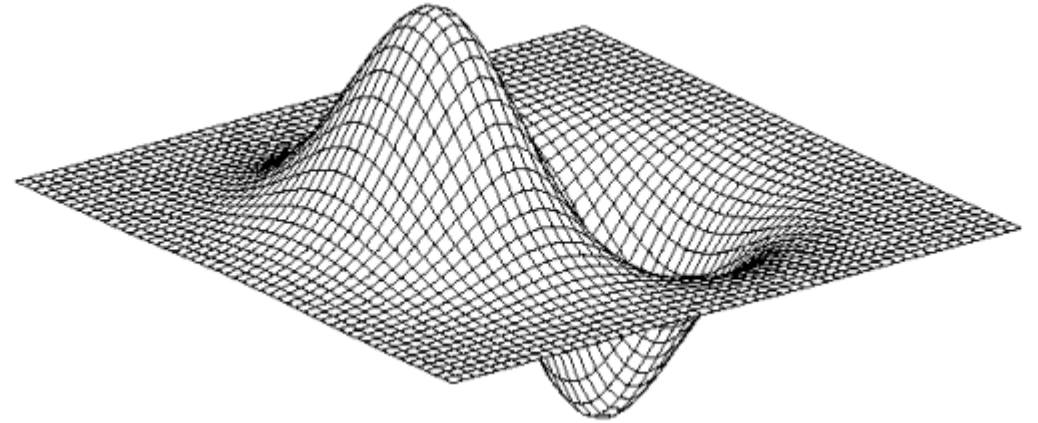


# Derivadas do filtro Gaussiano



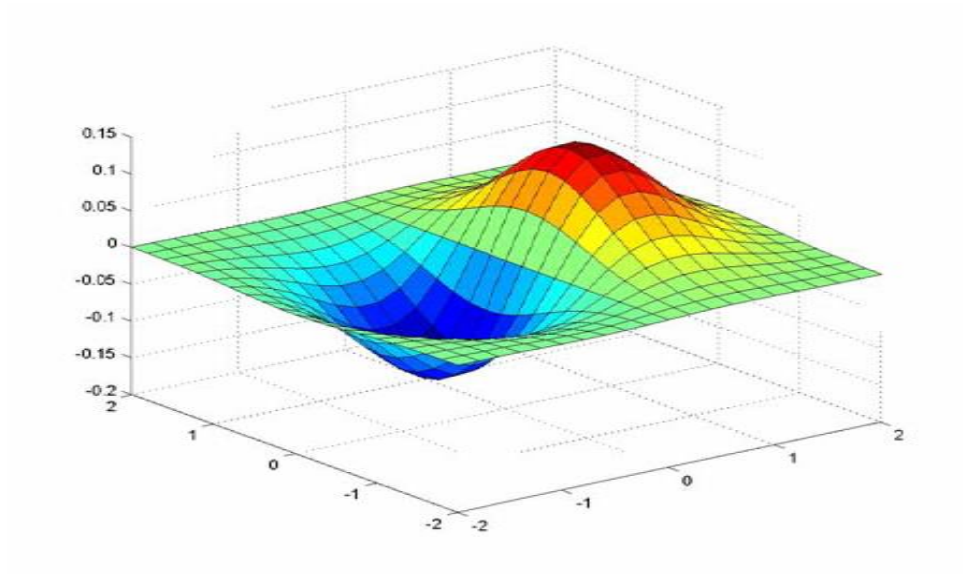
Gaussiano 2D

$$\star [1 \ -1] =$$

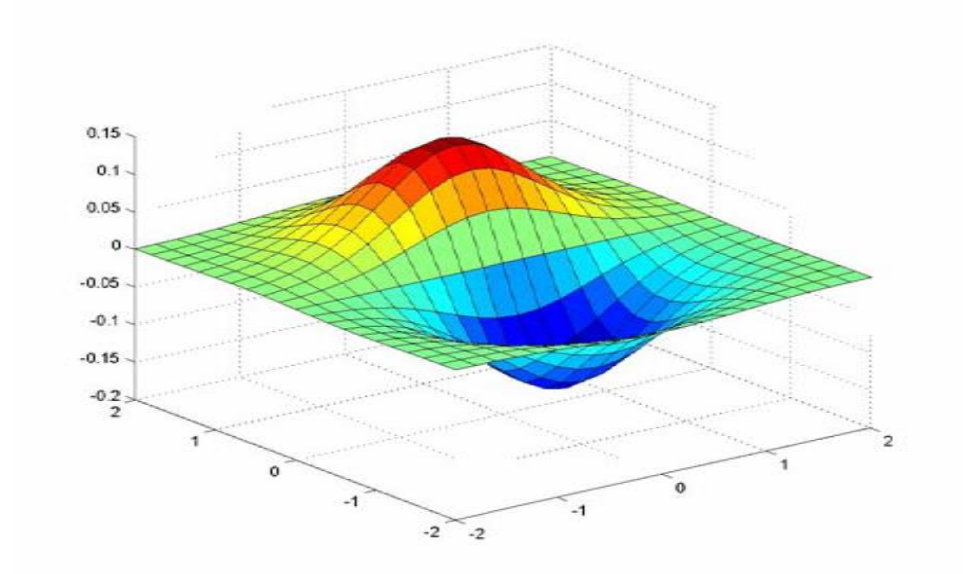
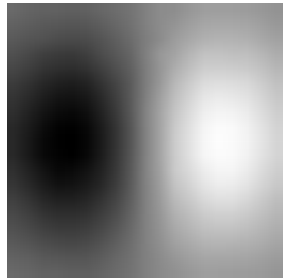


dx

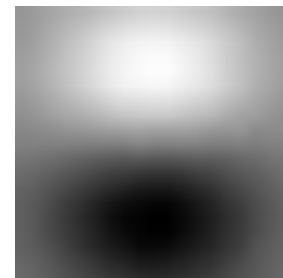
# Derivadas do filtro Gaussiano



direção x



direção y

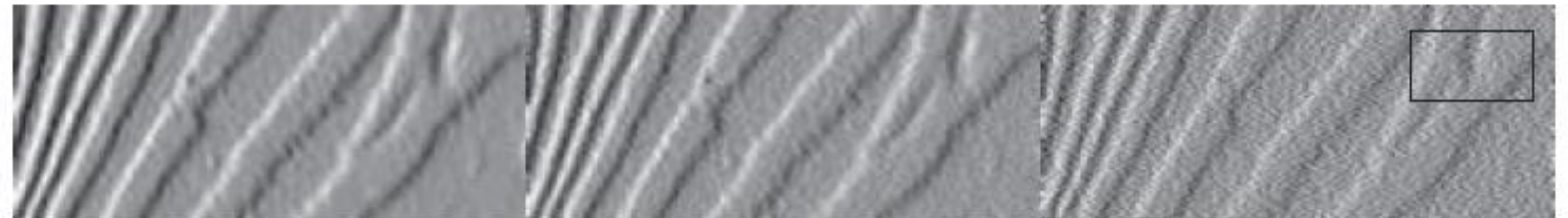


# Derivadas do filtro Gaussiano

Mais Ruído



Resultado da Derivada



$d/dx$

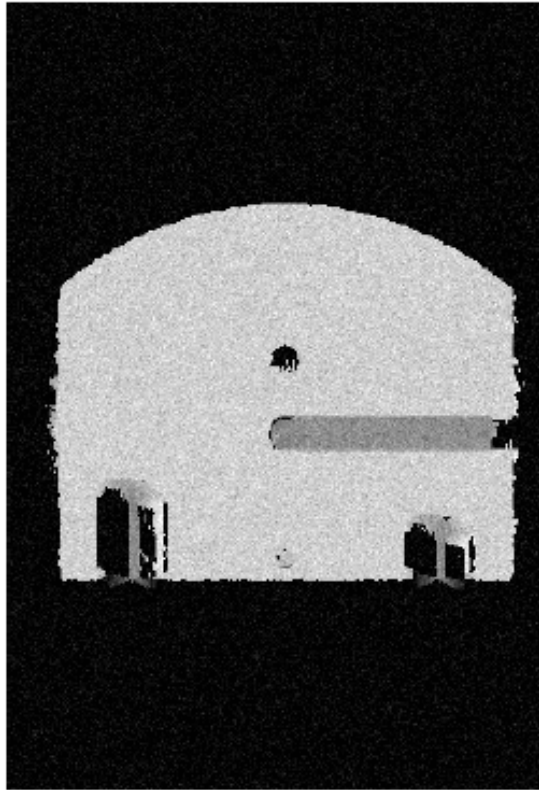


Resultado da Derivada  
da Gaussiana

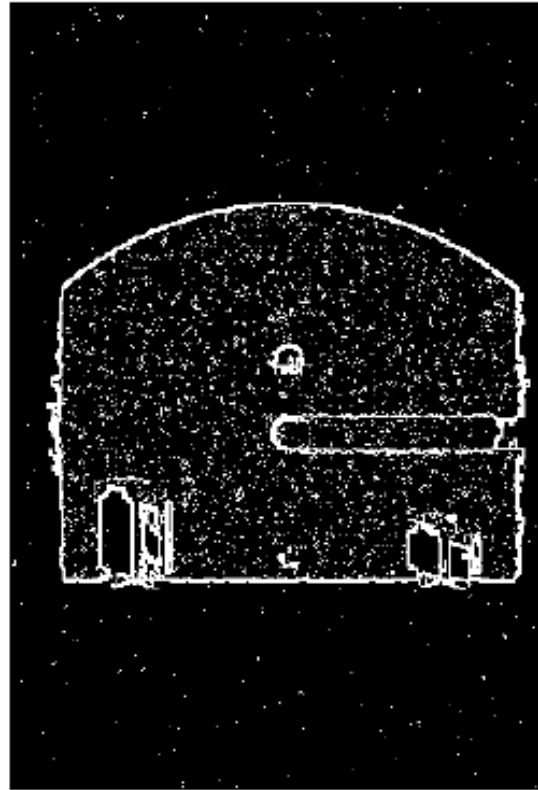




# Derivadas do filtro Gaussiano



Sem Gaussiano



Com Gaussiano

# Filtros de diferenças finitas

- A magnitude do gradiente pode ser aproximada no ponto  $f(x, y)$  de várias maneiras, usando diferentes kernels (filtros).
- **Filtro de Roberts**
  - Orientação  $45^\circ$  e  $135^\circ$
  - Bordas inclinadas são mais realçadas que outras.

$$h_x = \begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 0 \\ \hline 0 & -1 \\ \hline \end{array}$$

$$h_y = \begin{array}{|c|c|} \hline 0 & -1 \\ \hline 1 & 0 \\ \hline \end{array}$$

# Filtros de diferenças finitas

## ▪ Filtro de Prewitt

$$h_x = \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline \end{array}$$

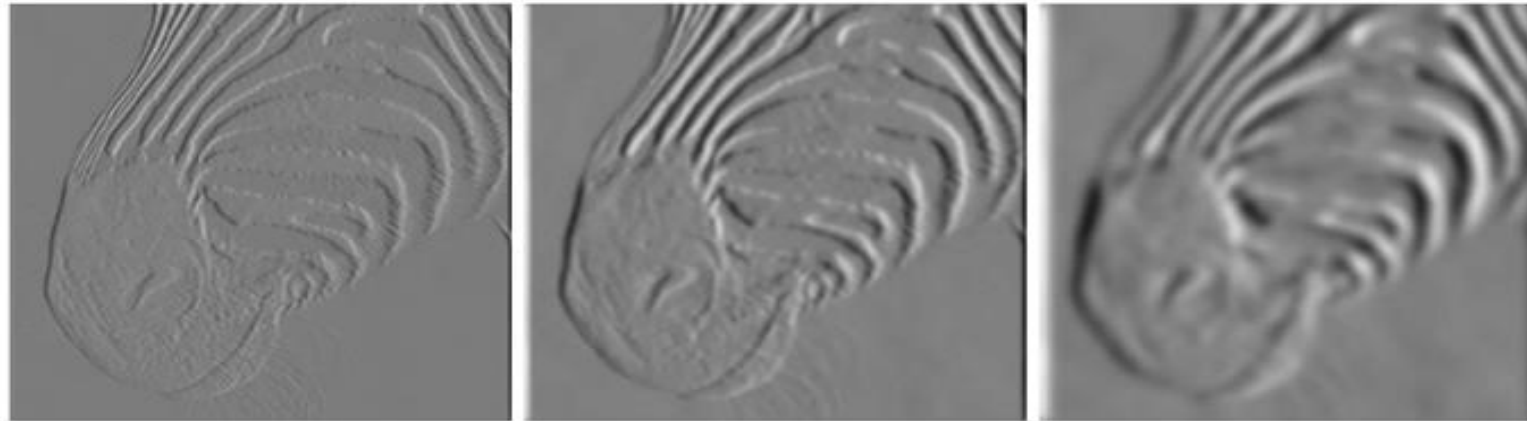
$$h_y = \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & -1 & -1 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array}$$

## ▪ Filtro de Sobel

$$h_x = \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline -2 & 0 & 2 \\ \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline \end{array}$$

$$h_y = \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & -2 & -1 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline \end{array}$$

# Balanceamento entre suavização e localização



1 pixel

3 pixels

7 pixels

- Derivadas suavizadas removem ruído, mas borram as bordas. Também encontram bordas em diferentes “escalas”.
  - Na imagem, escala pequena mostra mais detalhes, enquanto escala grande perde algumas listras.

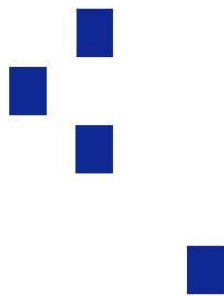
# Projetando um detector de bordas

Critérios para um detector de bordas “ótimo”:

- Boa detecção: O detector ótimo deve minimizar a probabilidade de falsos positivos (detectar bordas falsas causadas por ruído), assim como de falsos negativos (não detectando bordas reais).
- Boa localização: As bordas detectadas devem ser tão próximas quanto possíveis das verdadeiras.
- Resposta única: O detector deve retornar somente um ponto para cada ponto verdadeiro da borda; isto é, minimizar o número de máximos locais em torno da borda verdadeira.



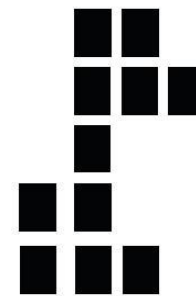
True  
edge



Poor robustness  
to noise



Poor  
localization



Too many  
responses

# Detector de bordas de Canny

- Filtra imagens com derivadas x e y da Gaussiana.
- Encontra magnitude e orientação do gradiente.
- Supressão de não-máximos na magnitude do gradiente da imagem.
  - A borda é localizada tomando-se apenas os pontos cuja magnitude seja localmente máxima na direção do gradiente.
  - Se magnitude do gradiente não atinge máxima, deve ser suprimido.
  - Reduz a espessura das bordas, mas pode conter fragmentos falsos causados pela presença de ruído.
- Limiarização e ligação (histerese):
  - Definir dois limiares: baixo (L) e alto (H),  $L < H$ .
  - Pontos da borda que possuem gradiente maior que H são mantidos como pontos da borda.
  - Pontos com gradiente entre L e H e conectados a pontos da borda são considerados como pertencentes à borda.
  - Gradiente abaixo de L não é considerado ponto da borda.

# Passos do detector de bordas de Canny



Original



Magnitude do  
gradiente



Supressão de  
não-máximos



Após histerese

# Efeito do tamanho do kernel (sigma)



Original



Canny com  $\sigma=1$



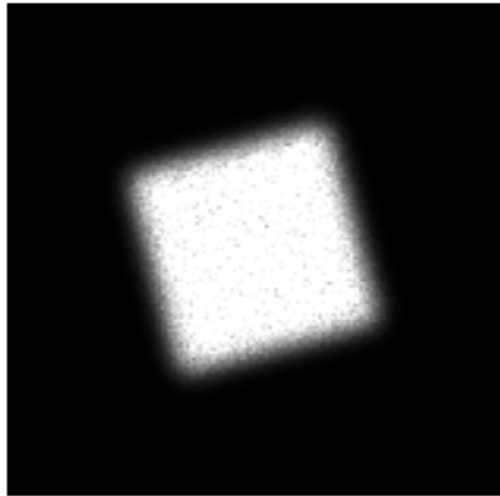
Canny com  $\sigma=2$

- A escolha do  $\sigma$  (sigma) depende do comportamento desejado.
  - $\sigma$  pequeno detecta detalhes “finos”.
  - $\sigma$  grande detecta bordas de grande escala.

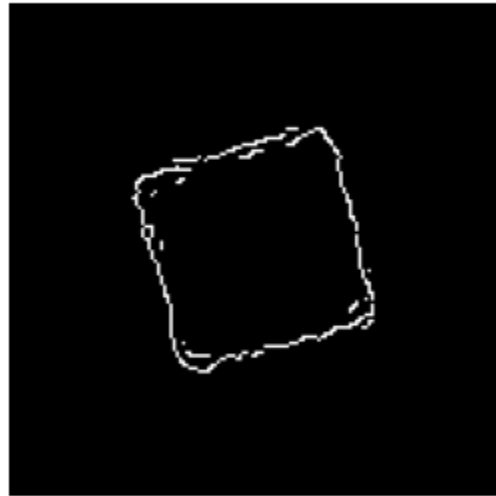


# Exemplo Python e scikit-image

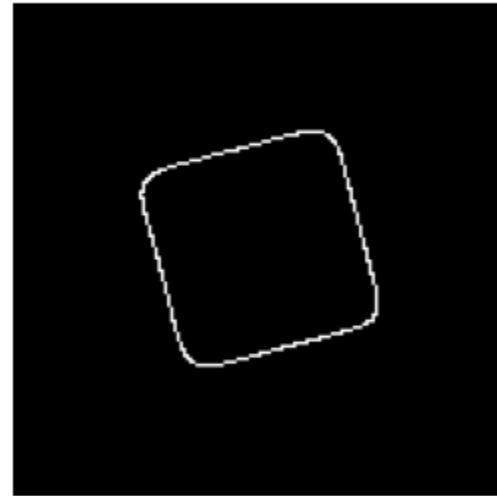
noisy image



Canny filter,  $\sigma = 1$



Canny filter,  $\sigma = 3$



[https://scikit-image.org/docs/dev/auto\\_examples/edges/plot\\_canny.html](https://scikit-image.org/docs/dev/auto_examples/edges/plot_canny.html)



# CC BY-SA 4.0 DEED

Atribuição-Compartilhagual 4.0 Internacional

Canonical URL : <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

[See the legal code](#)


## Você tem o direito de:


**Compartilhar** — copiar e redistribuir o material em qualquer suporte ou formato para qualquer fim, mesmo que comercial.

**Adaptar** — remixar, transformar, e criar a partir do material para qualquer fim, mesmo que comercial.

O licenciante não pode revogar estes direitos desde que você respeite os termos da licença.

## De acordo com os termos seguintes:

 **Atribuição** — Você deve dar o [crédito apropriado](#), prover um link para a licença e [indicar se mudanças foram feitas](#). Você deve fazê-lo em qualquer circunstância razoável, mas de nenhuma maneira que sugira que o licenciante apoia você ou o seu uso.

 **Compartilhagual** — Se você remixar, transformar, ou criar a partir do material, tem de distribuir as suas contribuições sob a [mesma licença](#) que o original.

**Sem restrições adicionais** — Você não pode aplicar termos jurídicos ou [medidas de caráter tecnológico](#) que restrinjam legalmente outros de fazerem algo que a licença permita.



# CC BY-SA 4.0 DEED

Attribution-ShareAlike 4.0 International

Canonical URL : <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

[See the legal code](#)


## You are free to:


**Share** — copy and redistribute the material in any medium or format for any purpose, even commercially.

**Adapt** — remix, transform, and build upon the material for any purpose, even commercially.

The licensor cannot revoke these freedoms as long as you follow the license terms.

## Under the following terms:

 **Attribution** — You must give [appropriate credit](#), provide a link to the license, and [indicate if changes were made](#). You may do so in any reasonable manner, but not in any way that suggests the licensor endorses you or your use.

 **ShareAlike** — If you remix, transform, or build upon the material, you must distribute your contributions under the [same license](#) as the original.

**No additional restrictions** — You may not apply legal terms or [technological measures](#) that legally restrict others from doing anything the license permits.

## Notices: