

# Redes Neurais e Aprendizagem Profunda

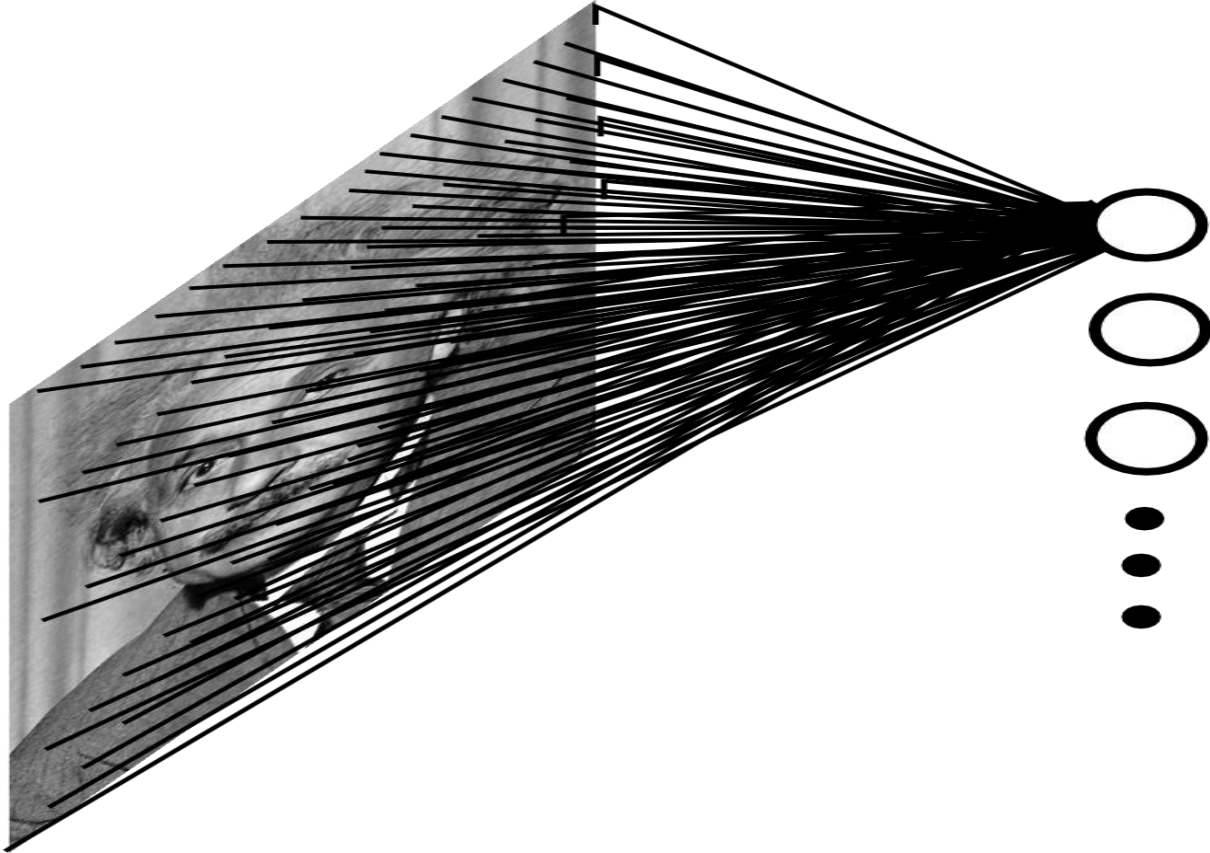
## REDES NEURAIS CONVOLUCIONAIS

### INTRODUÇÃO

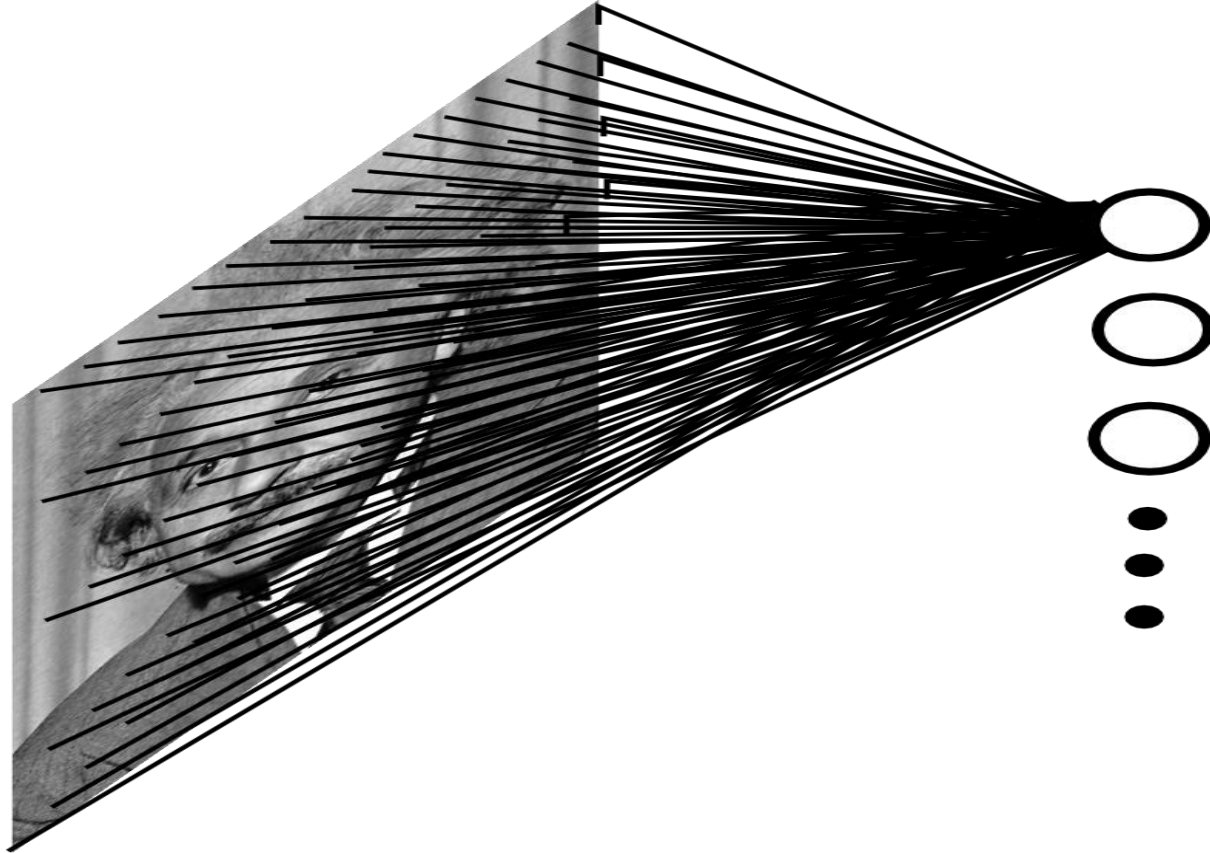
---

Zenilton K. G. Patrocínio Jr  
[zenilton@pucminas.br](mailto:zenilton@pucminas.br)

# Camada Completamente Conectada em Imagens



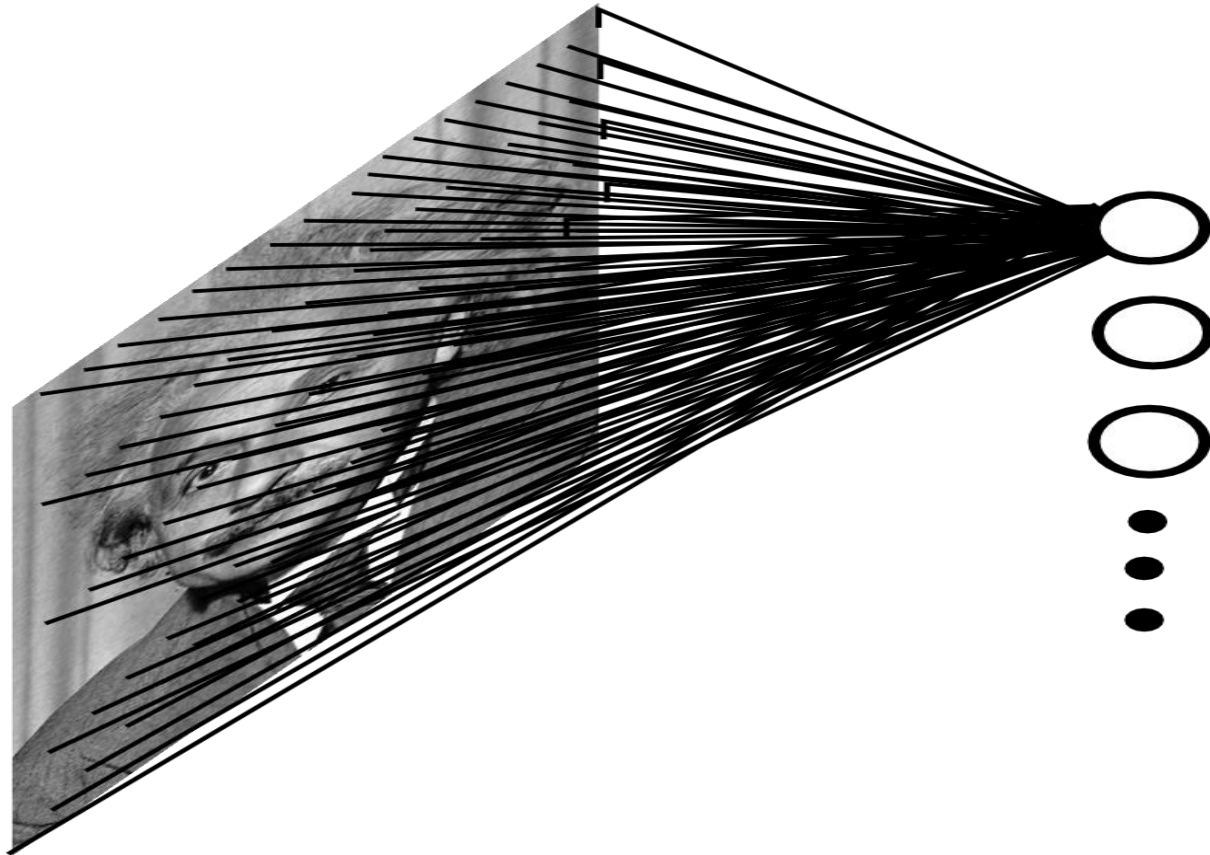
# Camada Completamente Conectada em Imagens



Exemplo: Imagem  $200 \times 200$

40K Neurônios

# Camada Completamente Conectada em Imagens

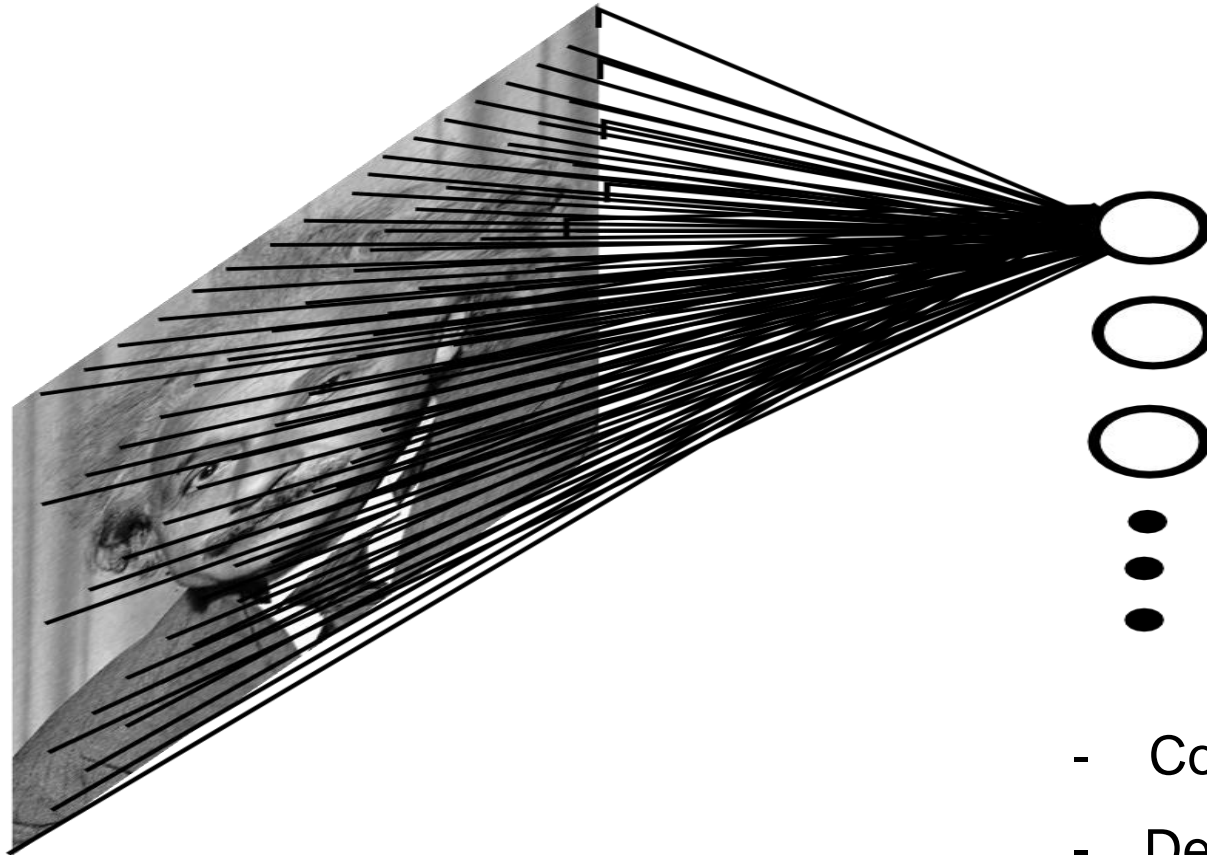


Exemplo: Imagem  $200 \times 200$

40K Neurônios

➡ ~1,6B parâmetros !!!

# Camada Completamente Conectada em Imagens



Exemplo: Imagem  $200 \times 200$

40K Neurônios

➡ ~1,6B parâmetros !!!

- Correlação espacial é fenômeno local
- Desperdício de recursos + ausência de dados suficientes para treinamento . . .

# Filtragem de Imagem

- Técnicas de filtragem podem ser utilizadas para extração de informação de interesse em uma determinada imagem

# Filtragem de Imagem

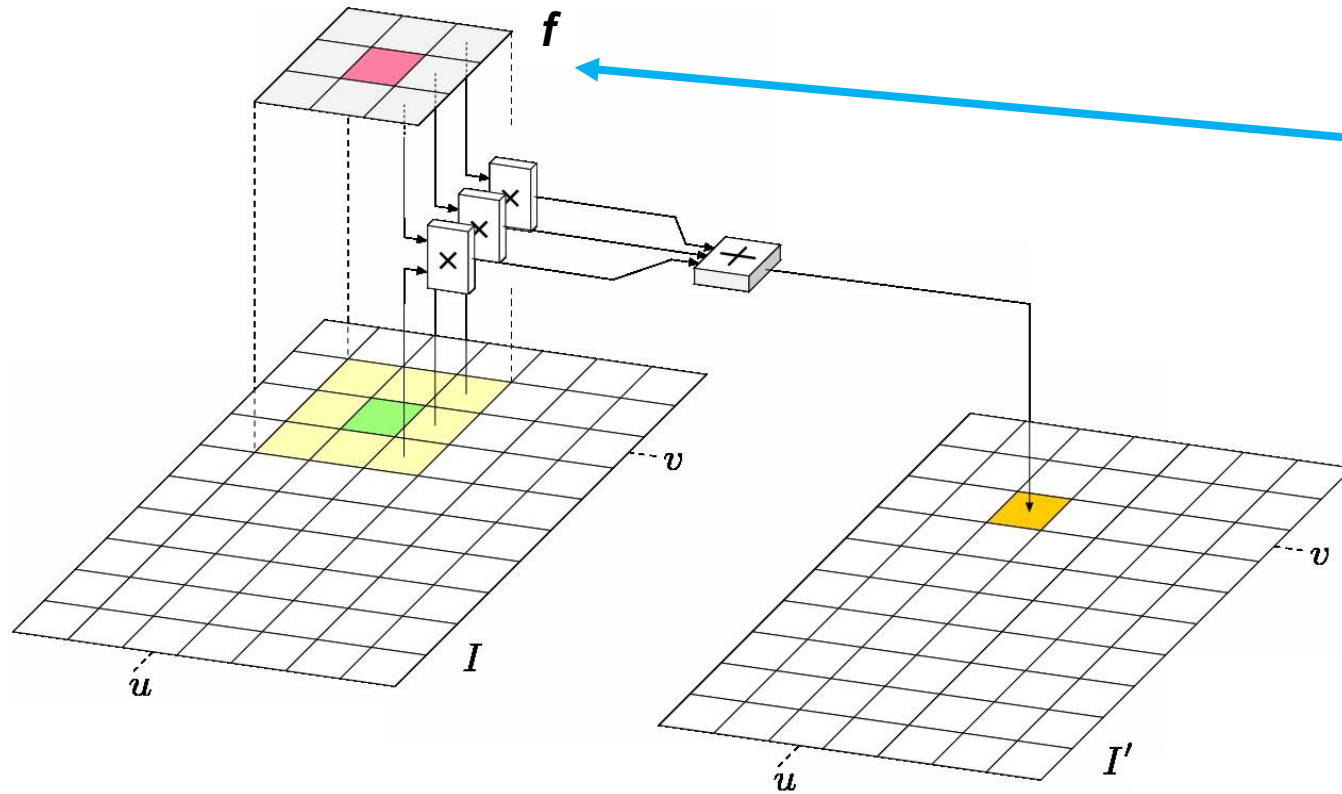
- Técnicas de filtragem podem ser utilizadas para extração de informação de interesse em uma determinada imagem
- Filtragem de imagem pode ser feita:
  - No domínio do espaço
  - No domínio da frequência

# Filtragem de Imagem

- Técnicas de filtragem podem ser utilizadas para extração de informação de interesse em uma determinada imagem
- Filtragem de imagem pode ser feita:
  - No domínio do espaço
  - No domínio da frequência
- **Filtros Espaciais Lineares** calculam o valor resultante de cada pixel como uma combinação linear dos valores de pixels em uma vizinhança local do pixel na imagem original

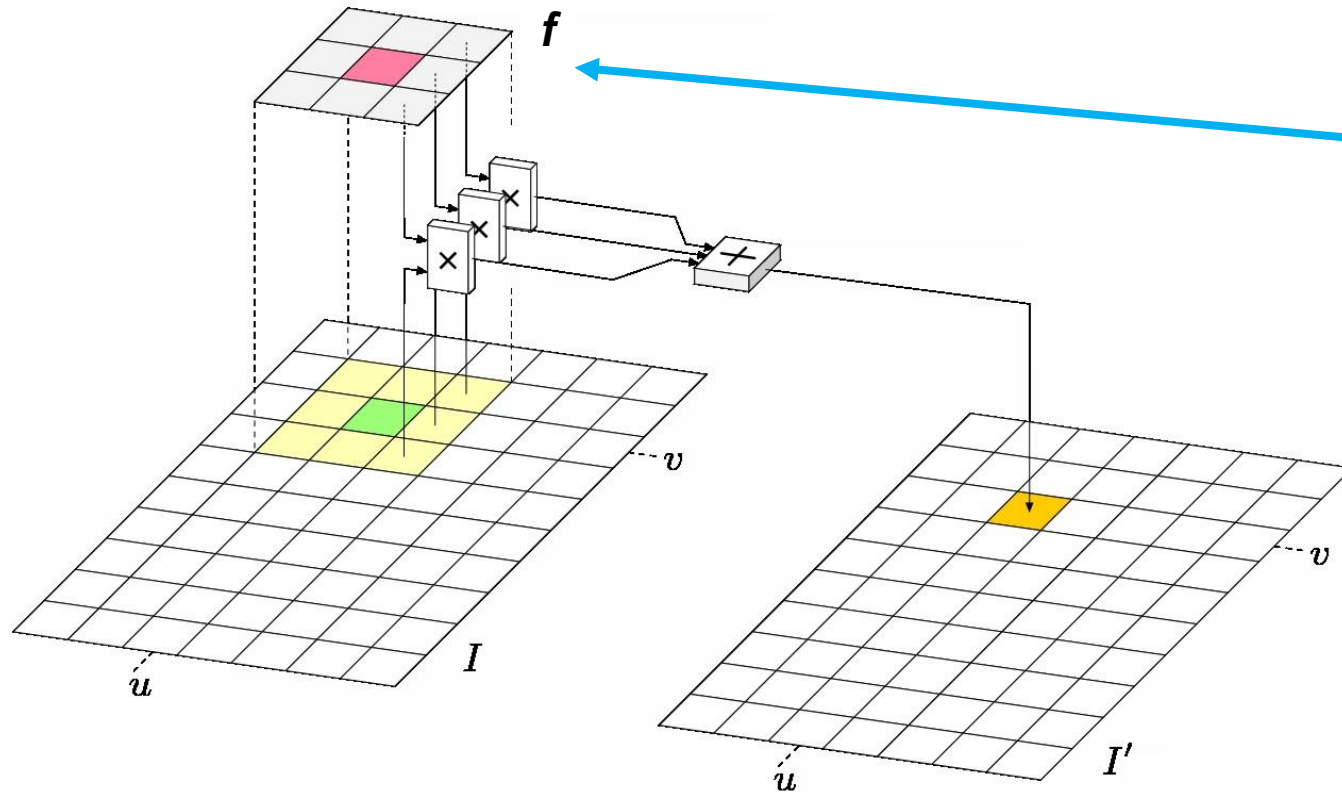


# Filtragem de Imagem



O processo de filtragem normalmente é realizado por meio de matrizes denominadas **máscaras (ou filtros)** em que cada posição está associado um valor numérico chamado peso ou coeficiente

# Filtragem de Imagem



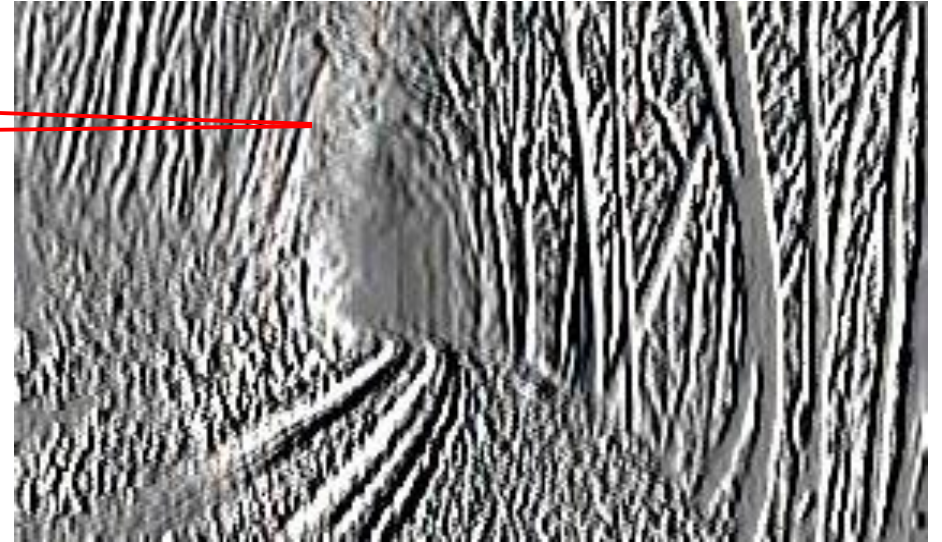
O processo de filtragem normalmente é realizado por meio de matrizes denominadas **máscaras (ou filtros)** em que cada posição está associado um valor numérico chamado peso ou coeficiente

Os coeficientes do filtro são multiplicados pelos valores dos pixels correspondentes e então somados, substituindo o valor do pixel central

# Filtragem de Imagem → Convolução



$$* \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$



$$(f * g)(x, y) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} f(i, j) g(x - i, y - j)$$

# Filtragem de Imagem → Convolução

$$f[\cdot, \cdot] = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	0	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	90	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$g[\cdot, \cdot]$

# Filtragem de Imagem → Convolução

$$f[\cdot, \cdot] = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$h = f * g$$

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	0	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	90	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$$g[\cdot, \cdot]$$

# Filtragem de Imagem → Convolução

$$f[\cdot, \cdot] = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$h = f * g$$

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	0	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	90	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$g[\cdot, \cdot]$


$h[\cdot, \cdot]$

# Filtragem de Imagem → Convolução

$$f[\cdot, \cdot] = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$h = f * g$$

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	0	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	90	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$g[\cdot, \cdot]$

	?								

$h[\cdot, \cdot]$

# Filtragem de Imagem → Convolução

$$f[\cdot, \cdot] = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$h = f * g$$

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	0	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	90	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$g[\cdot, \cdot]$

	0								

$h[\cdot, \cdot]$



# Filtragem de Imagem → Convolução

$$f[\cdot, \cdot] = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$h = f * g$$

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	0	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	90	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$g[\cdot, \cdot]$

	0	10							

$h[\cdot, \cdot]$

# Filtragem de Imagem → Convolução

$$f[\cdot, \cdot] = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$h = f * g$$

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	0	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	90	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$g[\cdot, \cdot]$

	0	10	20						

$h[\cdot, \cdot]$

# Filtragem de Imagem → Convolução

$$f[\cdot, \cdot] = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$h = f * g$$

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	0	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	90	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$g[\cdot, \cdot]$

	0	10	20	30					

$h[\cdot, \cdot]$

# Filtragem de Imagem → Convolução

$$f[\cdot, \cdot] = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$h = f * g$$

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	0	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	90	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$g[\cdot, \cdot]$

	0	10	20	30	30				

$h[\cdot, \cdot]$

# Filtragem de Imagem → Convolução

$$f[\cdot, \cdot] = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$h = f * g$$

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	0	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	90	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$g[\cdot, \cdot]$

	0	10	20	30	30				

$h[\cdot, \cdot]$

# Filtragem de Imagem → Convolução

$$f[\cdot, \cdot] = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$h = f * g$$

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	0	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	90	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$g[\cdot, \cdot]$

	0	10	20	30	30				
					50				

$h[\cdot, \cdot]$

# Filtragem de Imagem → Convolução

$$f[\cdot, \cdot] = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$h = f * g$$

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	0	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	90	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$g[\cdot, \cdot]$

	0	10	20	30	30				
							?		
				50					

$h[\cdot, \cdot]$

# Filtragem de Imagem → Convolução

$$f[\cdot, \cdot] = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$h = f * g$$

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	0	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	90	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$g[\cdot, \cdot]$

	0	10	20	30	30				
						90			
				50					

$h[\cdot, \cdot]$



# Filtragem de Imagem → Convolução

$$f[\cdot, \cdot] = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$h = f * g$$

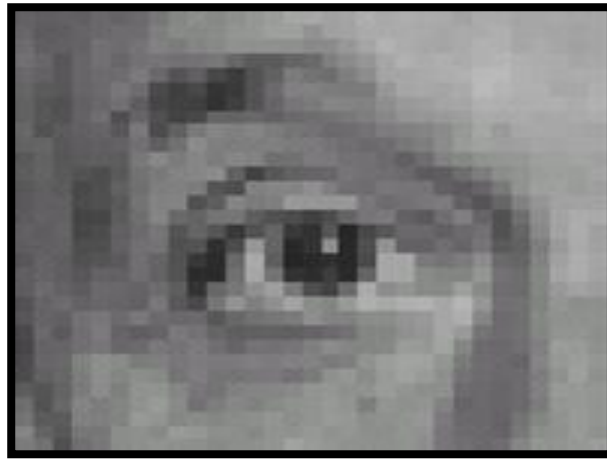
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	0	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	90	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$g[\cdot, \cdot]$

	0	10	20	30	30	30	20	10	
	0	20	40	60	60	60	40	20	
	0	30	60	90	90	90	60	30	
	0	30	50	80	80	90	60	30	
	0	30	50	80	80	90	60	30	
	0	20	30	50	50	60	40	20	
	10	20	30	30	30	30	20	10	
	10	10	10	0	0	0	0	0	

$h[\cdot, \cdot]$

# Filtros Lineares – Exemplos



Original

$$* \frac{1}{9} \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array} = ?$$

# Filtros Lineares – Exemplos



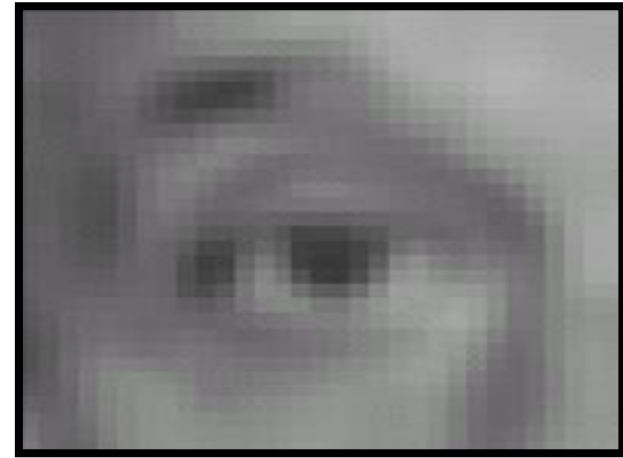
Original

\*

$\frac{1}{9}$

1	1	1
1	1	1
1	1	1

=



Suavização (com  
filtro da média)

# Filtros Lineares – Exemplos



Original

\*

0	0	0
0	1	0
0	0	0

=

?

# Filtros Lineares – Exemplos



Original

\*

0	0	0
0	1	0
0	0	0

=



Identidade (sem  
filtragem)

# Filtros Lineares – Exemplos



Original

\*

0	0	0
0	0	1
0	0	0

=

?

# Filtros Lineares – Exemplos



Original

\*

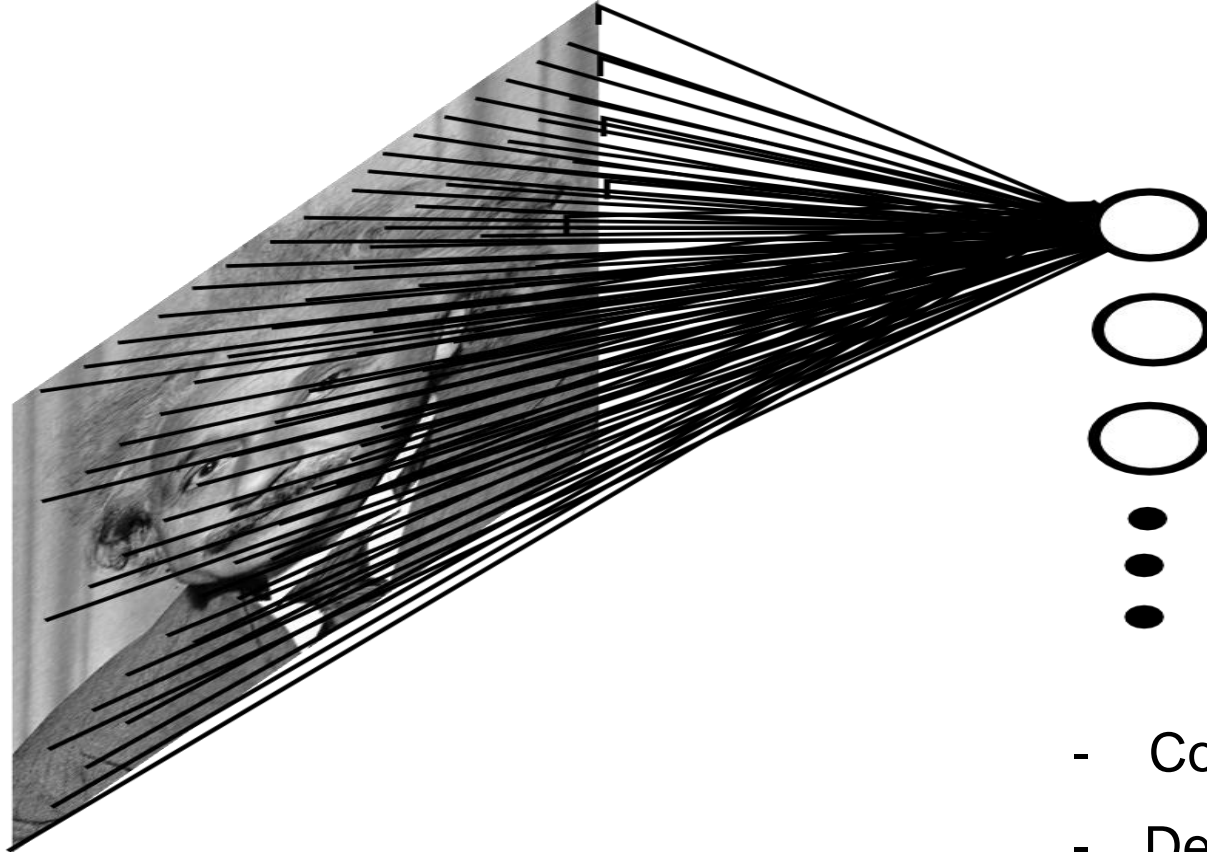
0	0	0
0	0	1
0	0	0

=



Deslocamento para  
esquerda de um  
pixel

# Camada Completamente Conectada em Imagens



Exemplo: Imagem  $200 \times 200$

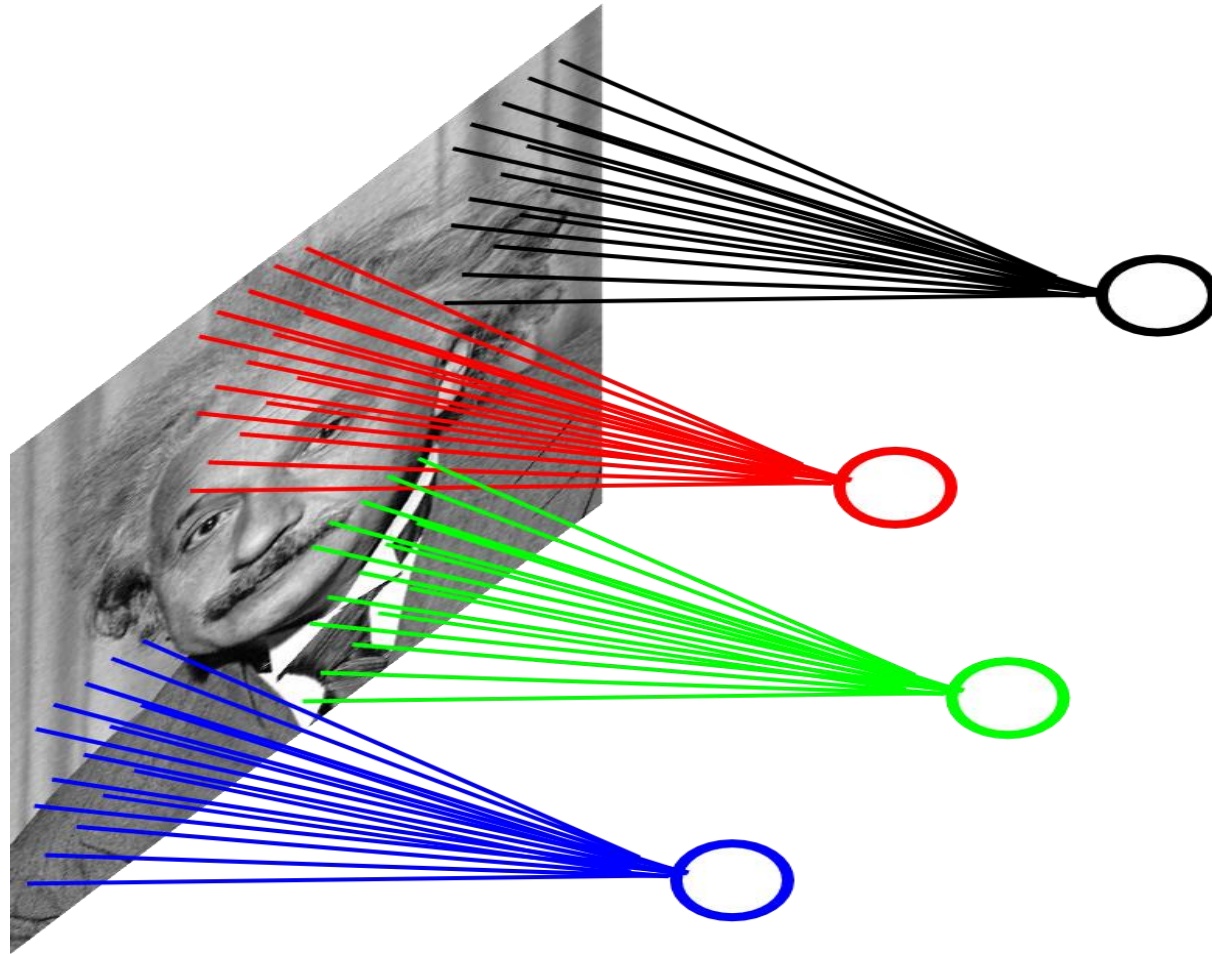
40K Neurônios

➡ ~1,6B parâmetros !!!

- Correlação espacial é fenômeno local
- Desperdício de recursos + ausência de dados suficientes para treinamento . . .



# Camada Conectada Localmente em Imagens

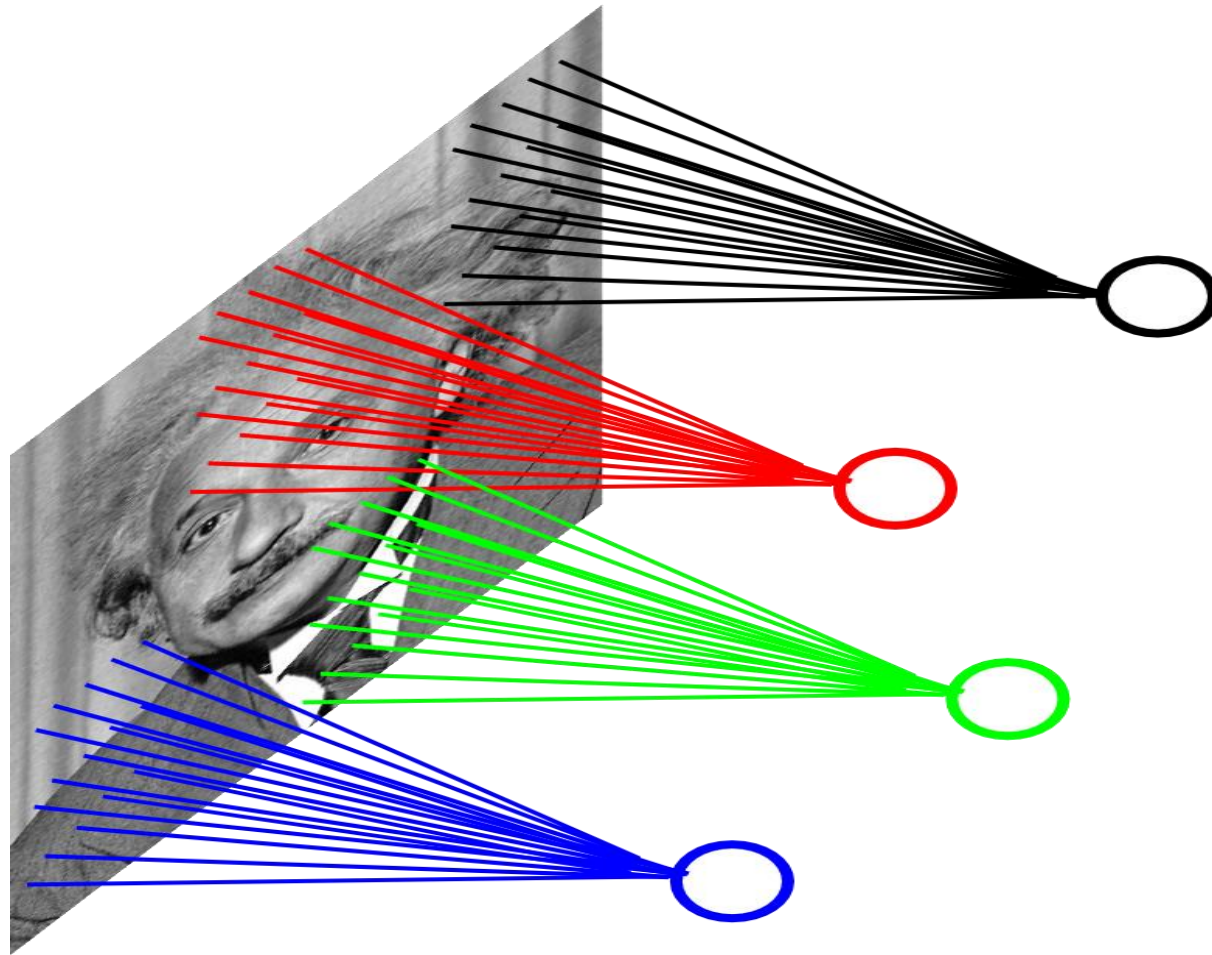


Exemplo: Imagem  $200 \times 200$

40K Neurônios

Filtro  $10 \times 10$

# Camada Conectada Localmente em Imagens



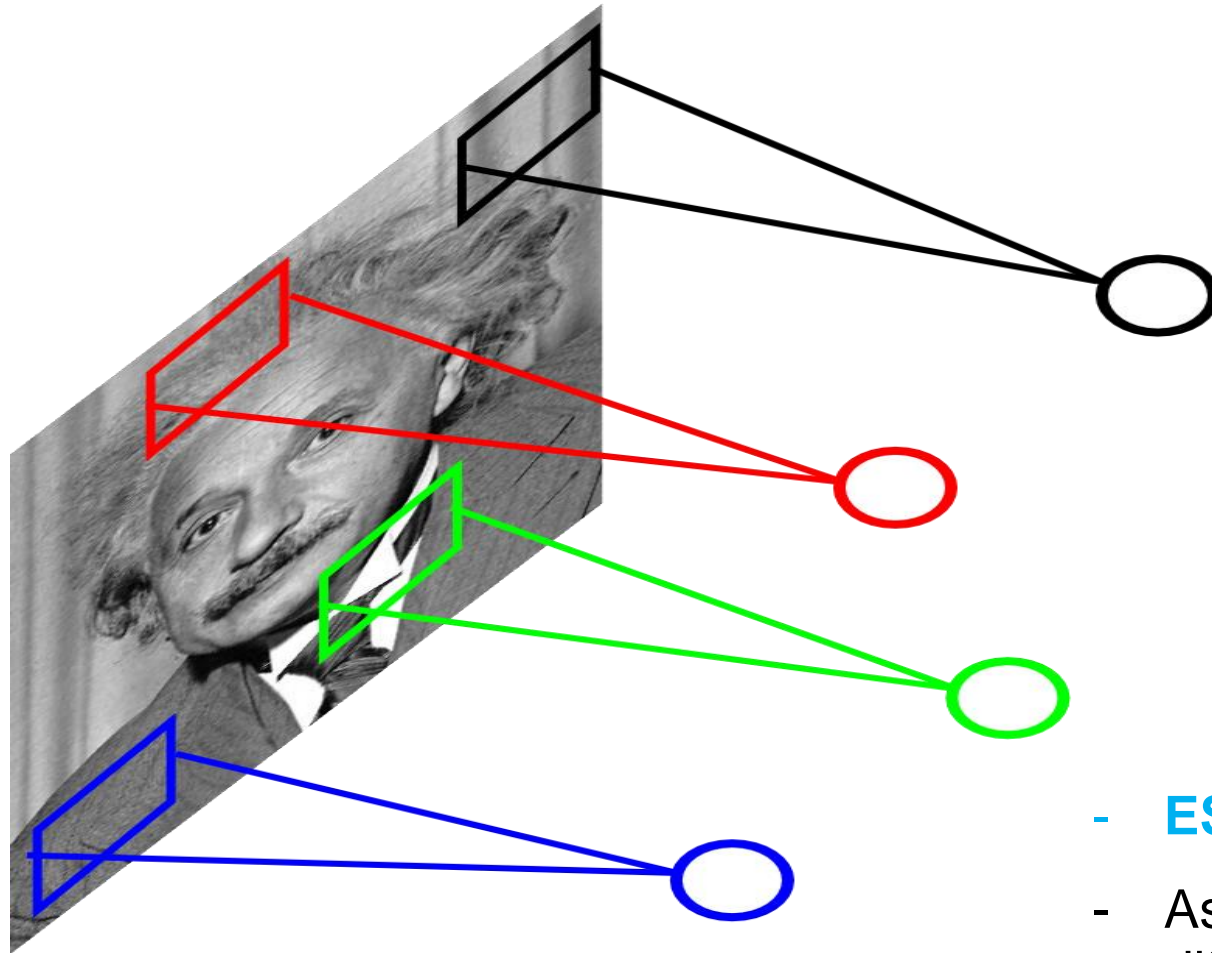
Exemplo: Imagem  $200 \times 200$

40K Neurônios

Filtro  $10 \times 10$

➡ ~4M parâmetros !!!

# Camada Conectada Localmente em Imagens



Exemplo: Imagem  $200 \times 200$

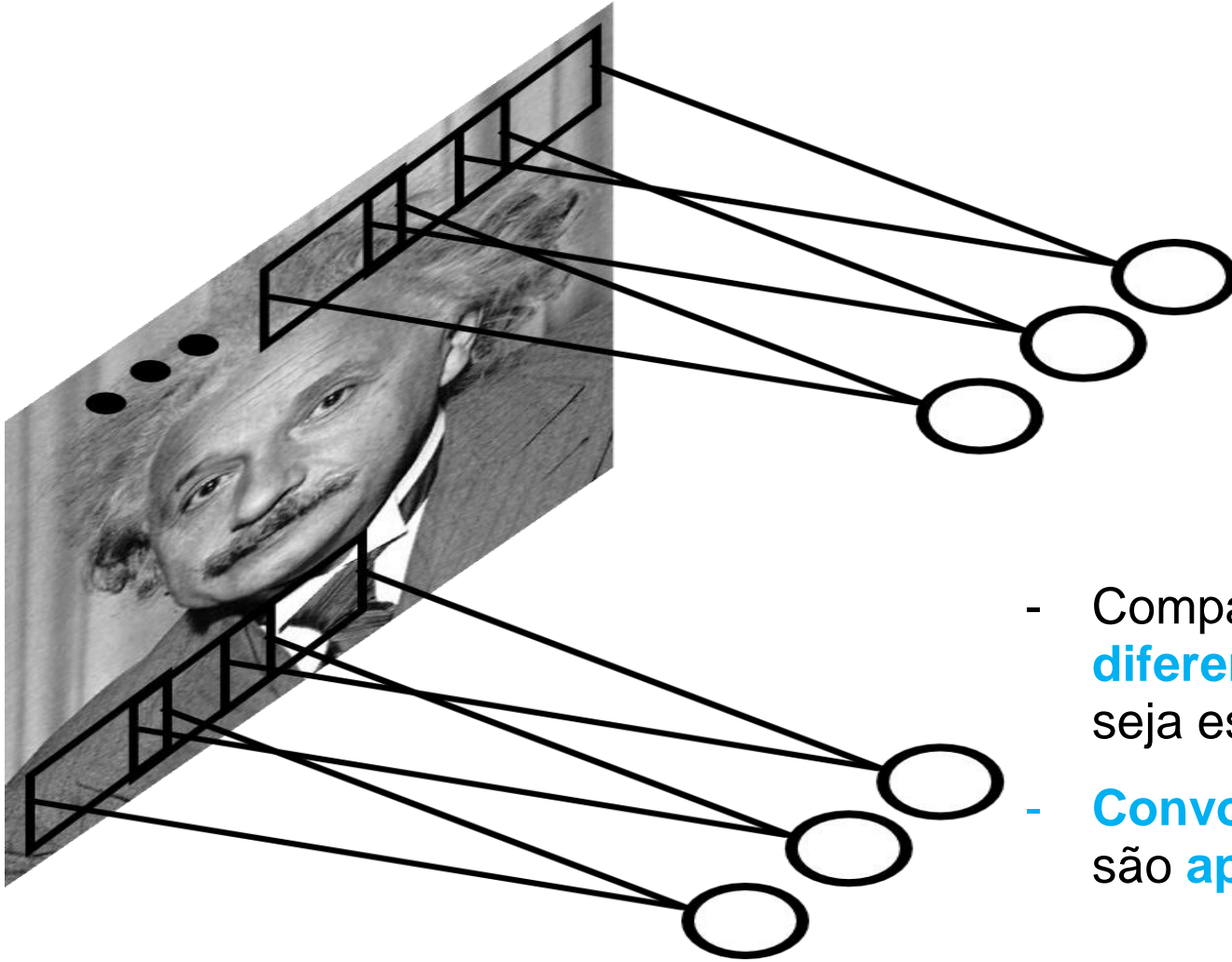
40K Neurônios

Filtro  $10 \times 10$

➡ ~4M parâmetros !!!

- **ESTACIONARIEDADE** . . .
- As estatísticas são semelhantes em locais diferentes

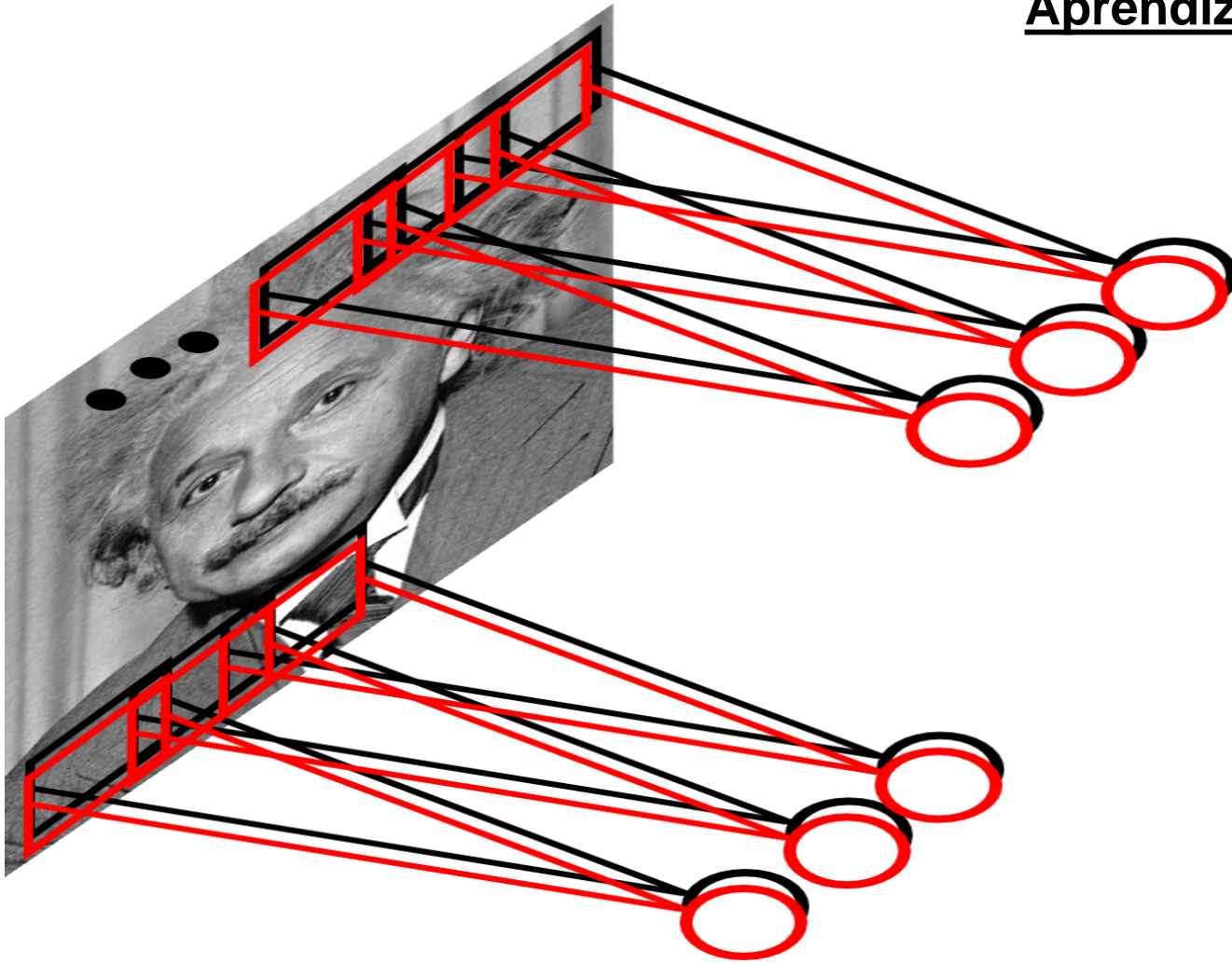
# Camada Convolutiva



- Compartilhar os **mesmos parâmetros em diferentes locais** (supondo que a entrada seja estacionária)
- **Convoluções com filtros** (ou *kernels*) que são **aprendidos**

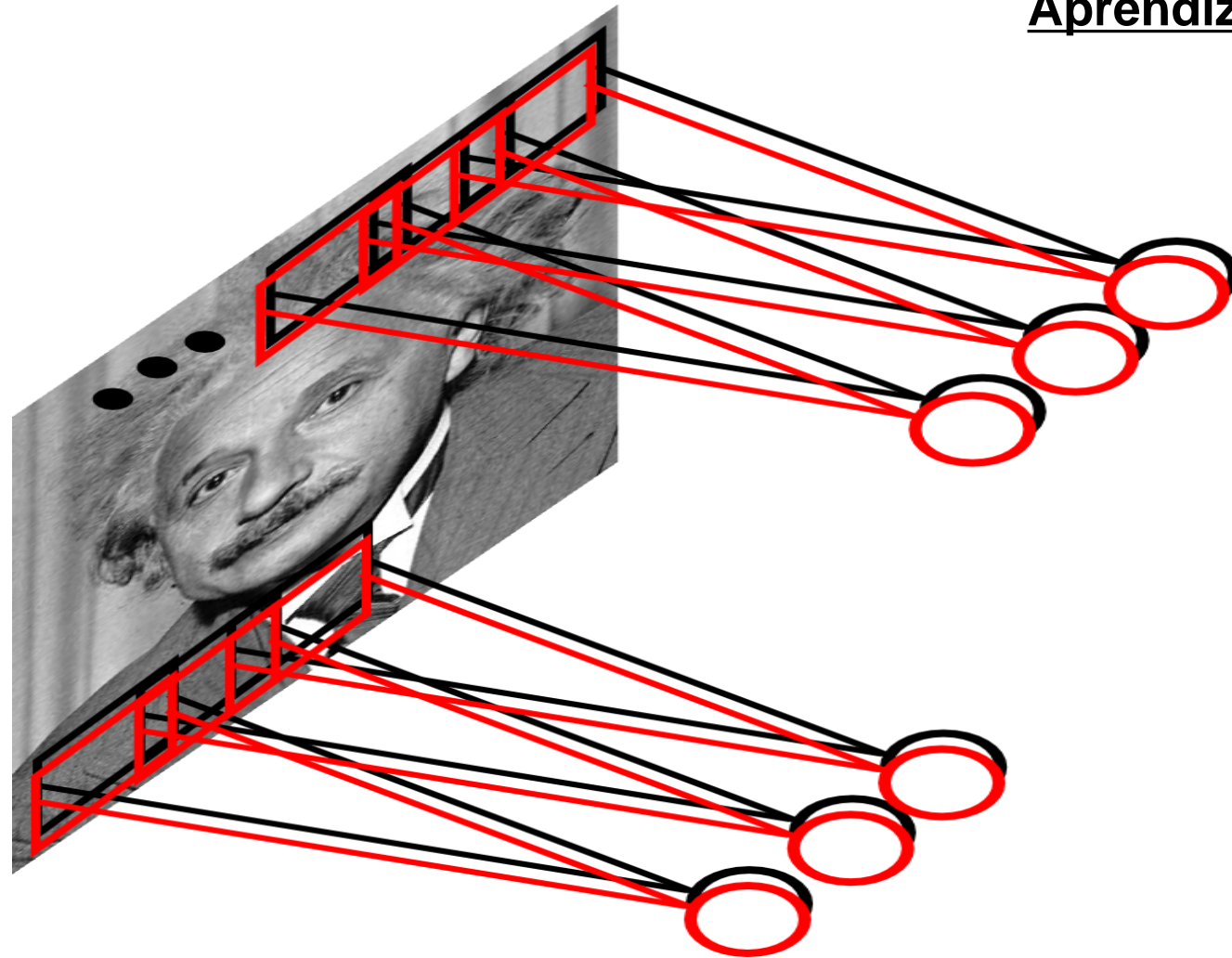
# Camada Convolutucional

Aprendizado de **múltiplos filtros !!!**





# Camada Convolucional



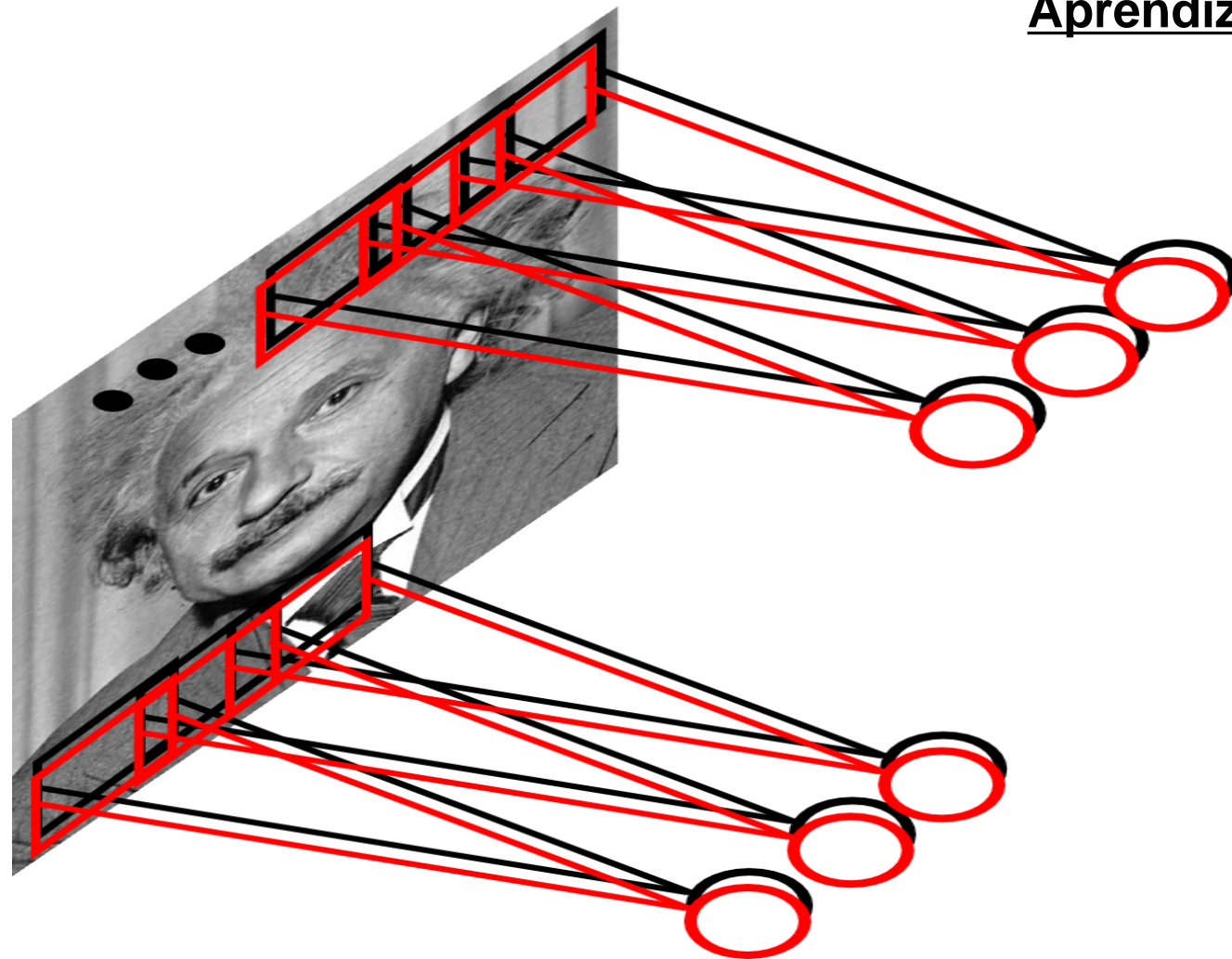
Aprendizado de **múltiplos filtros !!!**

Exemplo: Imagem  $200 \times 200$

100 Filtros

Filtro  $10 \times 10$

# Camada Convolutucional



Aprendizado de **múltiplos filtros !!!**

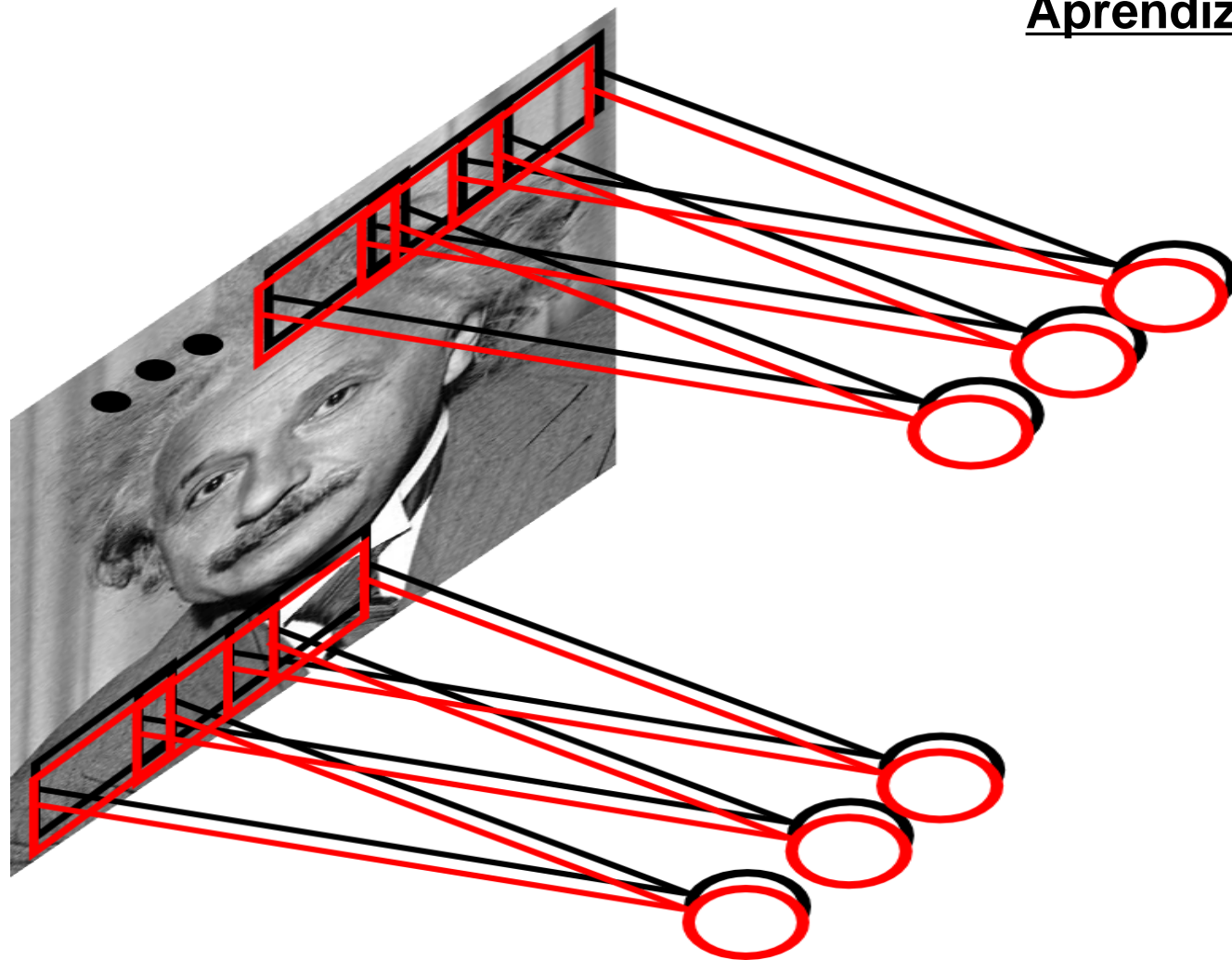
Exemplo: Imagem  $200 \times 200$

100 Filtros

Filtro  $10 \times 10$

**➡ ~10K parâmetros !!!**

# Camada Convolutiva



Aprendizado de **múltiplos filtros !!!**

Exemplo: Imagem  $200 \times 200$

100 Filtros

Filtro  $10 \times 10$

➡ **~10K parâmetros !!!**

