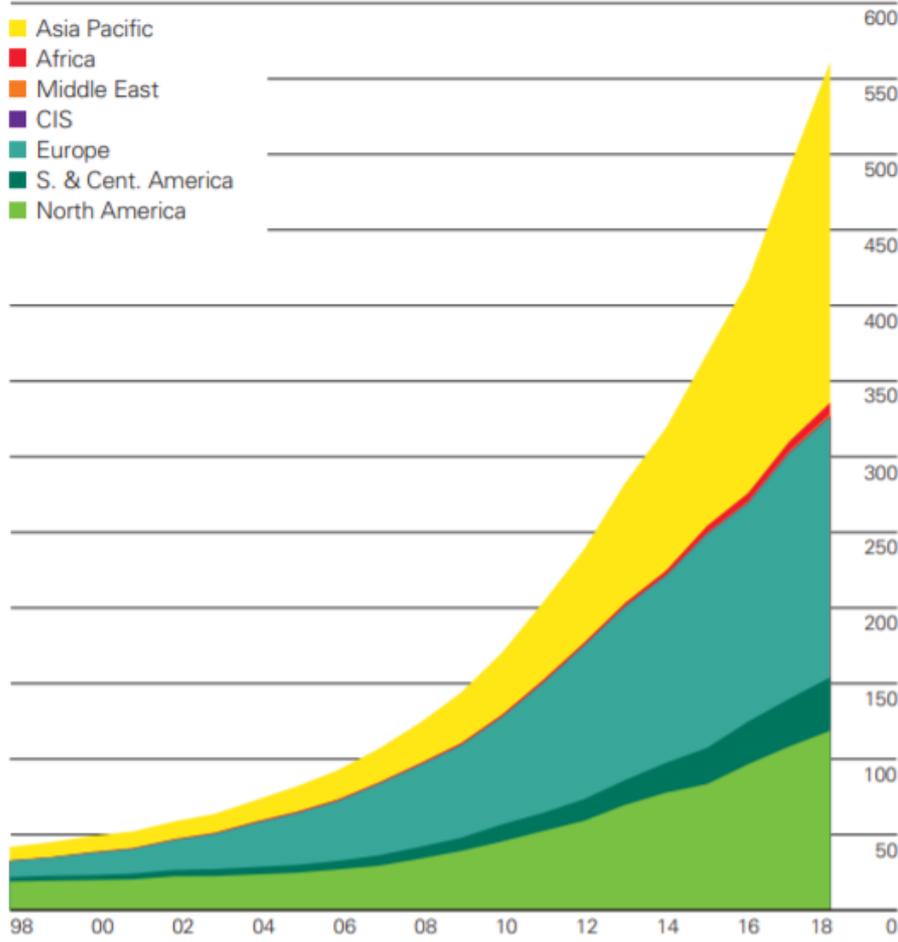


# Energia eólica

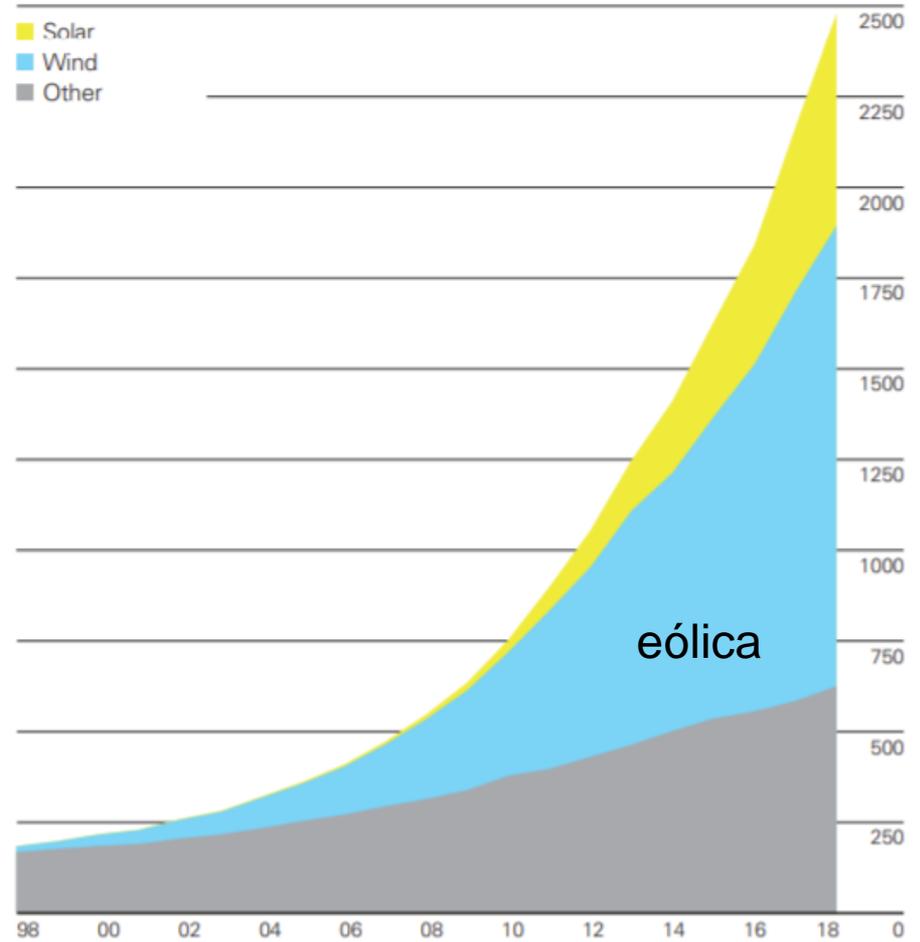
## Renewables consumption by region

Million tonnes oil equivalent



## Renewables generation by source

Terawatt-hours



## Renewable energy: Generation by source\*

Terawatt-hours									2018 Growth rate			
	Wind	Solar	Other renewables†	2017 Total	Wind	Solar	Other renewables†	2018 Total	Wind	Solar	Other renewables†	Total
Canada	29.1	3.3	9.7	42.1	32.2	3.5	9.6	45.3	10.7%	7.7%	-1.4%	7.7%
Mexico	10.6	1.2	7.3	19.1	12.6	2.2	6.5	21.4	18.9%	89.0%	-11.5%	11.6%
US	256.9	78.1	82.8	417.8	277.7	97.1	83.7	458.5	8.1%	24.4%	1.0%	9.8%
<b>Total North America</b>	<b>296.6</b>	<b>82.5</b>	<b>99.9</b>	<b>479.0</b>	<b>322.5</b>	<b>102.9</b>	<b>99.7</b>	<b>525.2</b>	<b>8.8%</b>	<b>24.7%</b>	<b>-0.1%</b>	<b>9.6%</b>
Argentina	0.6	†	2.4	3.0	1.4	0.1	2.3	3.8	131.0%	558.6%	-3.6%	26.8%
Brazil	42.4	0.8	51.3	94.5	48.5	3.1	52.9	104.5	14.4%	277.1%	3.2%	10.6%
Chile	3.6	3.9	6.9	14.5	3.7	5.1	6.7	15.5	1.7%	31.4%	-2.8%	7.6%
Colombia	†	-	2.0	2.0	†	†	2.1	2.1	1314.2%	-	4.9%	7.5%
Ecuador	0.1	†	0.4	0.5	0.1	†	0.4	0.5	9.3%	1.4%	-0.7%	0.8%
Peru	1.1	0.3	0.6	1.9	1.5	0.7	0.7	2.9	39.1%	159.5%	16.8%	50.3%
Trinidad & Tobago	-	†	-	†	-	†	-	†	-	-	-	-
Venezuela	-	†	-	†	-	†	-	†	-	-	-	-
Other S. & Cent. America	8.4	2.4	12.2	22.9	10.7	3.3	12.9	26.8	27.4%	37.3%	5.9%	17.0%
<b>Total S. &amp; Cent. America</b>	<b>56.1</b>	<b>7.5</b>	<b>75.8</b>	<b>139.4</b>	<b>65.9</b>	<b>12.4</b>	<b>78.0</b>	<b>156.3</b>	<b>17.3%</b>	<b>66.7%</b>	<b>3.0%</b>	<b>12.2%</b>
Austria	6.6	1.3	4.6	12.5	5.9	1.6	4.8	12.2	-10.3%	24.4%	2.6%	-1.9%
Belgium	6.5	3.3	5.8	15.6	7.5	4.0	5.4	16.9	14.7%	20.8%	-5.8%	8.4%
Czech Republic	0.6	2.2	5.0	7.7	0.6	2.3	4.7	7.7	3.1%	6.6%	-4.8%	-0.9%
Finland	4.8	†	11.8	16.7	5.9	0.2	12.9	18.9	22.1%	272.0%	8.6%	13.2%
France	24.3	9.2	8.0	41.5	28.2	10.2	8.5	46.8	15.8%	10.9%	6.6%	13.0%
Germany	105.7	39.4	51.1	196.2	111.6	46.2	51.4	209.2	5.6%	17.2%	0.7%	6.6%
Greece	5.5	4.0	0.3	9.8	6.3	3.8	0.3	10.4	13.8%	-5.0%	-3.8%	5.6%
Hungary	0.8	0.3	2.1	3.2	0.6	0.6	2.4	3.6	-19.8%	68.7%	10.8%	9.9%
Italy	17.7	24.4	25.6	67.7	17.5	23.2	25.3	66.0	-1.5%	-4.7%	-1.0%	-2.5%
Netherlands	10.6	2.2	4.6	17.4	10.5	3.2	4.9	18.6	-0.2%	45.2%	6.0%	7.2%
Norway	2.9	†	0.2	3.1	3.9	0.1	0.2	4.1	35.8%	58.2%	-15.1%	32.7%
Poland	14.9	0.2	6.5	21.6	12.8	0.3	6.3	19.5	-13.8%	81.2%	-2.4%	-9.7%
Portugal	12.2	1.0	3.4	16.7	12.7	1.0	3.4	17.1	3.3%	2.8%	0.1%	2.6%
Romania	7.4	1.9	0.5	9.8	6.5	1.7	0.5	8.6	-12.3%	-9.8%	-12.1%	-11.8%
Spain	49.1	14.3	6.1	69.5	50.8	12.5	7.4	70.7	3.5%	-12.6%	21.4%	1.7%
Sweden	17.6	0.2	12.1	29.9	16.8	0.4	11.9	29.0	-4.5%	62.2%	-1.8%	-2.9%
Switzerland	0.1	1.7	1.8	3.7	0.1	2.0	2.0	4.1	-	16.3%	7.4%	11.2%
Turkey	17.9	2.9	8.3	29.0	19.8	7.9	10.0	37.7	10.7%	173.1%	21.0%	29.8%
Ukraine	1.0	0.8	0.2	1.9	1.1	1.3	0.2	2.6	15.7%	69.7%	33.7%	38.8%
United Kingdom	50.0	11.5	31.9	93.4	57.1	12.9	35.6	105.6	14.2%	12.1%	11.7%	13.1%
Other Europe	0.3	0.4	0.2	0.9	0.5	0.4	0.2	1.2	80.8%	14.8%	18.3%	37.8%
<b>Total Europe</b>	<b>384.3</b>	<b>124.5</b>	<b>208.2</b>	<b>717.1</b>	<b>404.4</b>	<b>139.1</b>	<b>217.6</b>	<b>761.1</b>	<b>5.2%</b>	<b>11.7%</b>	<b>4.5%</b>	<b>6.1%</b>
Azerbaijan	†	†	0.1	0.1	0.1	†	0.1	0.2	271.9%	5.5%	-4.8%	40.2%
Belarus	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.4	21.6%	51.1%	3.0%	23.8%
Kazakhstan	0.3	0.1	-	0.4	0.5	0.1	†	0.7	64.0%	27.9%	-	56.8%
Russian Federation	0.1	0.5	0.5	1.1	0.2	0.6	0.5	1.3	62.4%	6.9%	-0.9%	10.5%
Turkmenistan	-	†	-	†	-	†	-	†	-	-	-	-
Uzbekistan	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Other CIS	†	†	†	†	†	†	†	†	-2.5%	46.3%	-	11.2%

# Potencial eólico global (altura = 10 m)

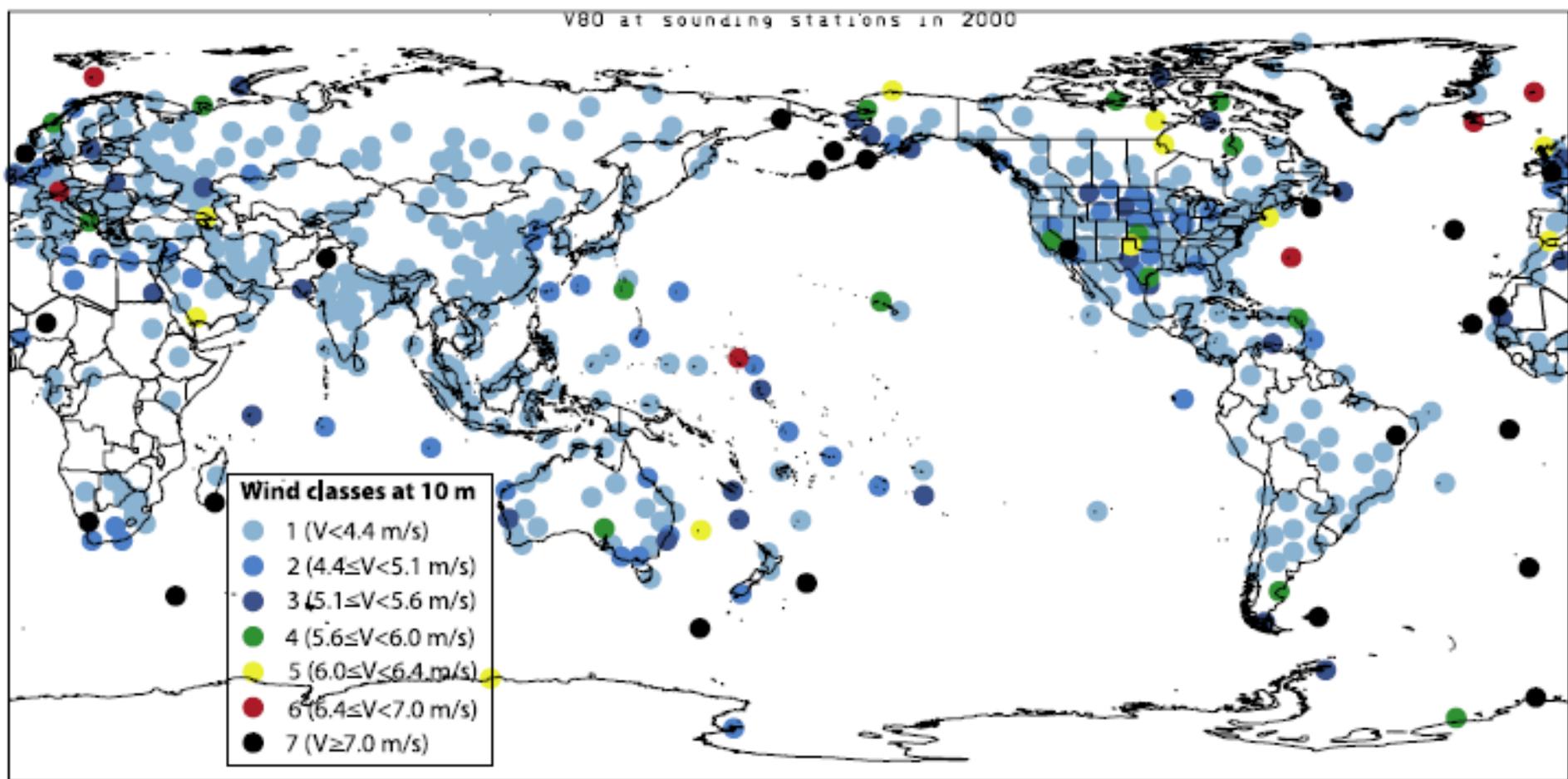
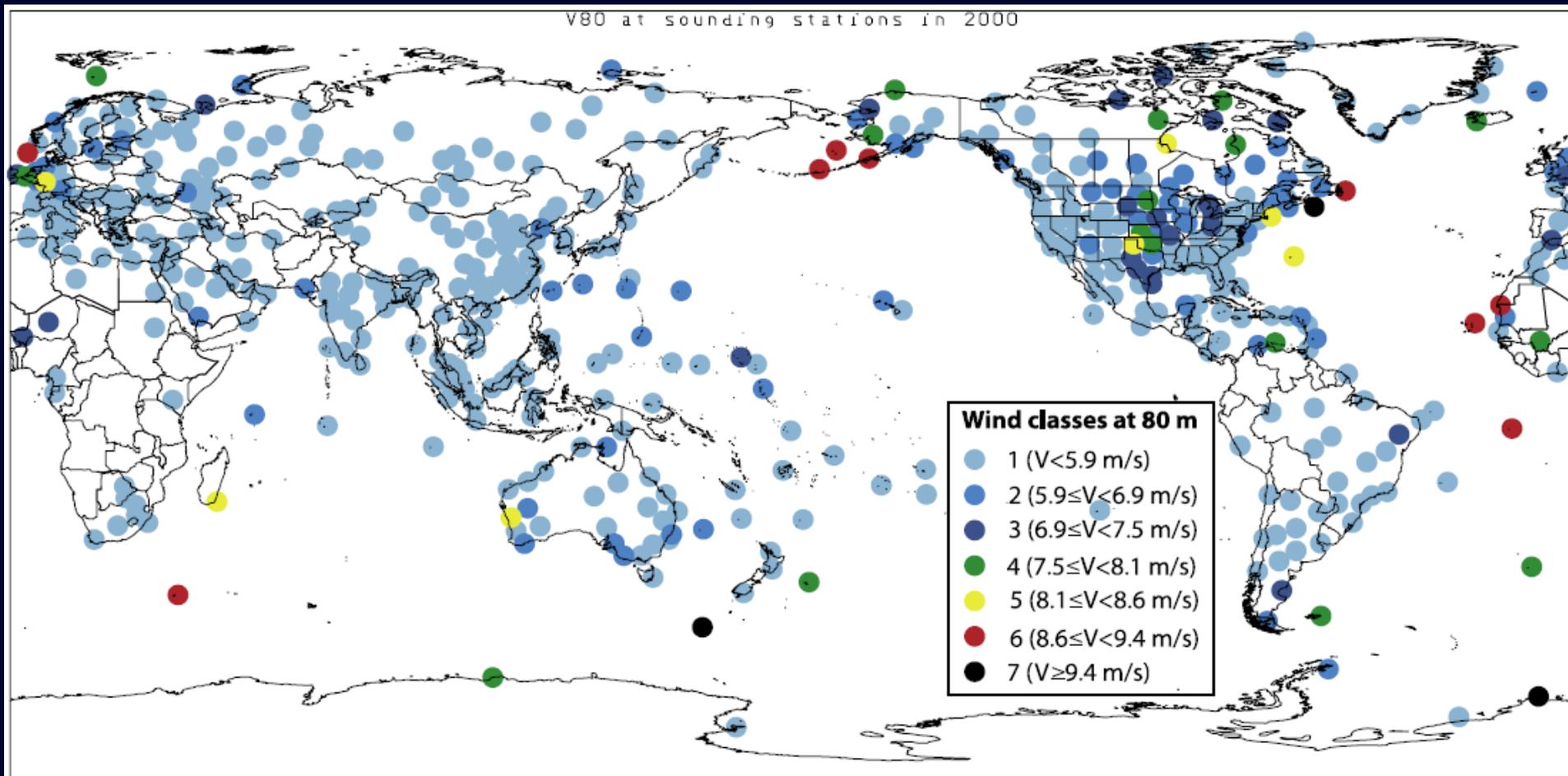
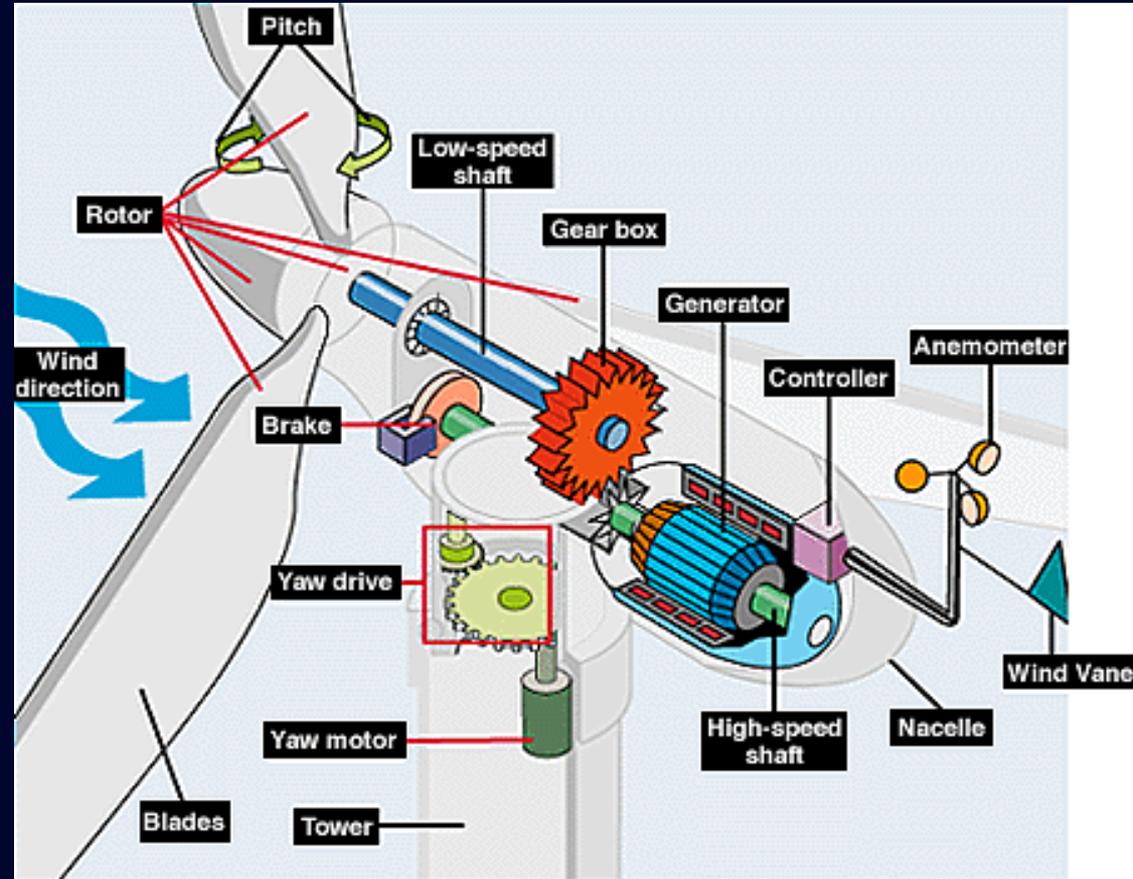
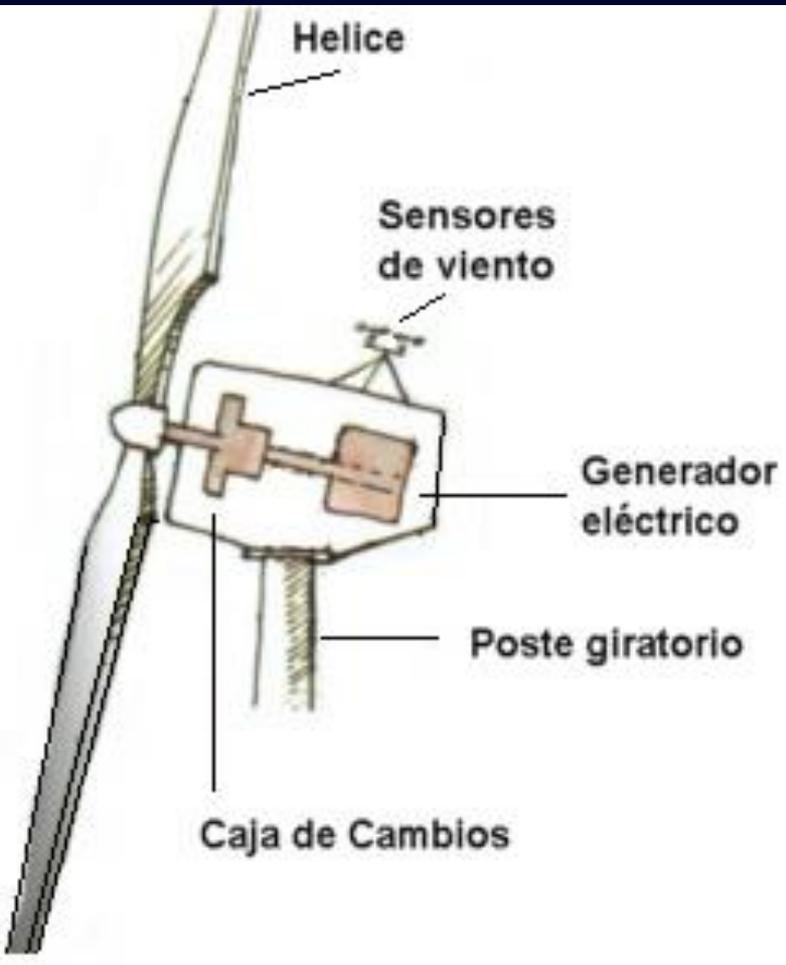


Figure 3. Same as Figure 2, but for observed wind speed at 10 m.

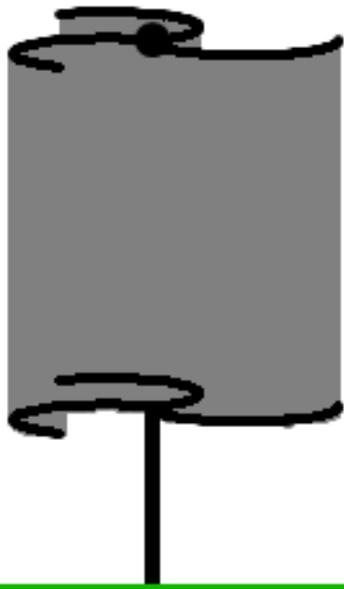
# Potencial eólico global (altura = 80 m)



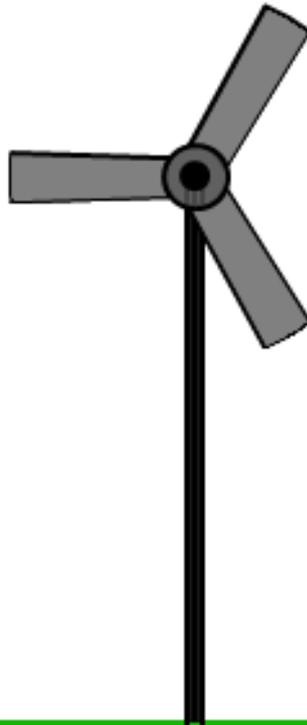
# Geração de energia elétrica – Turbina de vento



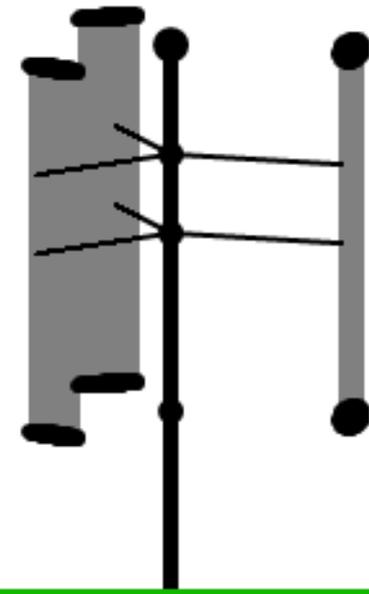
# Turbinas de viento



Savonius VAWT



Modern HAWT



Giromill/Darrieus VAWT

# Energia

Energia (E) de um fluxo de ar que passa pela área A:

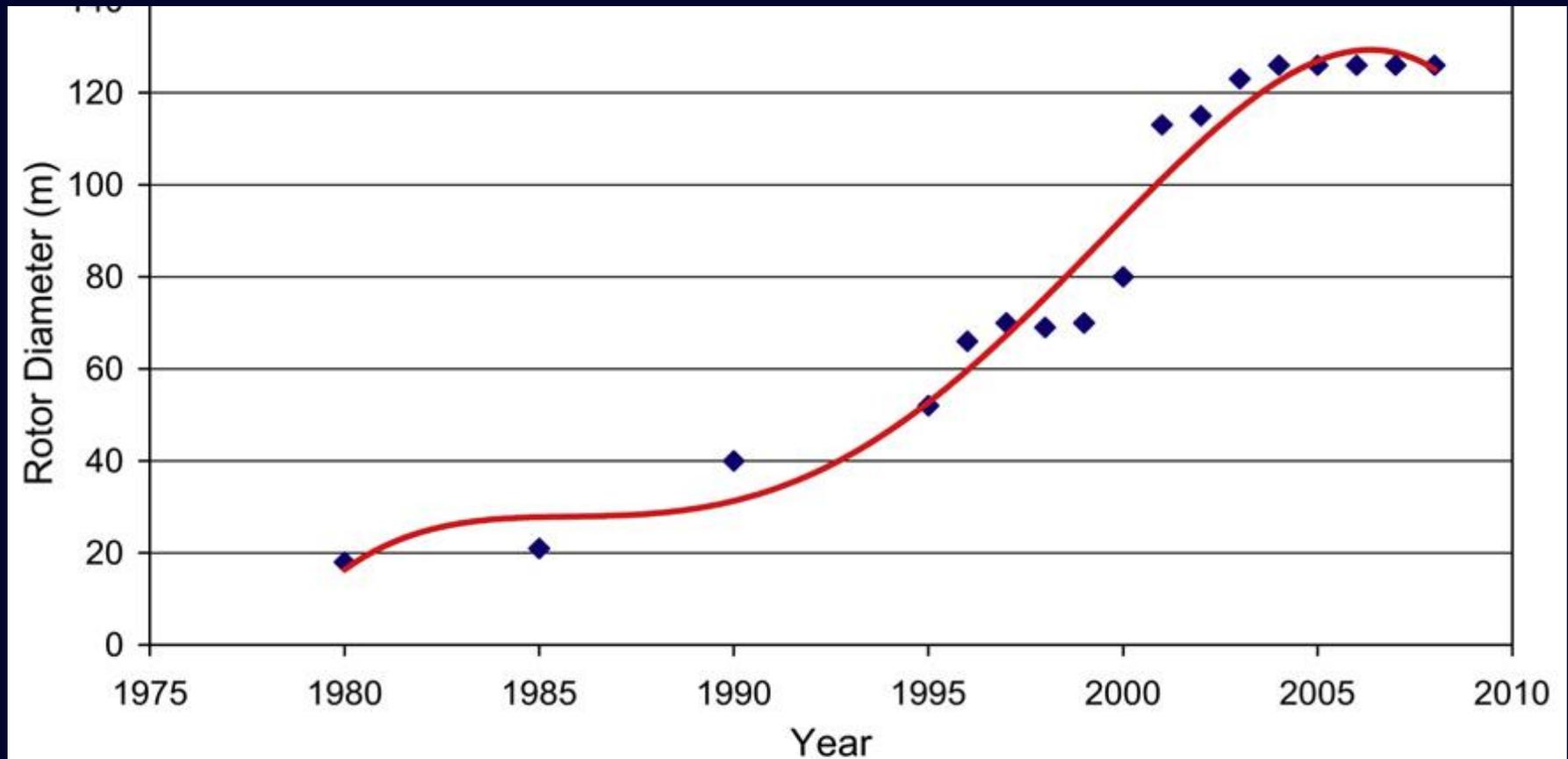
$$E = \frac{A \cdot t \cdot \rho \cdot v^3}{2}$$

v: velocidade do vento

t: tempo

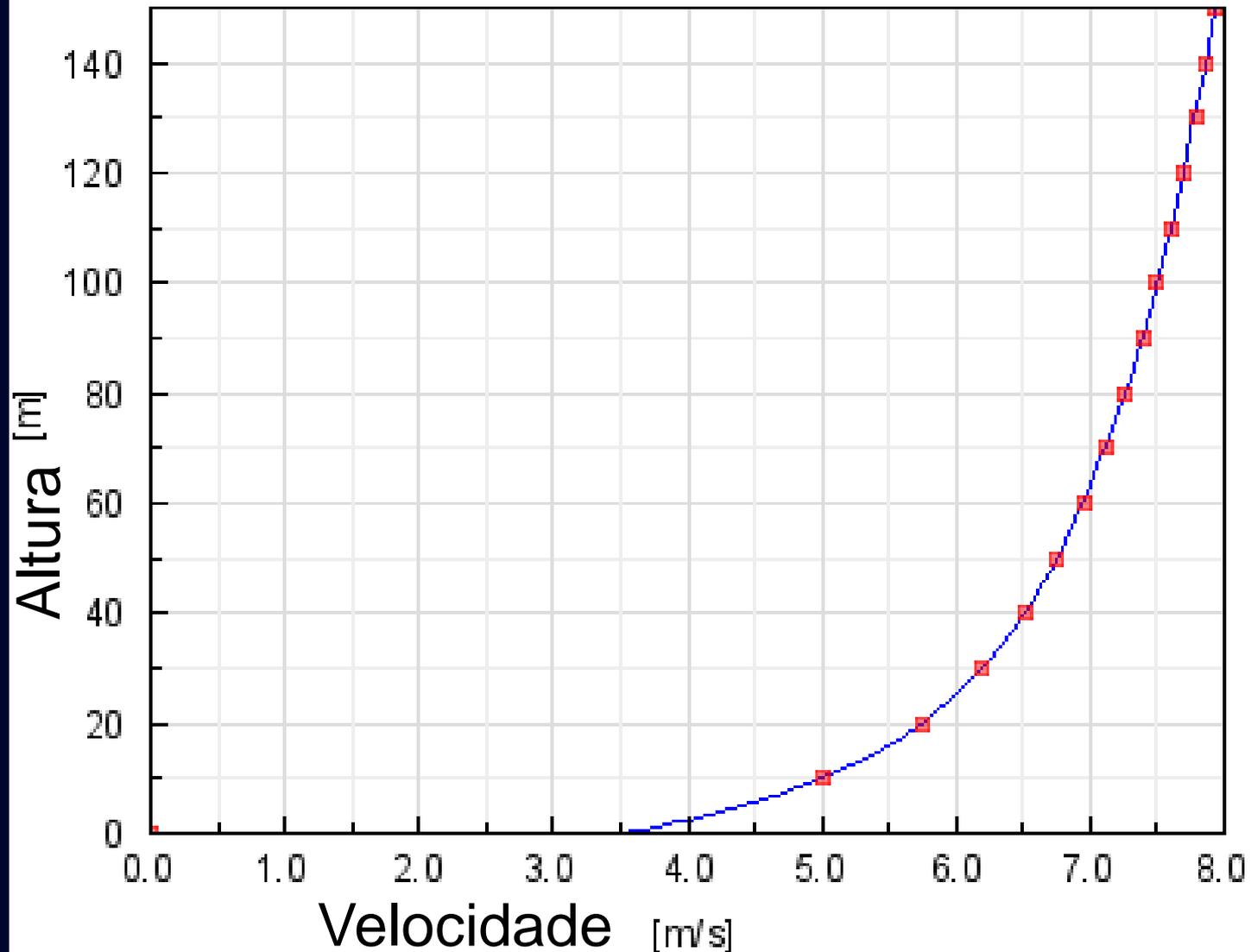
$\rho$ : densidade do ar

# Diâmetro das turbinas

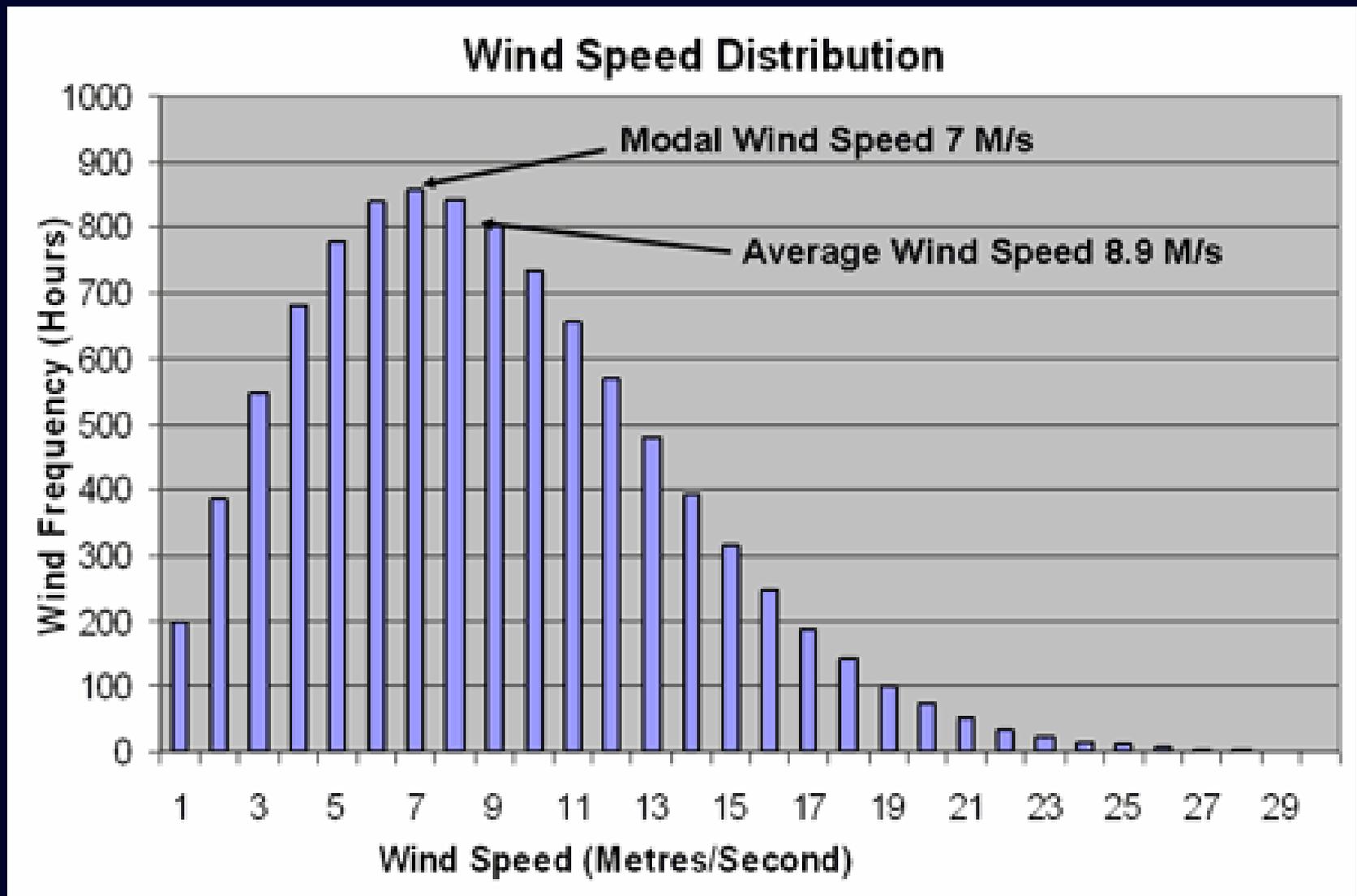


	<i>WT</i>	<i>MW</i>	<i>Rotor (m)</i>
--	-----------	-----------	------------------

# Perfil da velocidade do vento ( $E \cong V^3$ )



# Distribuição da velocidade do vento



Distribuições de Weibull e Rayleigh

# Fator de capacidade

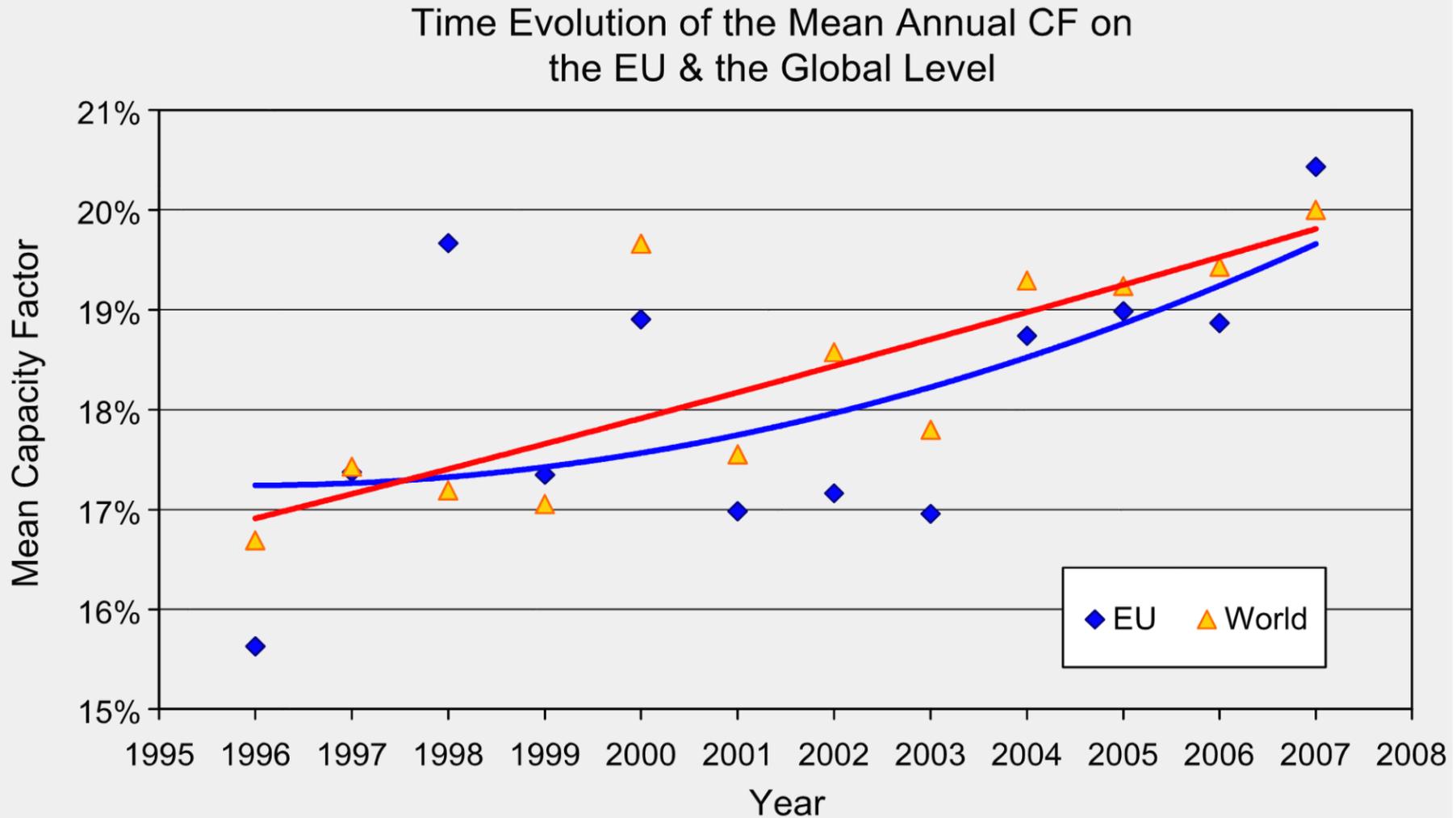
- Energia efetivamente produzida em relação à produção máxima da turbina

- Ex. A produção máxima de uma turbina de 2 MW em 1 ano seria:

$$2 \times 24 \times 365 = 17520 \text{ MWh}$$

Porém, com fator de capacidade de 30%, a produção real é  $2 \times 0,3 \times 24 \times 365 = 5256 \text{ MWh}$

# Fator de capacidade



# Fator de capacidade

- Turbinas de vento modernas 10-30%
- Usinas termonucleares 80-90%
- Belo Monte 40%
- Itaipu 61%

# Intermitência

- Variabilidade de curto período de tempo (horas e dias) torna geração intermitente
- Picos de velocidade do vento podem não coincidir com picos da demanda
- Geração combinada. Ex. Armazenamento de energia por bombeamento de água para reservatório



# “Fazendas de vento” (*wind farms*)

- Onshore (Terrestre)
- Offshore (Oceânica)

# “Roscoe wind farm” (Texas, EUA)

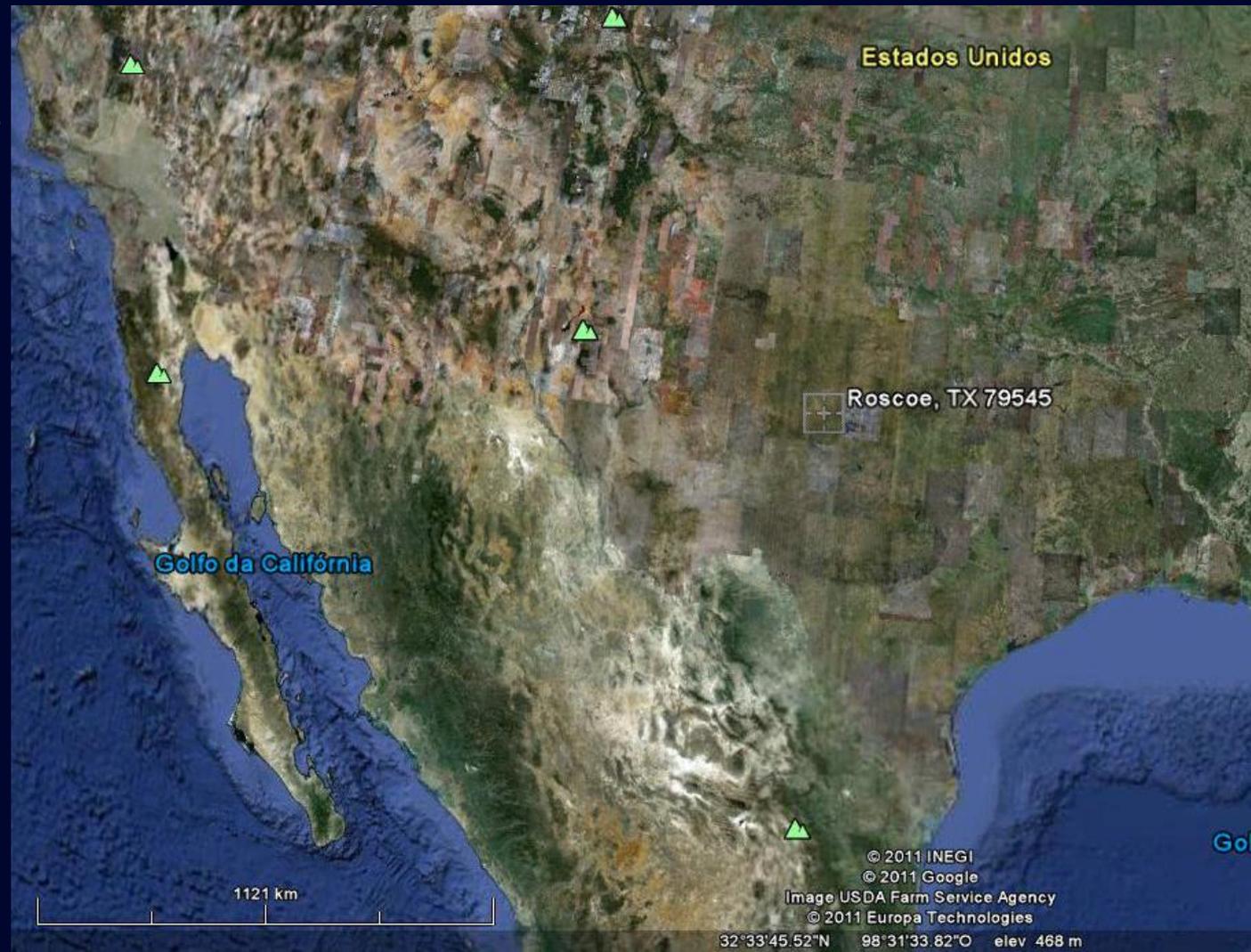
627 Turbinas

Capacidade instalada 781.5 MW

Área 400km<sup>2</sup>

Custo US\$1-2 bilhões

400 propriedades rurais



# *Roscoe wind farm*



# *Roscoe wind farm*



# Thanet wind farm (Inglaterra, offshore)

Capacidade instalada 300MW

Fator de capacidade ~30%

11 km da costa, 20-25 m prof.

Custo US\$1,2-1,4 bilhões



UNITED  
KINGDOM



London

Kent

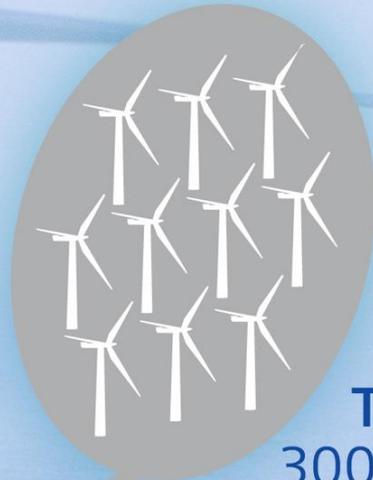
Hastings



Richborough  
132 kV



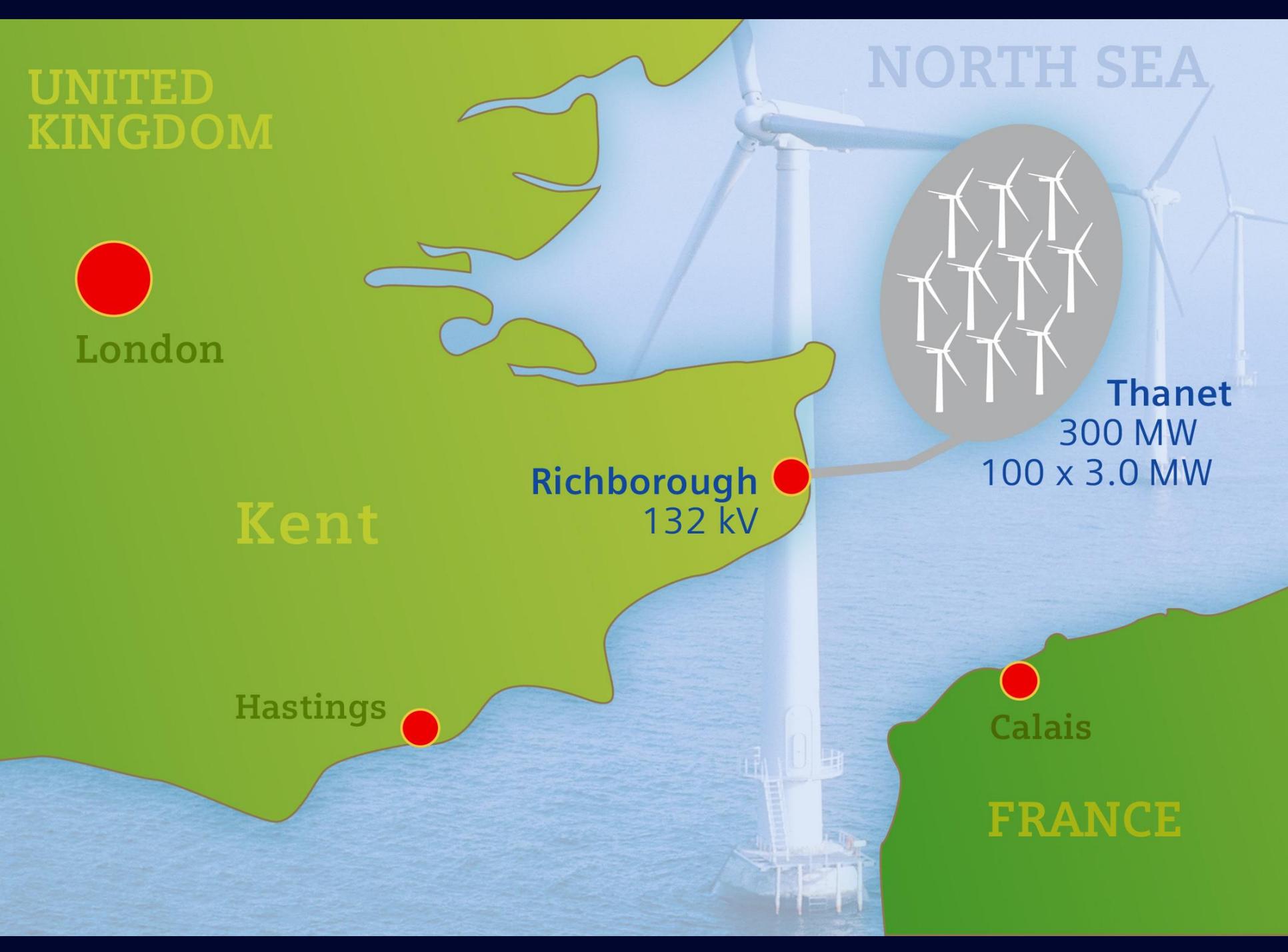
NORTH SEA



Thanet  
300 MW  
100 x 3.0 MW

Calais

FRANCE



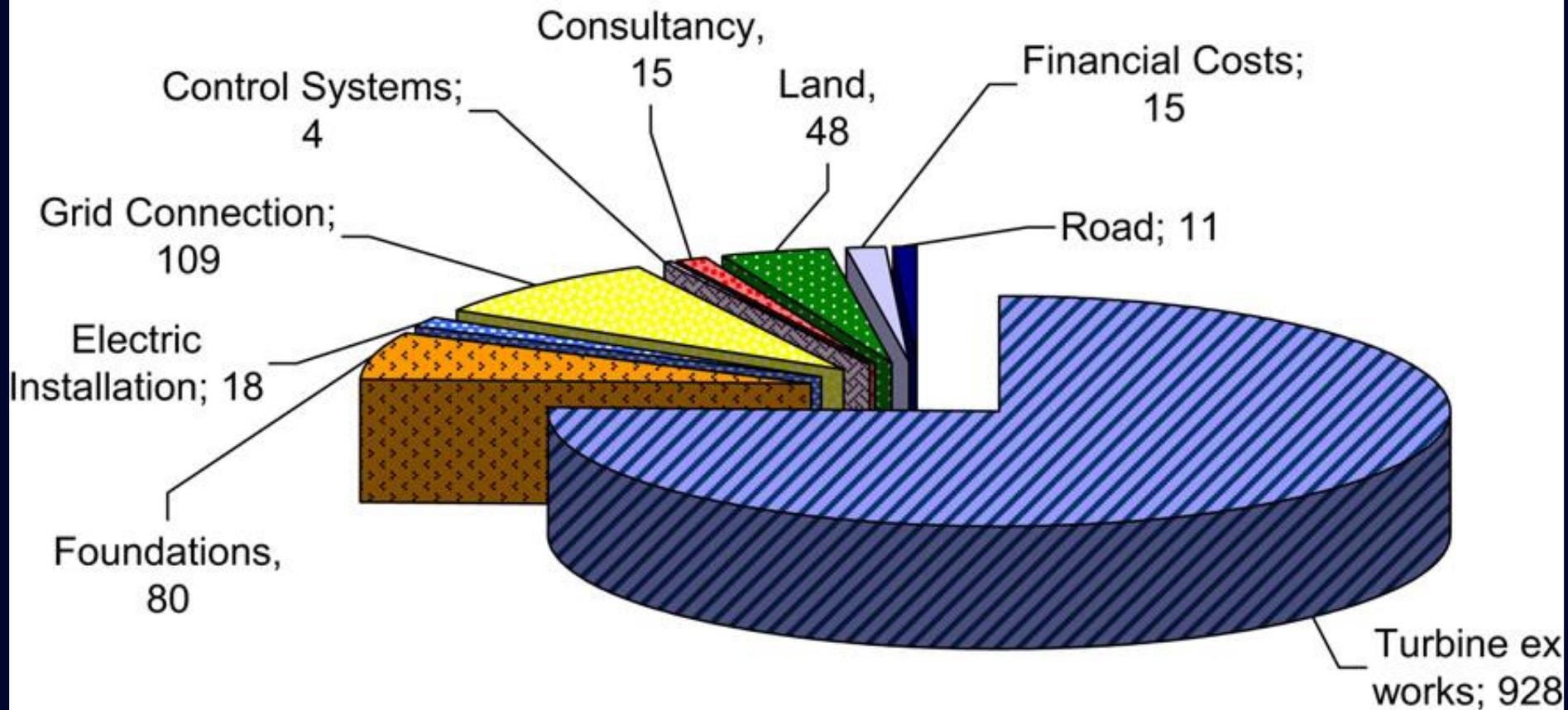
# *Thanet wind farm*



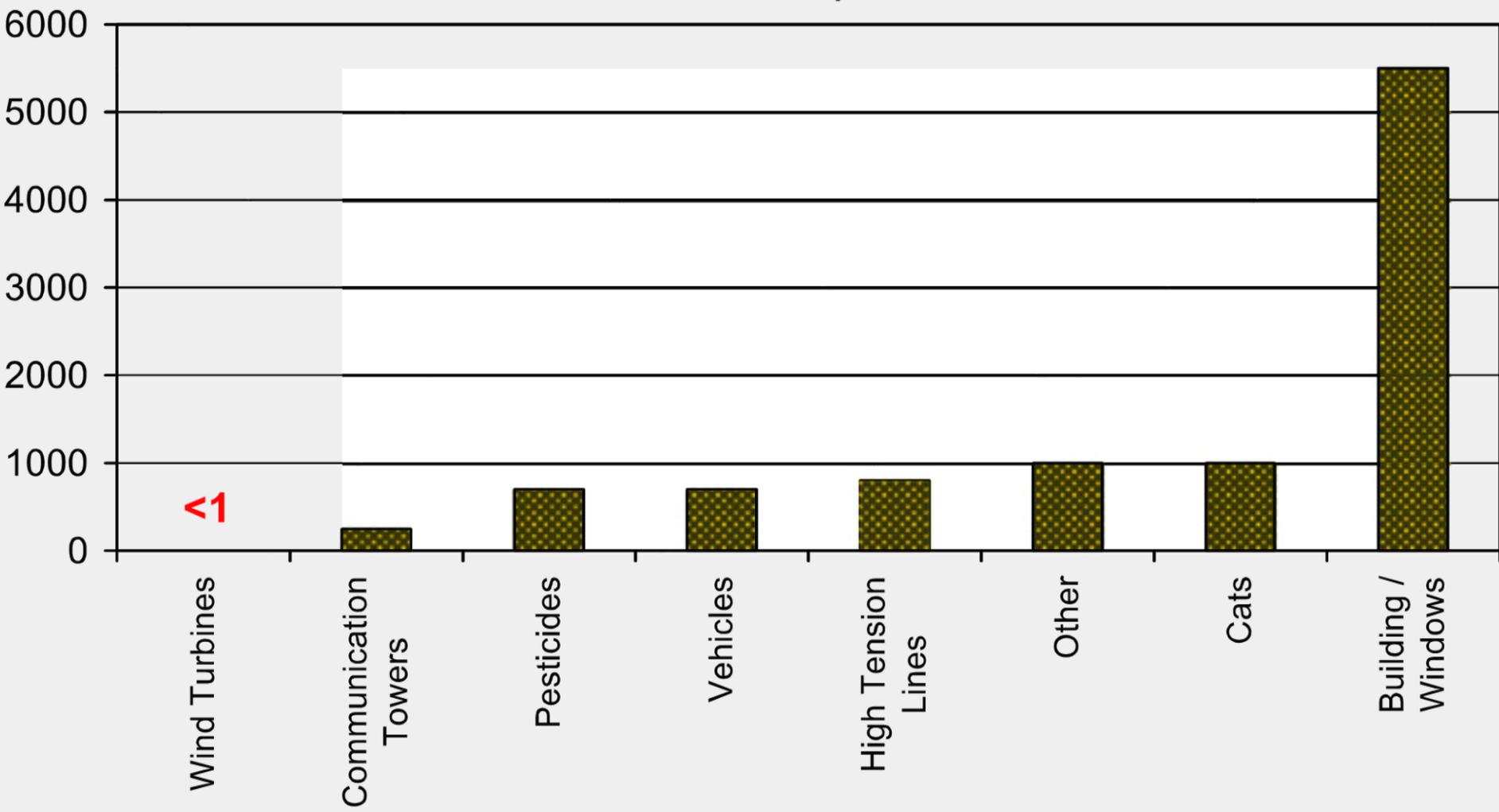


# Custo

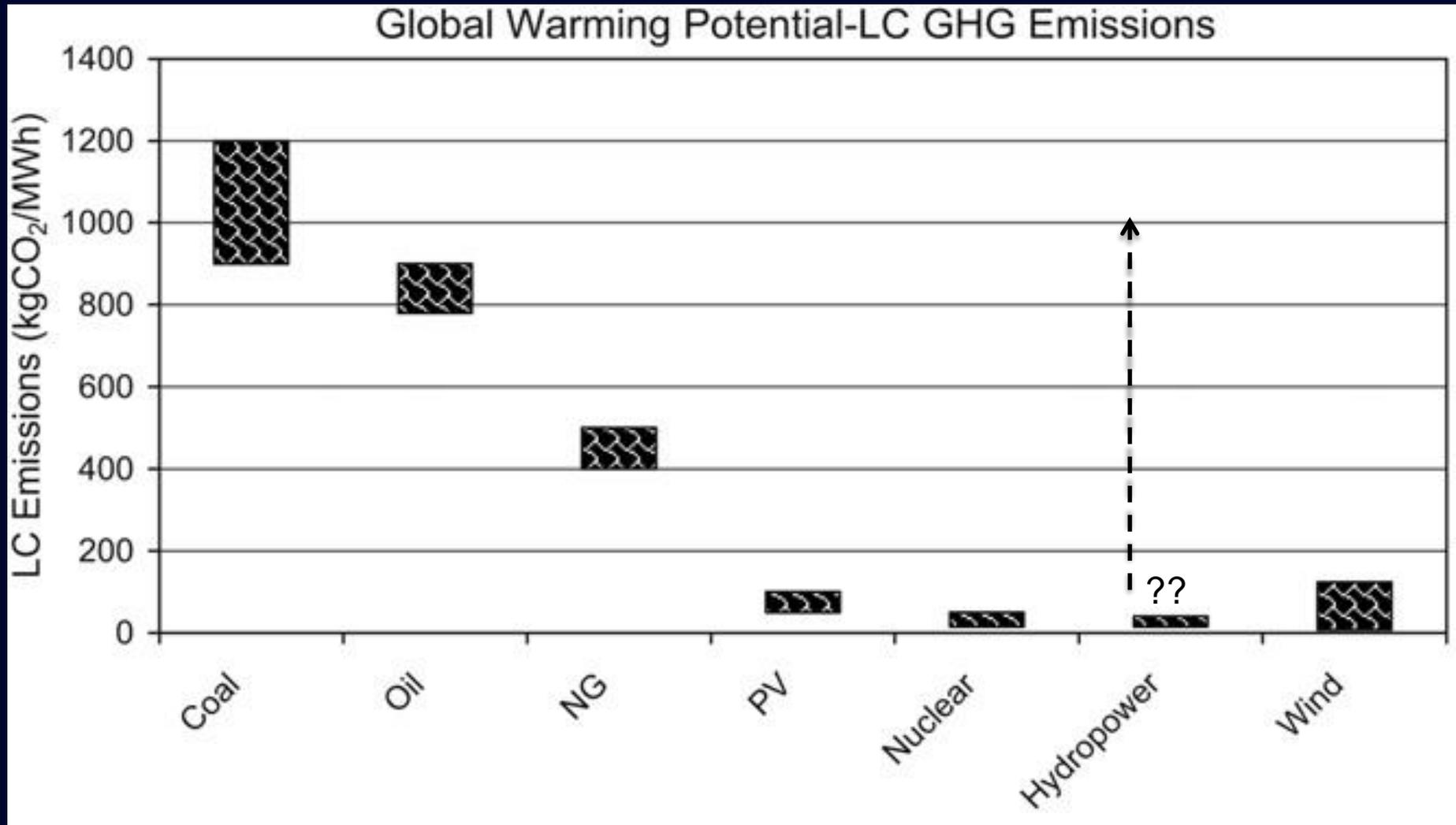
Investment Cost Breakdown for the Installation of a Typical Onshore Wind Park (Euros/kW)



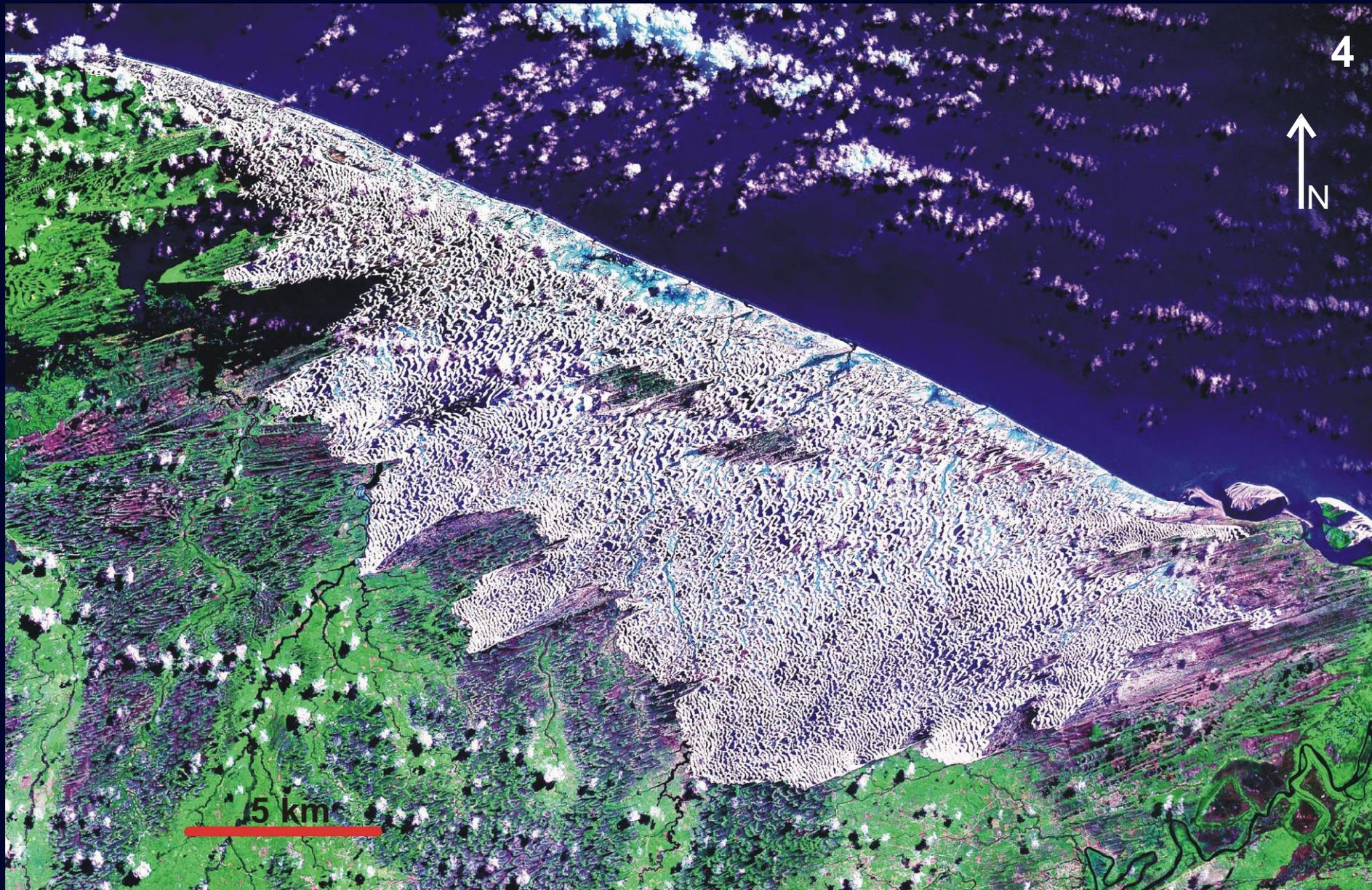
# Causes of Bird Fatalities per 10,000 Fatalities



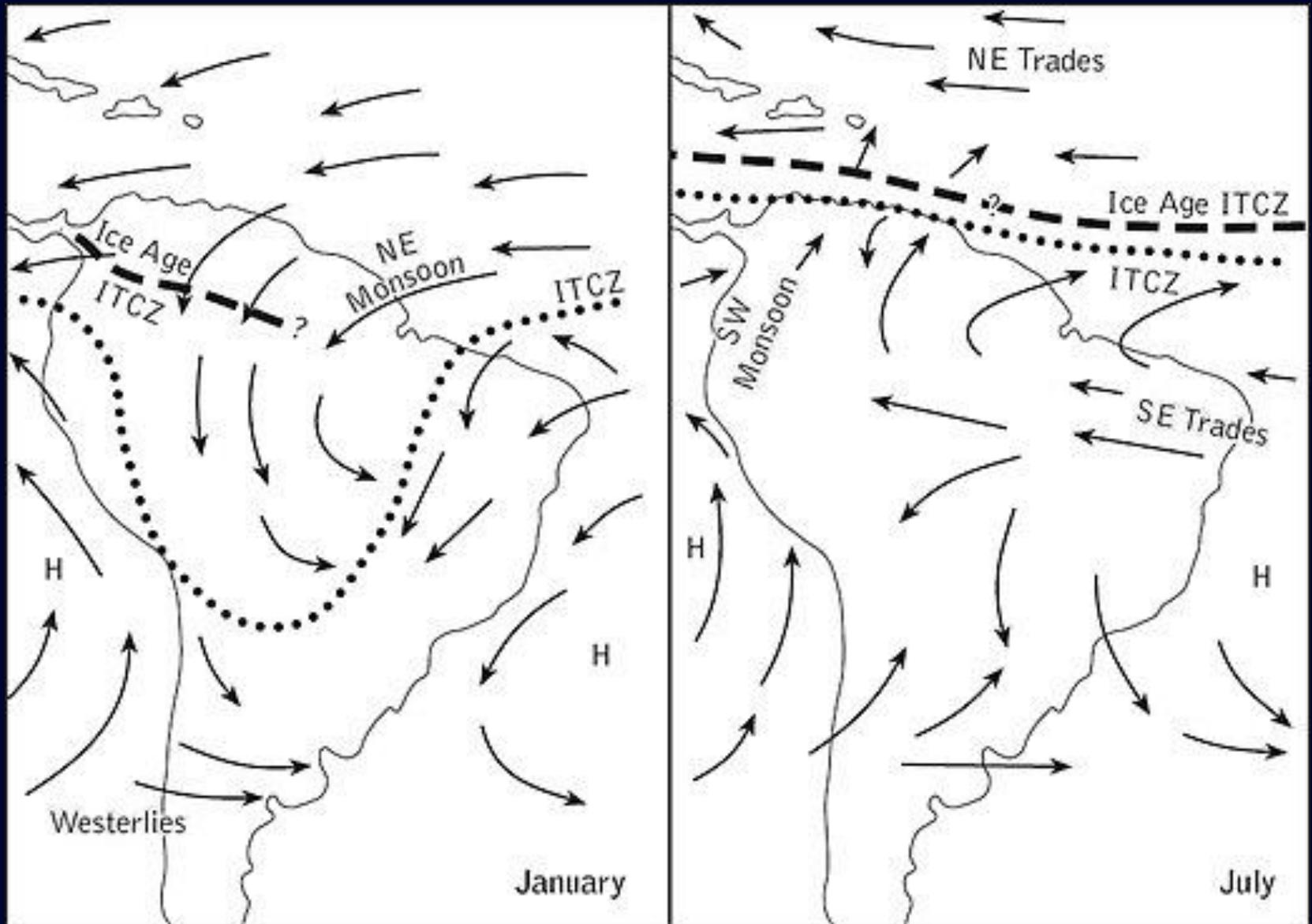
# Emissão de CO<sub>2</sub>



# Potencial eólico brasileiro

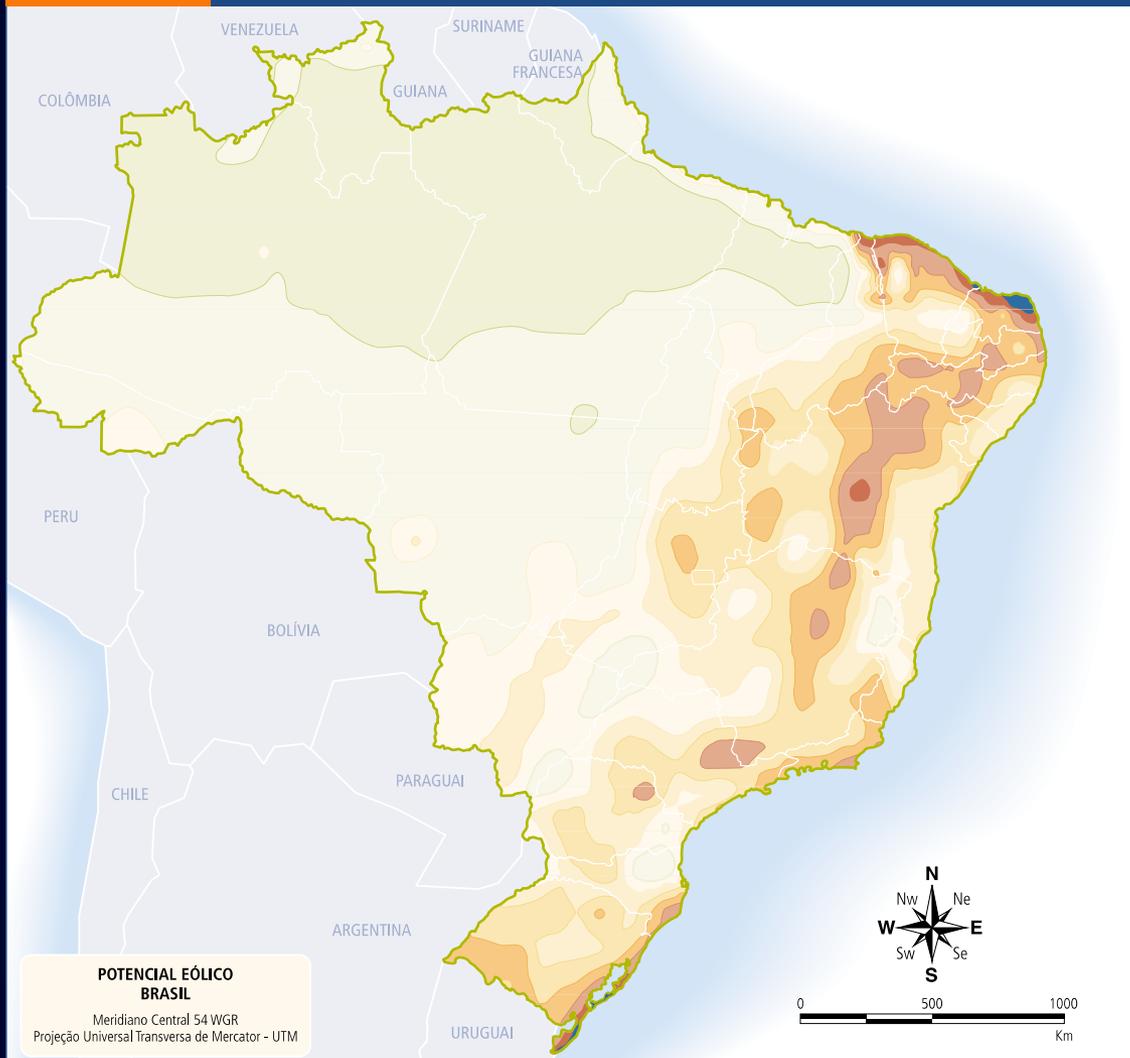


# Ventos no Brasil



**FIGURA 6.1**

**Velocidade média anual do vento a 50m de altura**



**POTENCIAL EÓLICO BRASIL**  
 Meridiano Central 54 WGR  
 Projeção Universal Transversa de Mercator - UTM

**Velocidade média do vento (m/s)  
 50 m acima do nível da superfície**

	Mata	Campo Aberto	Zona Costeira	Morro	Montanha	
Classes de energia	4	> 6,0	> 7,0	> 8,0	> 9,0	> 11,0
	3	4,5 - 6,0	6,0 - 7,0	6,0 - 7,0	7,5 - 9,0	8,5 - 11,0
	2	3,0 - 4,5	4,5 - 6,0	4,5 - 6,0	6,0 - 7,5	7,0 - 8,5
	1	< 3,0	< 4,5	< 4,5	< 6,0	< 7,0

**NOTAS:**

Mata indica áreas de vegetação nativa, com arbustos e árvores altas.

Campo aberto refere-se a áreas planas de pastagens, plantações e/ou vegetação baixa, sem muitas árvores altas.

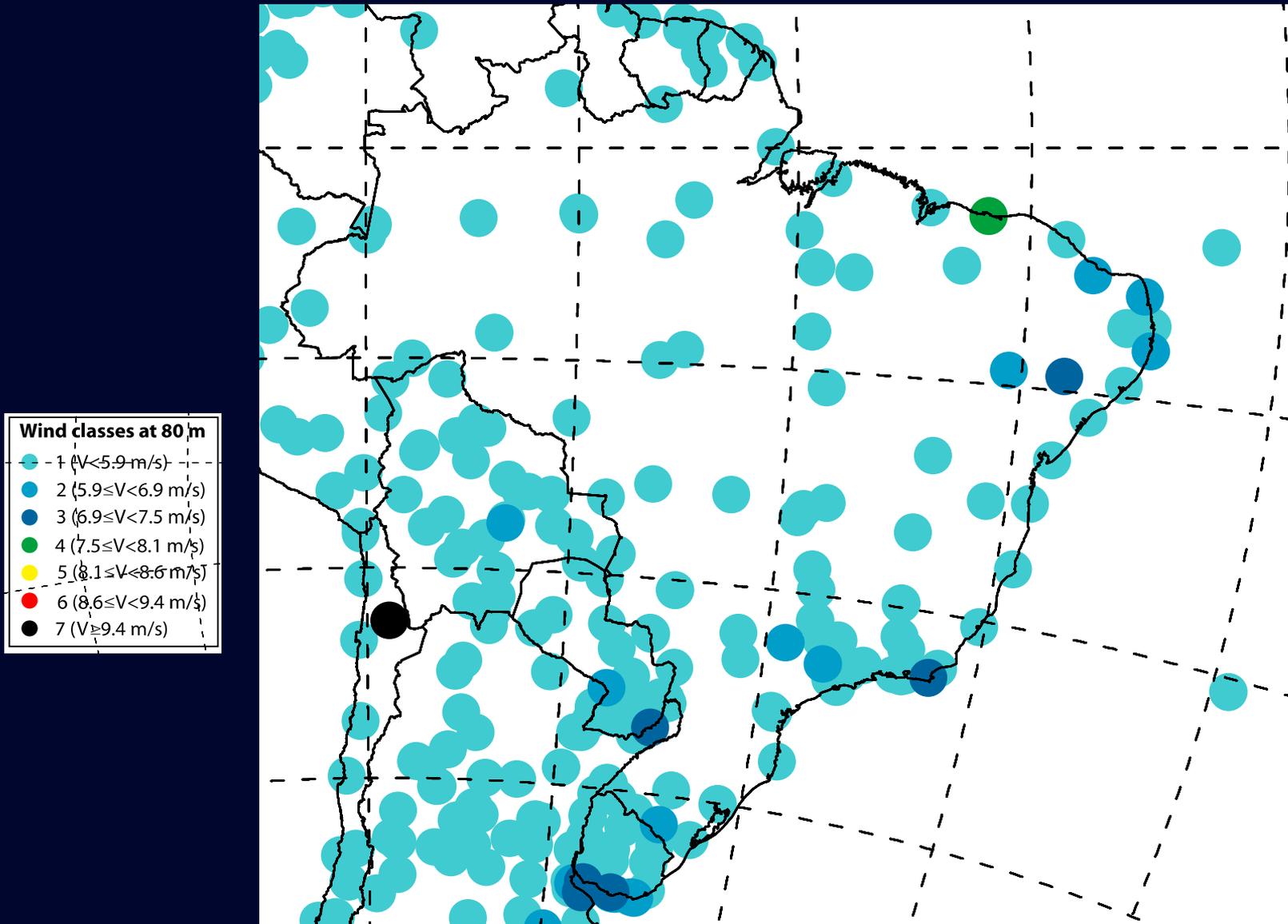
Zonas costeiras são áreas de praia, normalmente com larga faixa de areia, onde o vento incide predominantemente no sentido mar-terra.

Morros são áreas de relevo levemente ondulado, relativamente complexo e de pouca vegetação ou pasto.

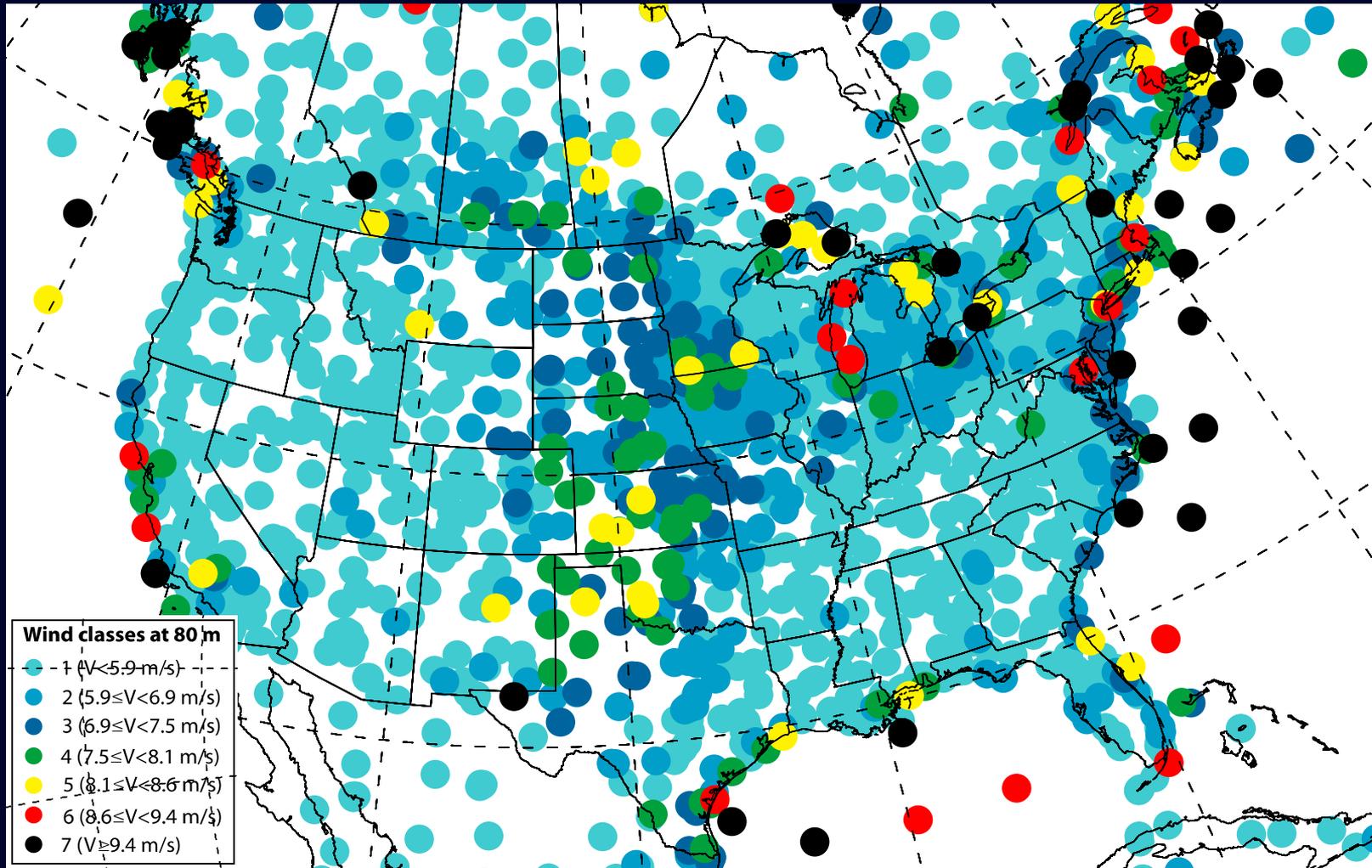
Montanhas representam áreas de relevo complexo com altas montanhas. O potencial eólico é dado para locais nos topos das montanhas em condições favoráveis para o fluxo de vento.

Fonte: FEITOSA, E. A. N. et al. Panorama do Potencial Eólico no Brasil. Brasília: Dupligráfica, 2003. (adaptado)

# Brasil – baixa densidade de dados



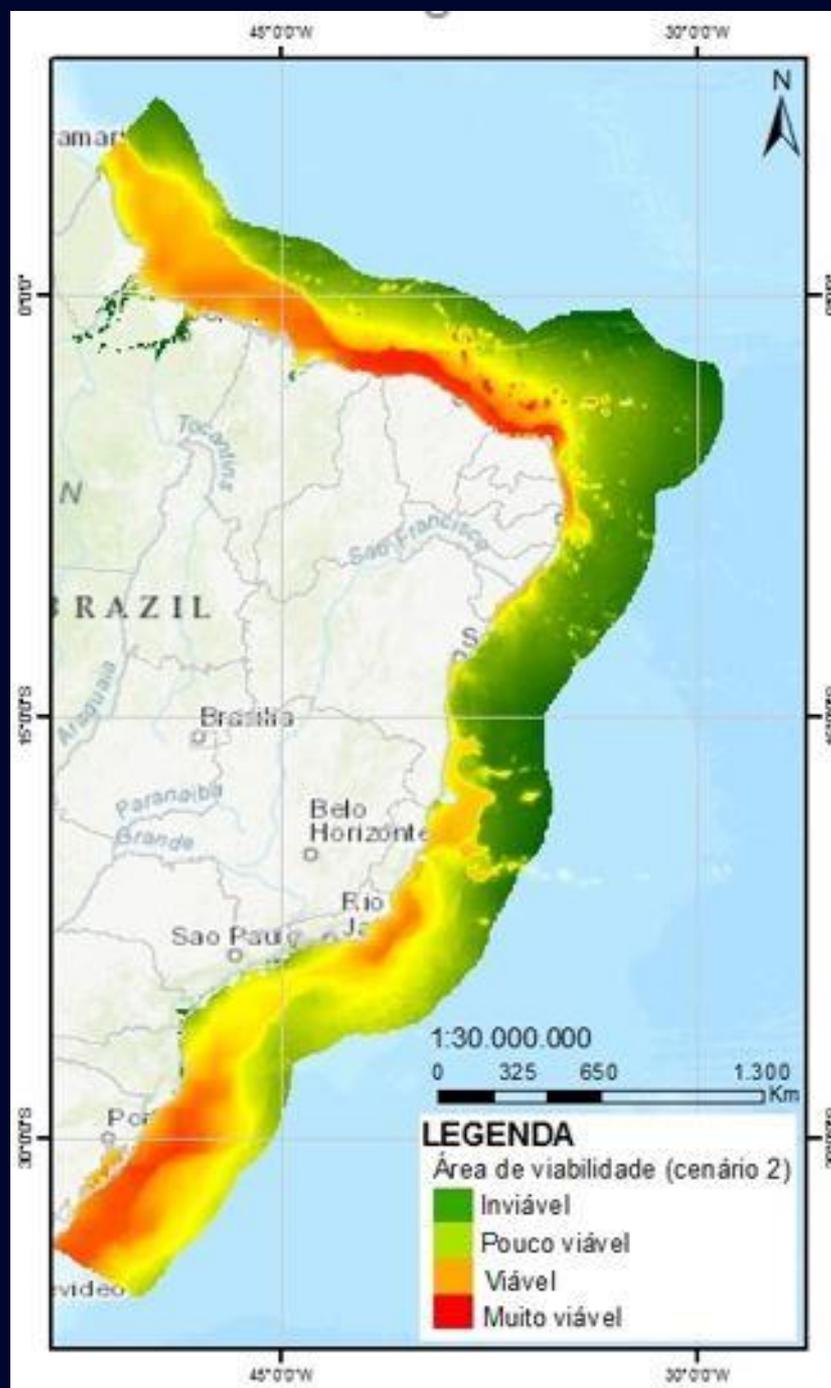
# EUA



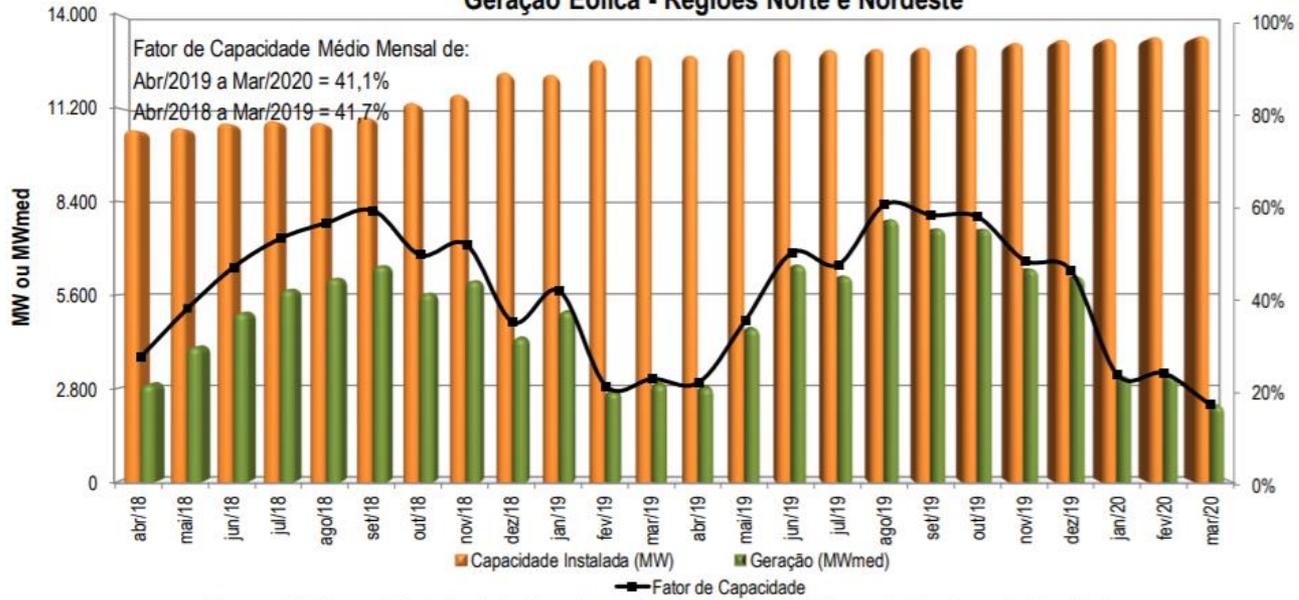
**TABELA 6.3** Definição das classes de energia

Classe	Mata		Campo aberto		Zona costeira		Morros		Montanhas	
	$V_m$ (m/s)	$E_m$ (W/m <sup>2</sup> )	$V_m$ (m/s)	$E_m$ (W/m <sup>2</sup> )	$V_m$ (m/s)	$E_m$ (W/m <sup>2</sup> )	$V_m$ (m/s)	$E_m$ (W/m <sup>2</sup> )	$V_m$ (m/s)	$E_m$ (W/m <sup>2</sup> )
4	> 6	> 200	> 7	> 300	> 8	> 480	> 9	> 700	> 11	> 1250
3	4,5 – 6	80 - 200	6 – 7	200 - 300	6,5 - 8	250 - 480	7,5 – 9	380 – 700	8,5 – 11	650 – 1250
2	3 – 4,5	25 - 80	4,5 – 6	80 - 200	5 – 6,5	100 - 250	6 – 7,5	200 – 380	7 – 8,5	300 - 650
1	< 3	< 25	< 4,5	< 80	< 5	< 100	< 6	< 200	< 7	< 300

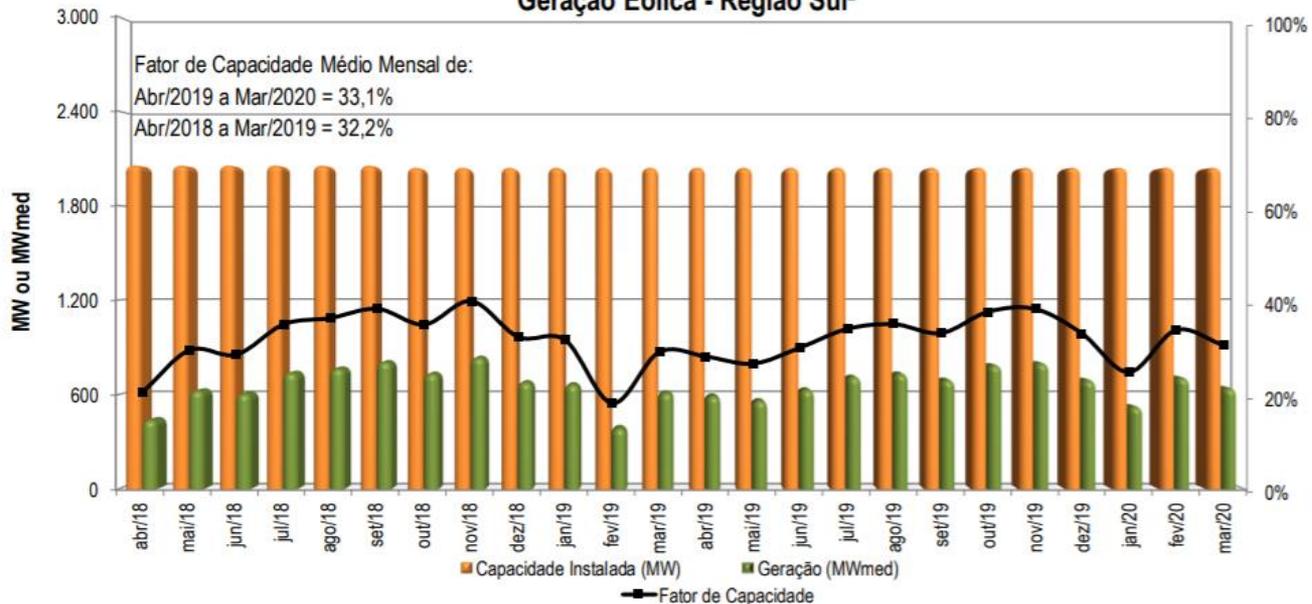
Fonte: FEITOSA, E. A. N. et al. Panorama do Potencial Eólico no Brasil. Brasília: Dupligráfica, 2003.



### Geração Eólica - Regiões Norte e Nordeste

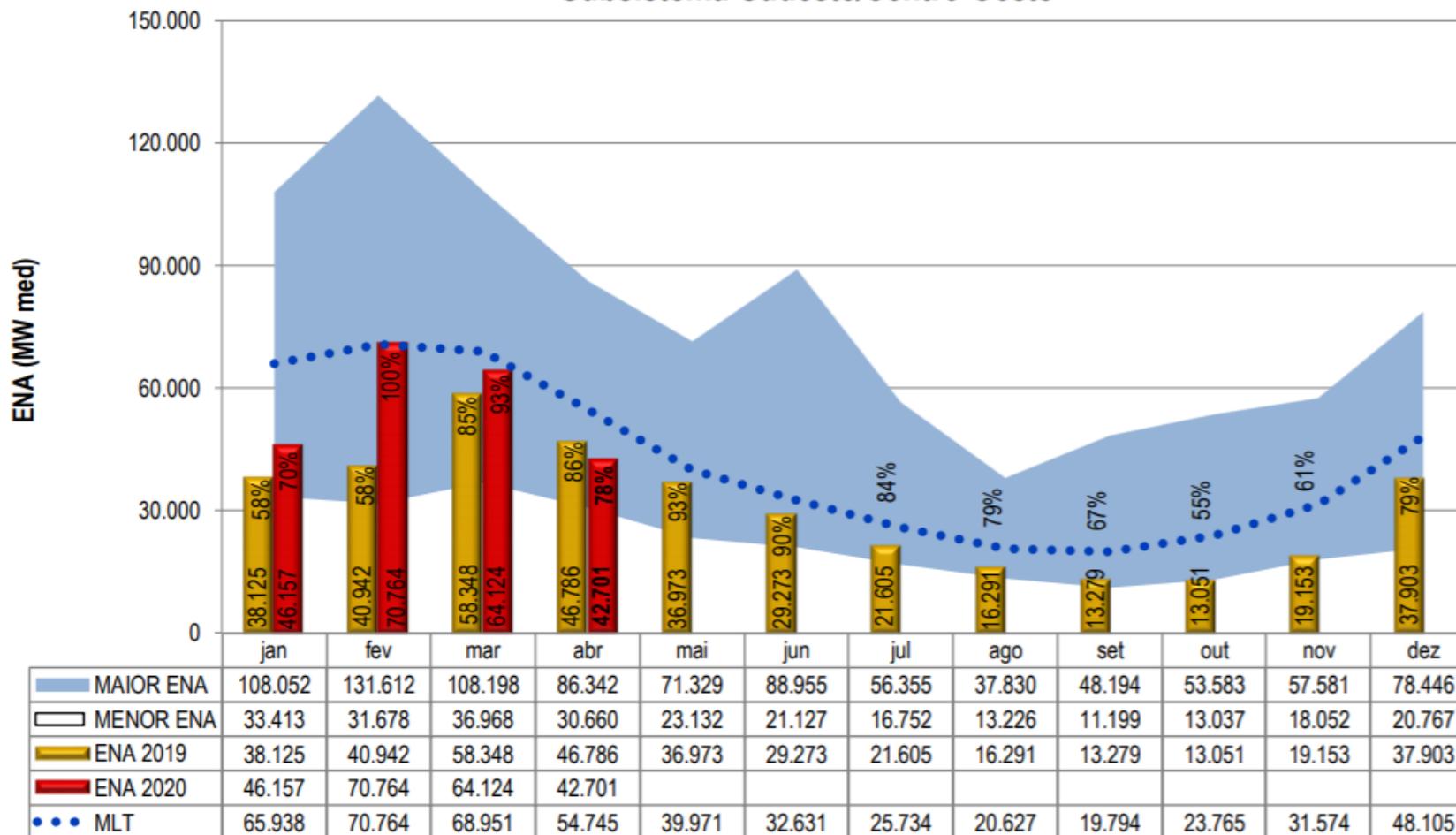


### Geração Eólica - Região Sul²



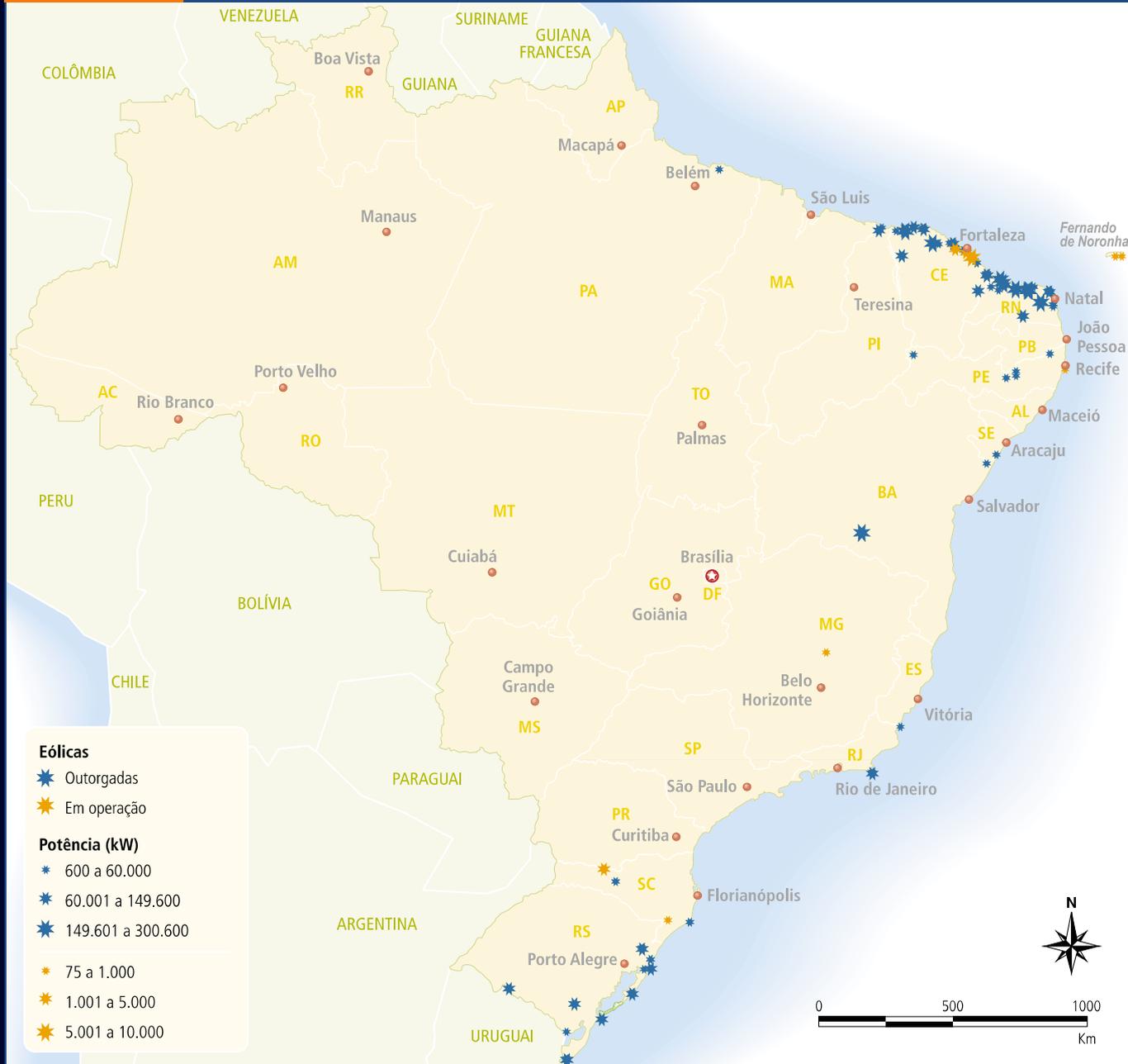
## 2.2. Energia Natural Afluente Armazenável <sup>1</sup>

### Subsistema Sudeste/Centro-Oeste



**FIGURA 6.6**

**Localização dos projetos eólicos em operação e outorgados (construção não iniciada) – situação em setembro de 2003**



Fonte: Elaborado com base em dados da AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Base de Informações de Concessão - PIC-2003. Disponível em: [www.aneel.gov.br/95.htm](http://www.aneel.gov.br/95.htm)

# Parque eólico de Rio do Fogo (RN)





Tabela 7. Matriz de capacidade instalada de geração de energia elétrica do Brasil.

Fonte	Abr/2019		Abr/2020			Evolução da Capacidade Instalada Abr/2020 - Abr/2019
	Nº Usinas	Capacidade Instalada (MW)	Nº Usinas	Capacidade Instalada (MW)	% Capacidade Instalada	
<b>Hidráulica</b>	<b>1.422</b>	<b>105.289</b>	<b>1.487</b>	<b>109.227</b>	<b>62,3%</b>	<b>3,7%</b>
UHE	217	99.309,3	218	103.000,1	58,7%	3,7%
PCH	424	5.188,6	432	5.332,8	3,0%	2,8%
CGH	699	712,4	729	791,4	0,5%	11,1%
CGU	1	0,1	1	0,1	0,0%	0,0%
CGH GD	81	79,0	107	102,8	0,1%	30,1%
<b>Térmica</b>	<b>3.168</b>	<b>42.528</b>	<b>3.291</b>	<b>44.948</b>	<b>25,6%</b>	<b>5,7%</b>
Gás Natural	167	13.354,4	167	14.947,1	8,5%	11,9%
Biomassa	568	14.810,0	571	15.025,0	8,6%	1,5%
Petróleo	2.251	9.009,0	2.288	9.061,8	5,2%	0,6%
Carvão	22	3.251,8	23	3.596,8	2,1%	10,6%
Nuclear	2	1.990,0	2	1.990,0	1,1%	0,0%
Outros Fósseis <sup>3</sup>	4	69,0	10	257,5	0,1%	273,1%
Térmica GD	154	44,0	230	69,3	0,0%	57,4%
<b>Eólica</b>	<b>671</b>	<b>15.074</b>	<b>700</b>	<b>15.530</b>	<b>8,9%</b>	<b>3,0%</b>
Eólica (não GD)	614	15.063,9	637	15.519,3	8,8%	3,0%
Eólica GD	57	10,3	63	10,4	0,0%	0,9%
<b>Solar</b>	<b>73.882</b>	<b>2.817</b>	<b>239.770</b>	<b>5.670</b>	<b>3,2%</b>	<b>101,3%</b>
Solar (não GD)	2.470	2.084,0	3.894	2.927,8	1,7%	40,5%
Solar GD	71.412	733,0	235.876	2.742,6	1,6%	274,2%
<b>Capacidade Total sem GD</b>	<b>7.439</b>	<b>164.843</b>	<b>8.972</b>	<b>172.450</b>	<b>98,3%</b>	<b>4,6%</b>
<b>Geração Distribuída - GD</b>	<b>71.704</b>	<b>866</b>	<b>236.276</b>	<b>2.925</b>	<b>1,7%</b>	<b>237,6%</b>
<b>Capacidade Total - Brasil</b>	<b>79.143</b>	<b>165.709</b>	<b>245.248</b>	<b>175.375</b>	<b>100,0%</b>	<b>5,8%</b>

GD: Geração distribuída