

GSA0621-Princípios de Geologia Sedimentar

Professores: André Oliveira Sawakuchi
Renato Paes de Almeida

1. Introdução

Objetivos da disciplina

Introduzir os principais conceitos da Geologia Sedimentar:

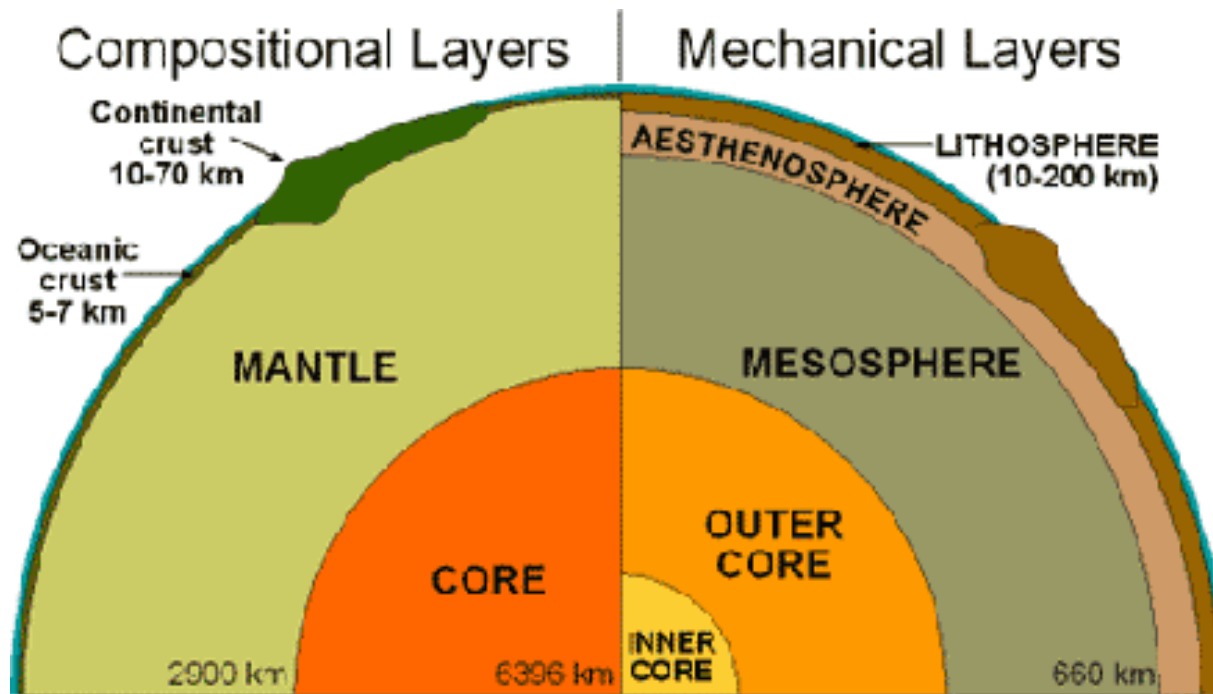
- Processos e ciclos da dinâmica externa da Terra
- Mecanismos de transporte e deposição de sedimentos
- Processos formadores e classificação das rochas sedimentares
- Características e interpretação de sistemas deposicionais
- Fundamentos e técnicas da estratigrafia
- Origem e evolução de bacias sedimentares

Processos de escala planetária a regional

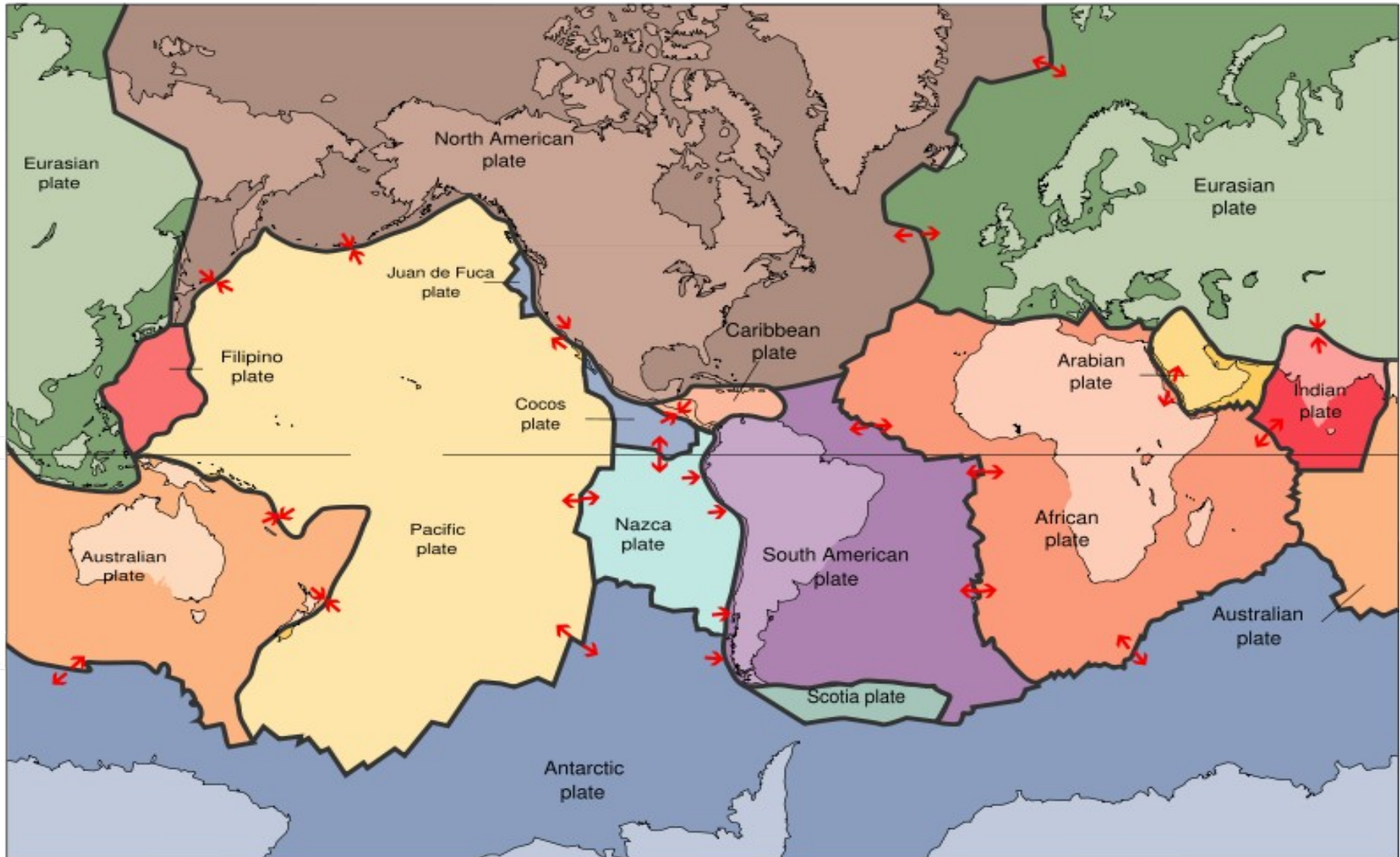
- Dinâmica interna da Terra – tectônica de placas e formação de bacias sedimentares.
- Sistemas de formação, transporte e deposição de sedimentos
- Processos de litificação
- Metamorfismo e geração de magmas a partir de produtos sedimentares

Estrutura interna da Terra

Há duas formas principais de se descrever a estrutura interna do planeta: com base na variação, em profundidade, da composição ou do comportamento mecânico.



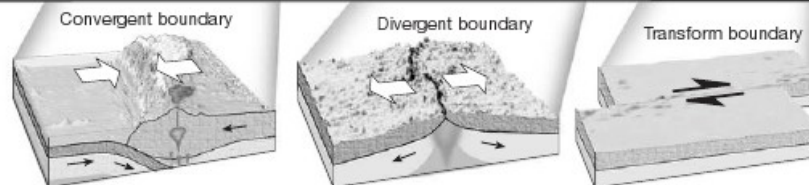
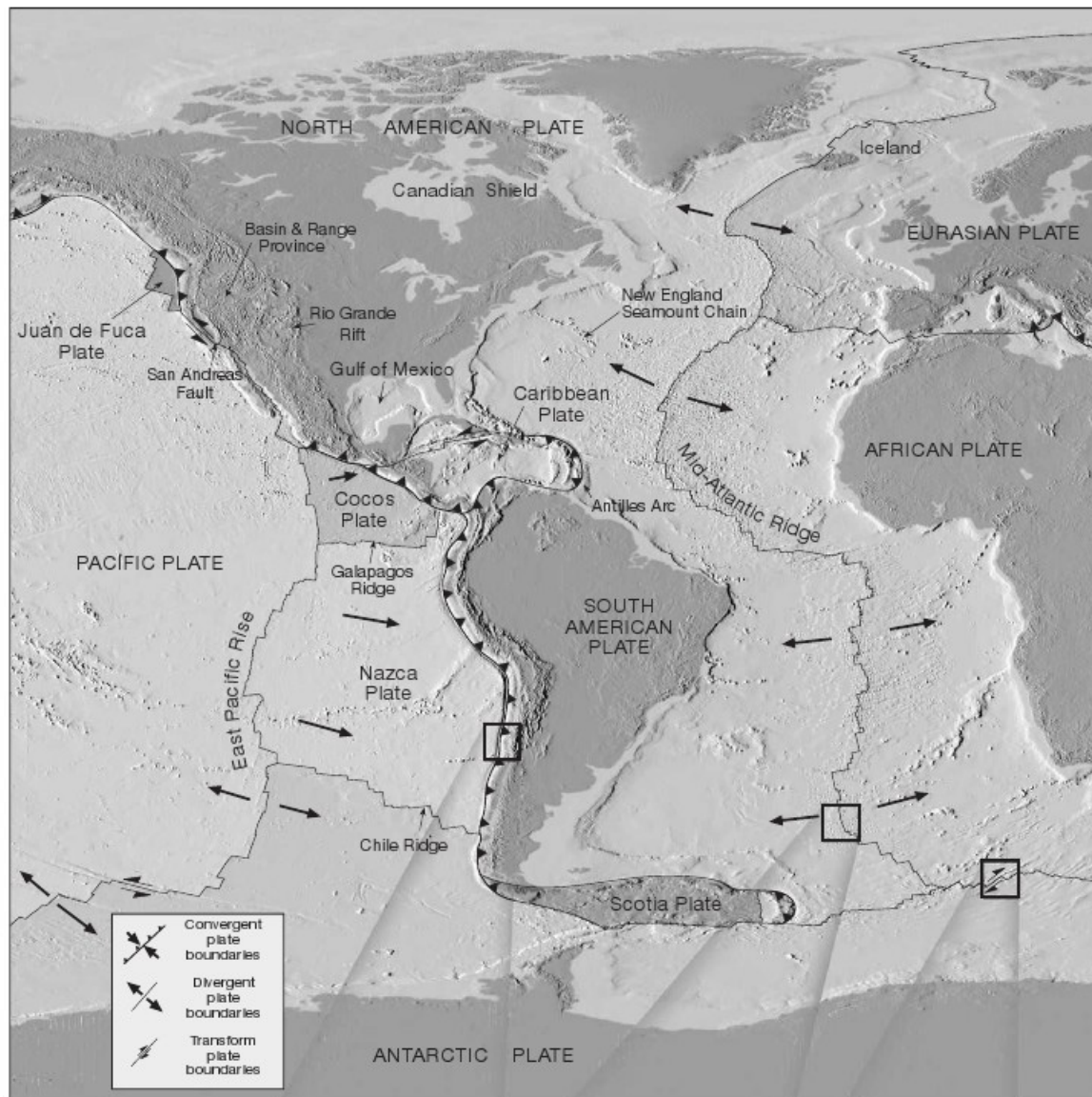
Principais Placas Litosféricas



Limites entre placas:

- Divergentes
- Convergentes
- Transformes

Formação de bacias é um processo importante nos três tipos de limites, além dos contextos intraplaca, gerando bacias com características particulares que serão em outra aula.



Bacias Sedimentares e Tectônica Global

Definição de bacia sedimentar – Área da superfície terrestre que sofre ou sofreu subsidência continuada, com acumulação de sucessões sedimentares.

Subsidência é o processo de lento deslocamento da superfície em direção ao centro da Terra (afundamento), causado por uma mudança de estado da crosta ou da litosfera.

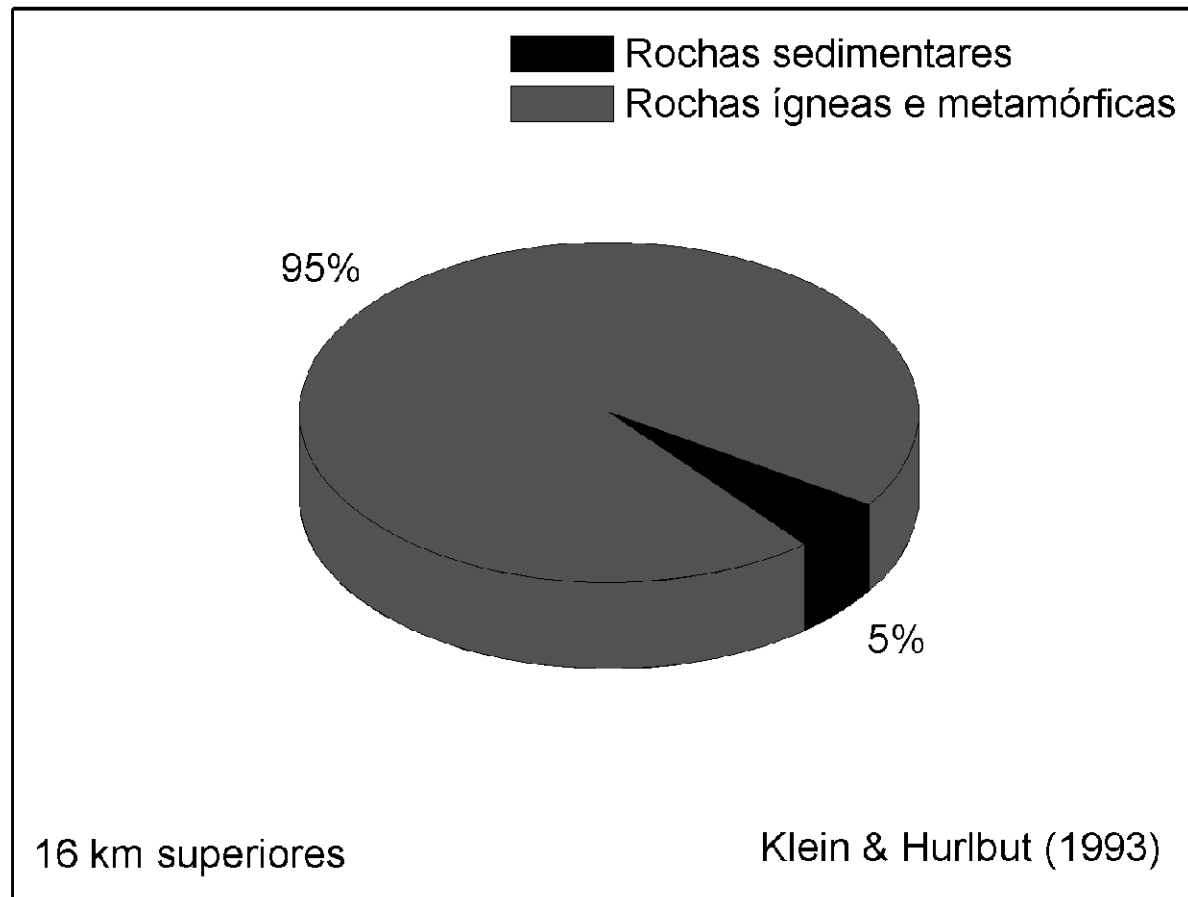
A subsidência dura enquanto houver desequilíbrio entre as forças que atuam na litosfera e para que se inicie é necessário uma mudança em um dos seguintes fatores:

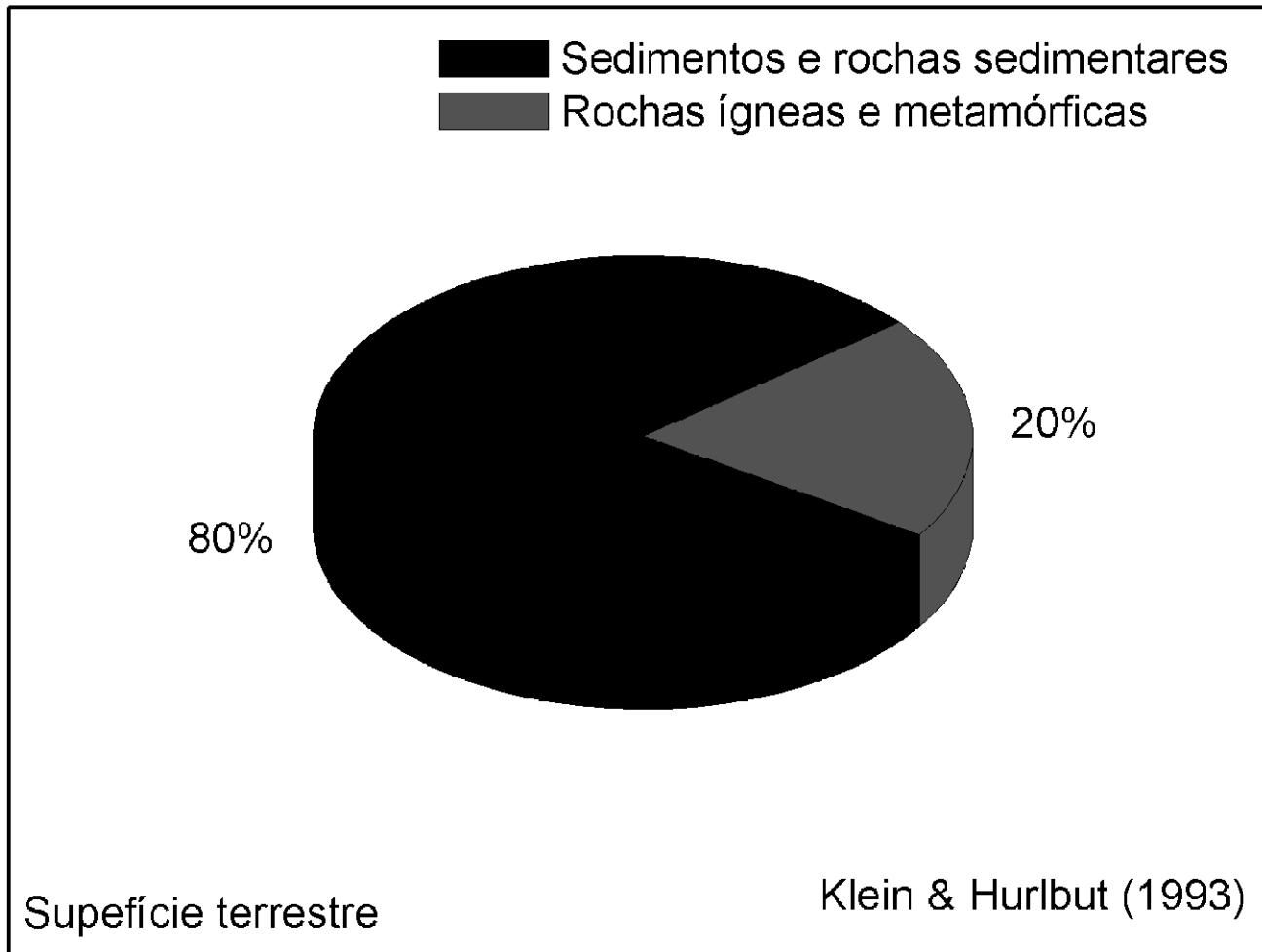
- Peso da litosfera (modificação da massa e/ou da densidade)

- Empuxo da astenosfera

- Rigidez flexural da litosfera

Esses fatores serão discutidos em aula posterior. Os processos envolvidos nas mudanças de estado que geram as bacias sedimentares estão relacionados à dinâmica interna do planeta, que promove movimentação e deformação da litosfera.

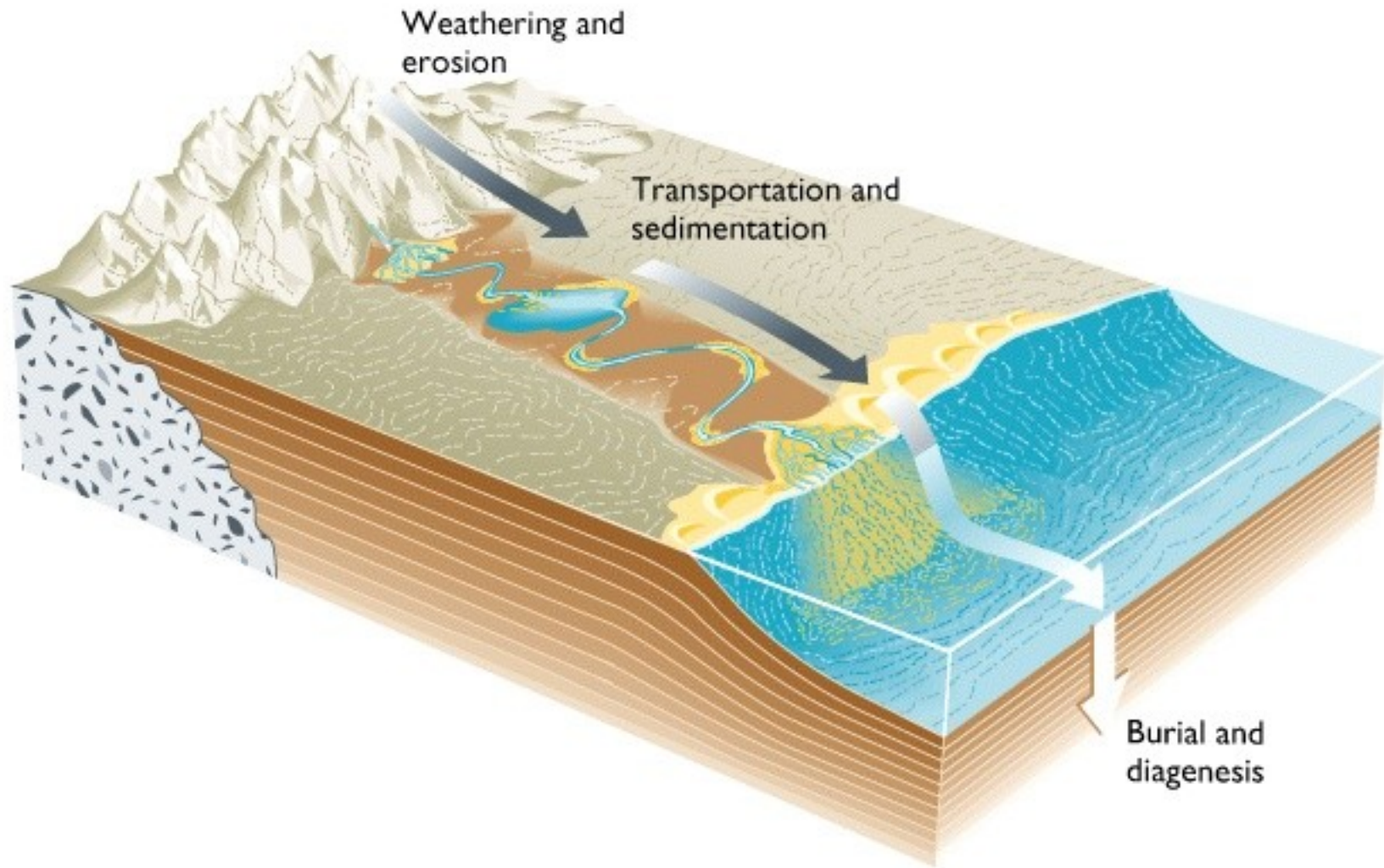




Conceitos fundamentais

- Sedimento
- Área fonte
- Bacia sedimentar
- Nível de base
- Subsidência
- Diagênese

2. Intemperismo



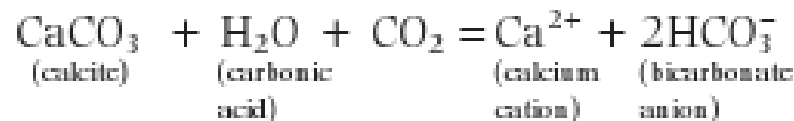
Intemperismo:

Físico – fragmentação sem alteração composicional. Aumenta a área específica e facilita a alteração química.

Químico – envolve reações com soluções aquosas: alteração mineralógica e retirada seletiva de elementos para as soluções:

- *Dissolução*- De minerais solúveis em água (dependendo de Ph e temperatura).

- *Hidrólise* – reação de minerais com a água. Ex: formação de argilas e íons em solução pela alteração de feldspato e quebra de calcita em íons.



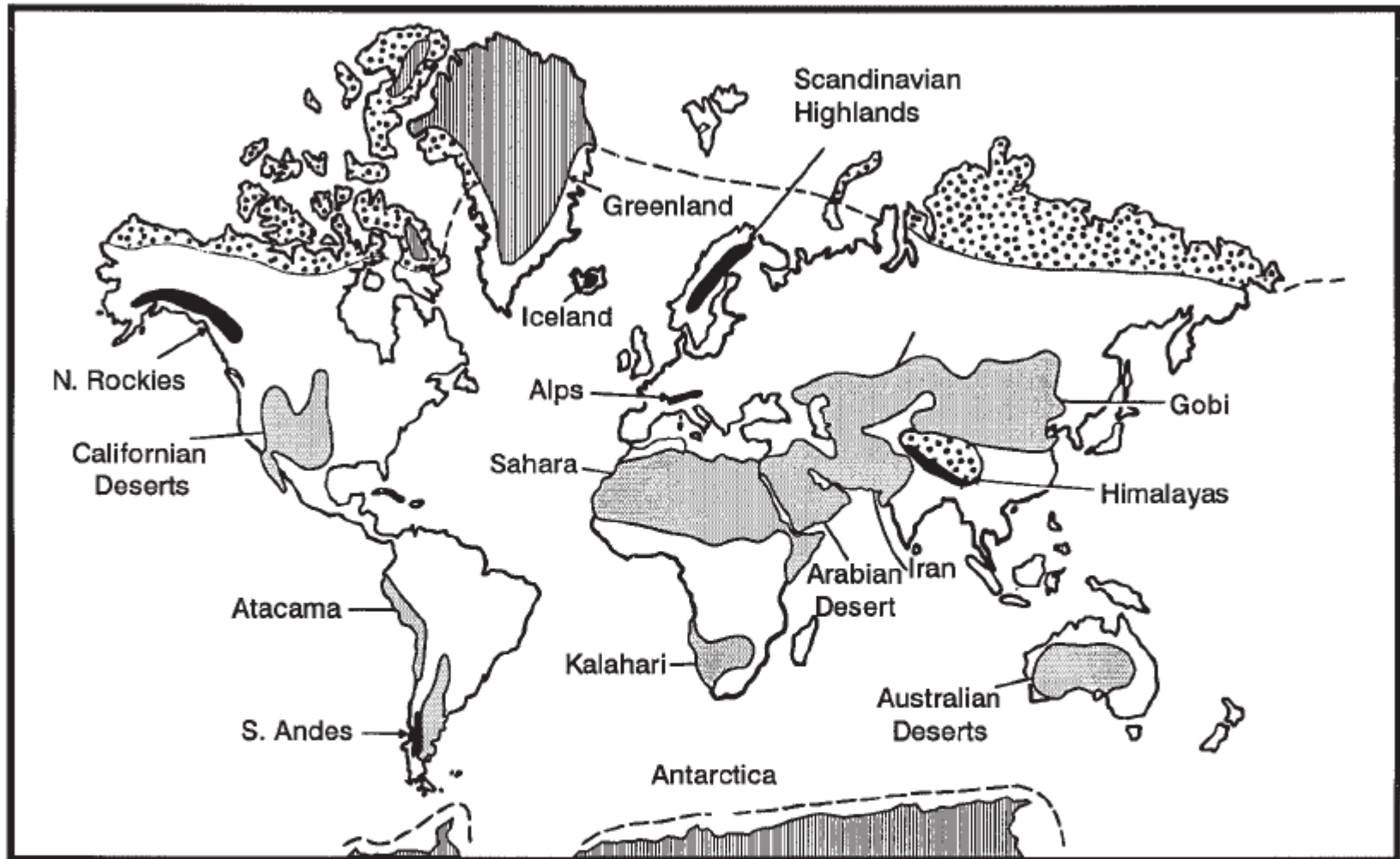
- *Acidólise* (em climas frios), *arborização*, *oxidação*, *redução*, *hidratação*, etc.

Intemperismo químico

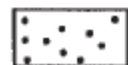


Intemperismo físico





Cool and wet



Periglacial areas

Warm and wet



Humid climate

Warm and dry



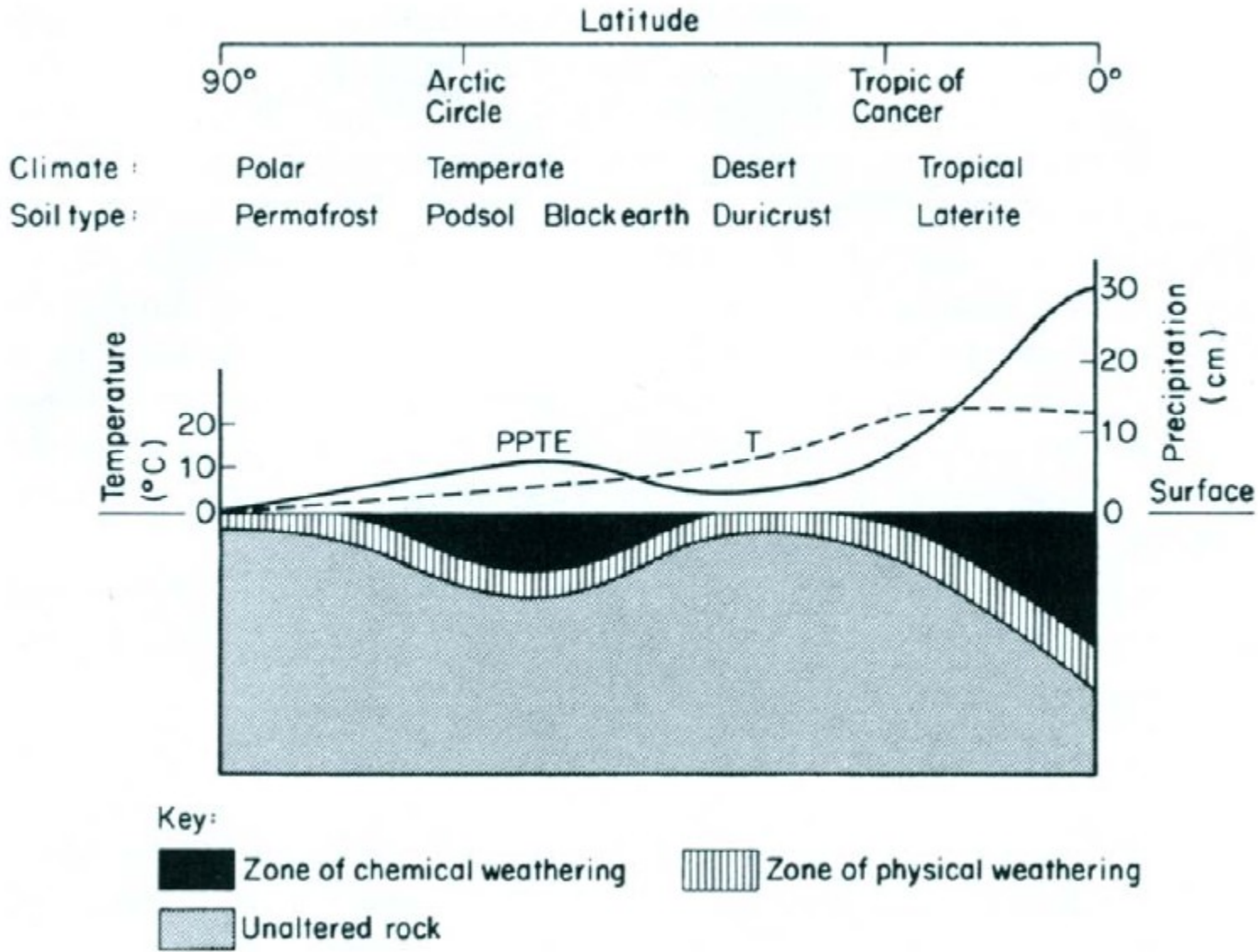
Desert and semi-desert



Ice sheets



Mountain glaciers



Selley (2000)

Produtos do intemperismo:

- Minerais resistentes não alterados.
- Minerais novos, formados pelo intemperismo.
- Íons carregados em solução pelas águas dos rios.

Minerais comuns na crosta

Ígneas e metamórficas

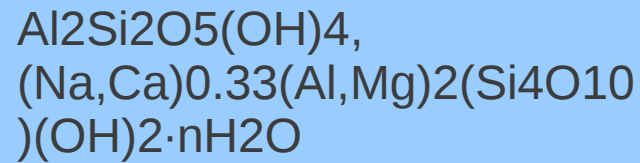
Quartzo	SiO_2
Feldspatos	$(\text{Na}, \text{K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$
Plagioclásio	$(\text{Na}, \text{Ca})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$
Biotita	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$
Muscovita	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$
Clorita	$(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot (\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{OH})_6$
Granadas	$[\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Ca}]_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$
Anfibólios (diversos)	$(\text{Ca}, \text{Na})_{2-3}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_5\text{Si}_6(\text{Al}, \text{Si})_2\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Piroxênios	$[\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe}]\text{Si}_2\text{O}_6$
Olivina	$[\text{Fe}, \text{Mg}]_2\text{SiO}_4$
Cianita	Al_2SiO_5
Estaurolita	$\text{Fe}_2\text{Al}_9(\text{SiO}_4)_4(\text{O}, \text{OH})_2$
Silimanita	Al_2SiO_5
Óxidos (diversos)	$\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Fe}_3\text{O}_4 (\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + 2\text{O}_4)$

Sedimentares

Quartzo



Argilominerais
(diversos)



Feldspatos



Calcita



Dolomita



Gipsita



Halita



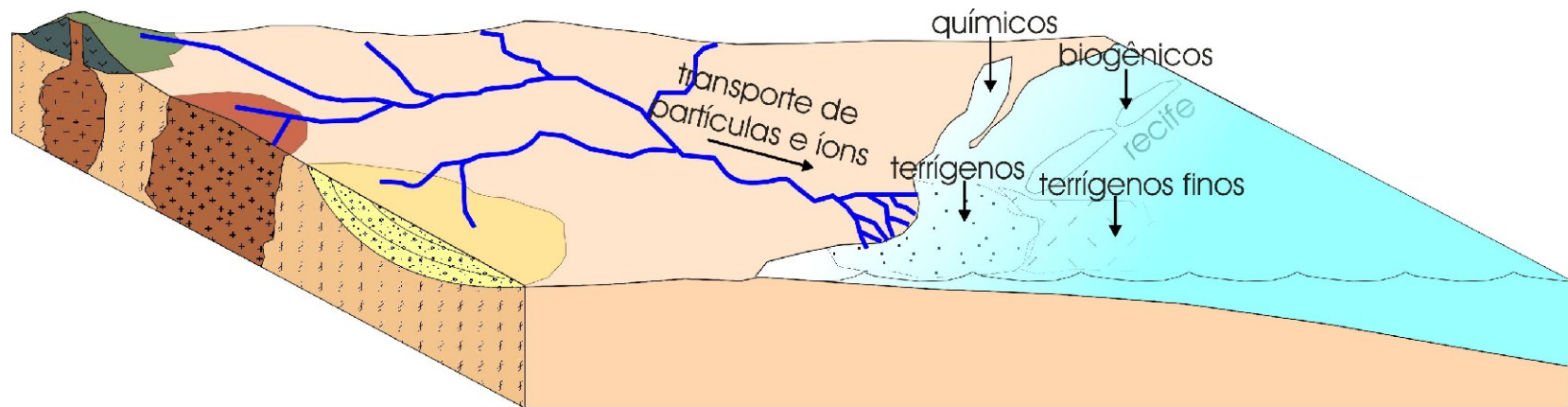
A água do mar é a água dos rios mais saturada?

Table 3.1 Comparison of the compositions of 'average' river-water and 'average' seawater. Note that in seawater, with its high ionic strength, not all of any given anion or cation is available for reaction because of the phenomena of complexing and ion pairing. The flux of chemical species from the world's rivers into the oceans may be calculated by making use of the measured concentration of elements in river-water and the mean annual discharge of the rivers involved. To this we must correct for the flux of oceanic wind-blown salts to the continents and for the effect of various pollutants. Chief amongst the latter is SO_4^- , whose proportion provided by pollutants is estimated to be 20–30%. (Data collected from Livingstone, 1963; Drever *et al.*, 1988.)

Ion	Seawater conc. (mol/kg)	Order of abundance	River-water conc. (mol/kg)	Order of abundance	Net river flux—no cyclic salts or pollution (10^{12} mol/yr)	Sea/river
Na^+	0.47	2	2.7×10^{-4}	4	5.91	1740
K^+	1×10^{-2}	5	5.9×10^{-5}	7	1.17	170
Ca^{2+}	1×10^{-2}	5	3.8×10^{-4}	2	12.36	26
Mg^{2+}	5.4×10^{-2}	3	1.7×10^{-4}	3	4.85	318
Cl^-	0.55	1	2.2×10^{-4}	4	3.27	2500
SO_4^{2-}	3.8×10^{-2}	4	1.2×10^{-4}	6	3.07	317
HCO_3^-	1.8×10^{-2}	6	9.6×10^{-4}	1	32.09	1.9
pH	7.9		~7			
Ionic strength	0.65		0.002			

3. Denudação, transporte e deposição

Destino dos produtos do intemperismo: deposição



A Fábrica Siliciclástica

Bacias sedimentares são alimentadas por sedimento particulado (clástico) e íons em solução, formados pela denudação de áreas emersas e transporte principalmente por rios (mas também por geleiras e vento) até a bacia..

A água corrente dos rios transporta sedimentos particulados por tração (cascalhos e parte da areia) e suspensão (parte da areia, silte e argila). Essa água é uma parte da água precipitada como chuva. Parte do volume de chuva da bacia de drenagem tem outros destinos, pois o balanço hídrico de uma bacia fluvial é composto por vários fluxos:

$$P = E + T + \Delta S + \Delta G + R$$

Onde P = precipitação, T = transpiração, E= evaporação, Δs = variação do volume de água do solo, Δg = variação do volume de água do aquífero, R= escoamento fluvial na foz (*run-off*).

O quociente do escoamento fluvial pela precipitação na área de captação é o coeficiente de *run-off*.

Table 7.1 Run-off of a selection of the world's major rivers.

River	Catchment area (km²)	Annual precipitation (mmyr⁻¹)	Discharge at river mouth (m³s⁻¹)	Run-off coefficient C_r
Amazon	6,150,000	1490	200,000	0.69
Nile	2,715,000	832	317	0.004
Lena (Russia)	2,430,000	355	16,200	0.59
Orinoco	945,000	1300	34,900	0.9
Murray (Australia)	910,000	582	698	0.04
Seine (France)	78,600	711	685	0.39

Se a descarga de sedimento e produtos em solução que saem de uma bacia de drenagem é D , e não há variação na proporção de sedimentos acumulados nas planícies aluviais, então a taxa de denudação média em períodos longos de tempo é:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{(1 - \phi) D}{\rho A_d}$$

Onde h = elevação, ϕ e ρ = porosidade densidade das rochas da área-fonte, A_d = área denudada. Sendo D dado em Kg/ano.

Assim, o cálculo da taxa de denudação exige o conhecimento dos fluxos de sedimentos e solúveis nas águas de escoamento.

Um conceito importante para o estudo da fábrica siliciclástica é o de *Produção sedimentar* (*sediment yield*), ou fluxo sedimentar por área da bacia de drenagem.

Se D_s é o fluxo de sedimentos detríticos (sem solúveis), a *Produção sedimentar* R , é dada por:

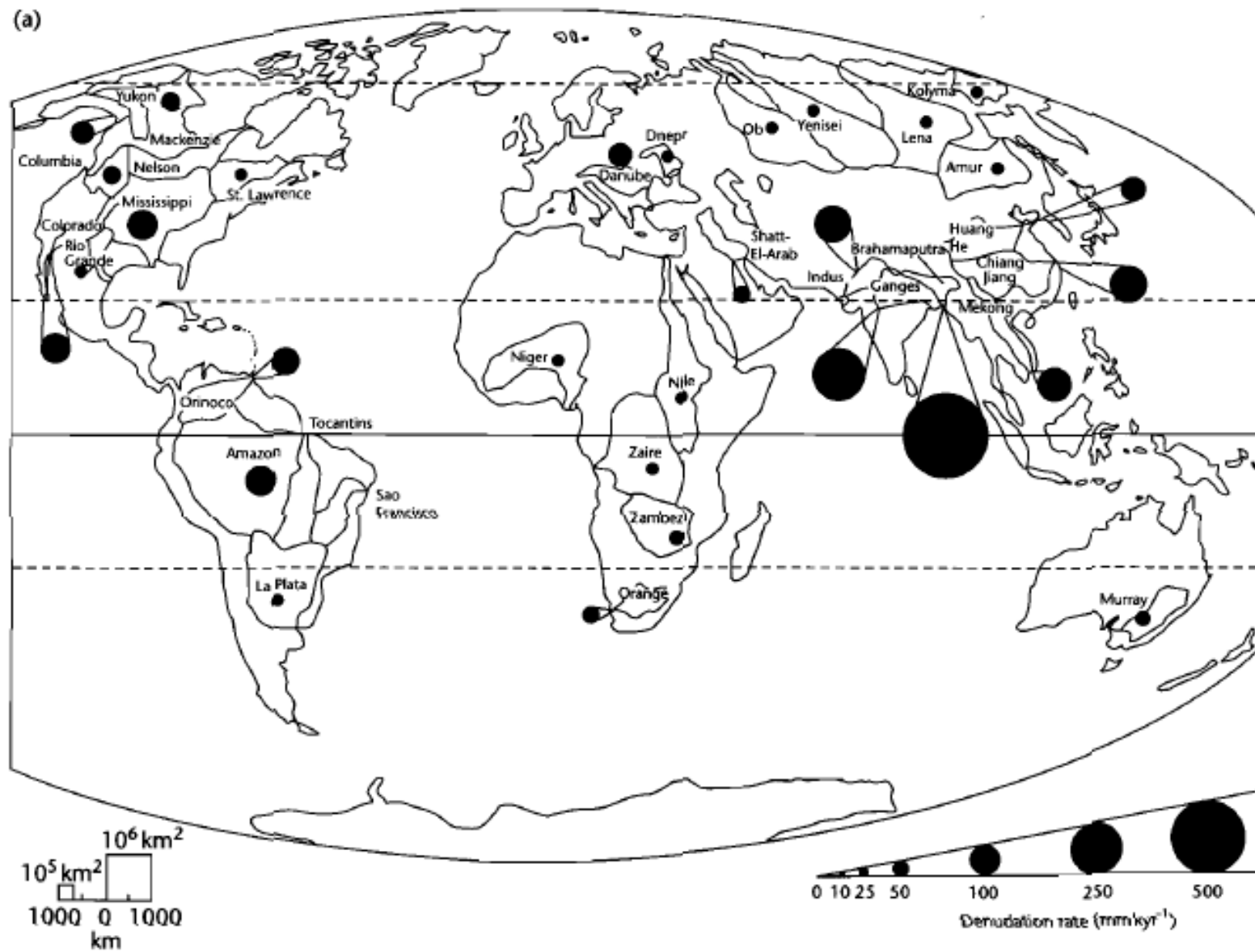
$$R = \frac{D_s}{A_d}$$

O volume total de sedimentos que chega às bacias oceânicas no planeta é de 20×10^9 t/ano, e com a Terra tem uma área de $1,49 \times 10^8$ km², a produção sedimentar média do planeta é de 135 tkm⁻²ano⁻¹.

Essa produção varia muito em cada bacia de drenagem, desde menos de 1 tkm⁻²ano⁻¹ em alguns rios da Sibéria até mais de 50.000 tkm⁻²ano⁻¹ em rios Chineses que drenam áreas de sedimentos eólicos finos (loess) de fácil erosão.

Os principais controles sobre a produção sedimentar são precipitação (que controla alteração das rochas-fonte), efeitos topográficos (altitude, declividade, etc) e tipo de rocha-fonte.

(a)



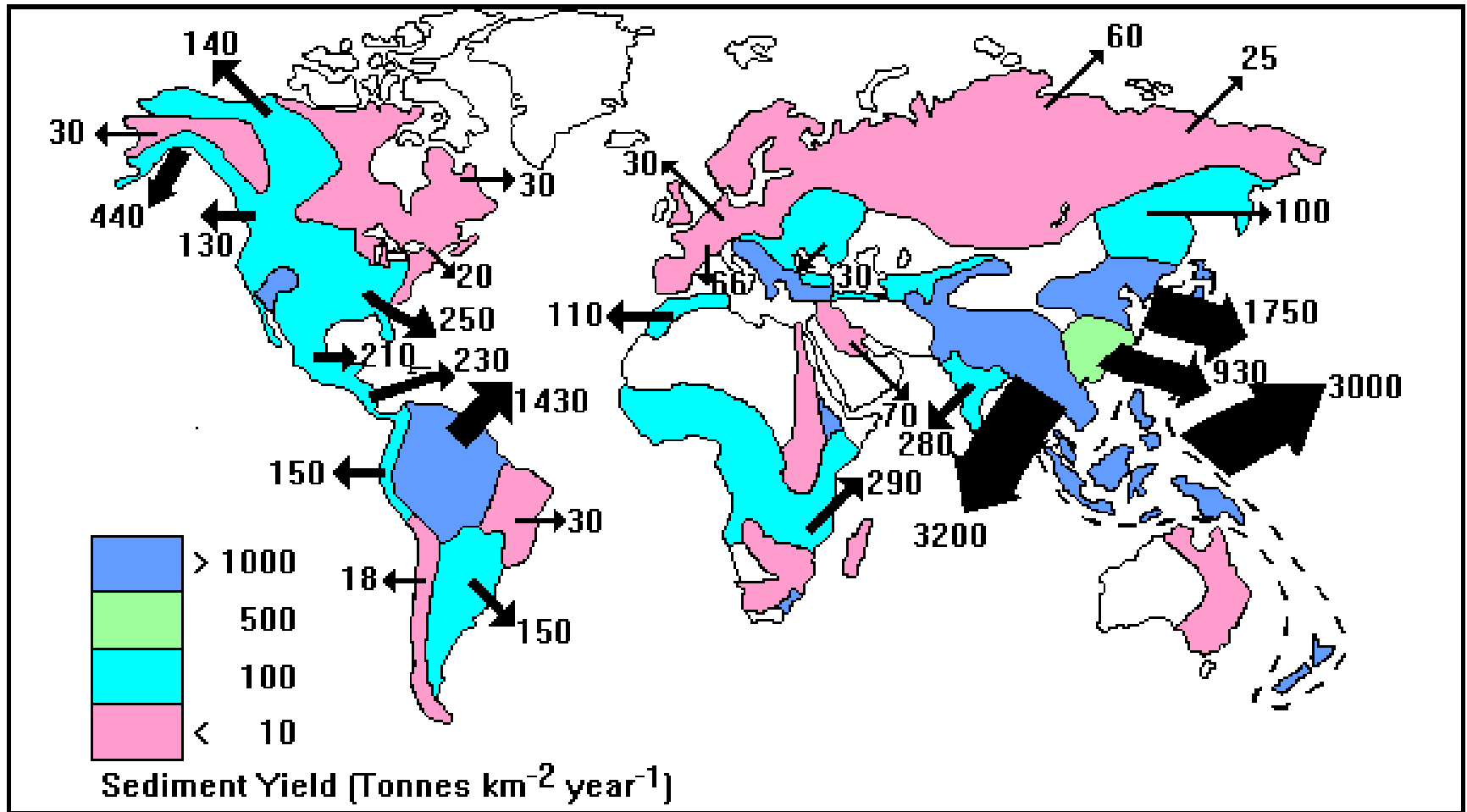


Figure 5 Global pattern of sediment yield, with river output of sediment to the oceans ($\text{Tonnes} \times 10^6$) [Ref. 6]. [Reproduced by permission]

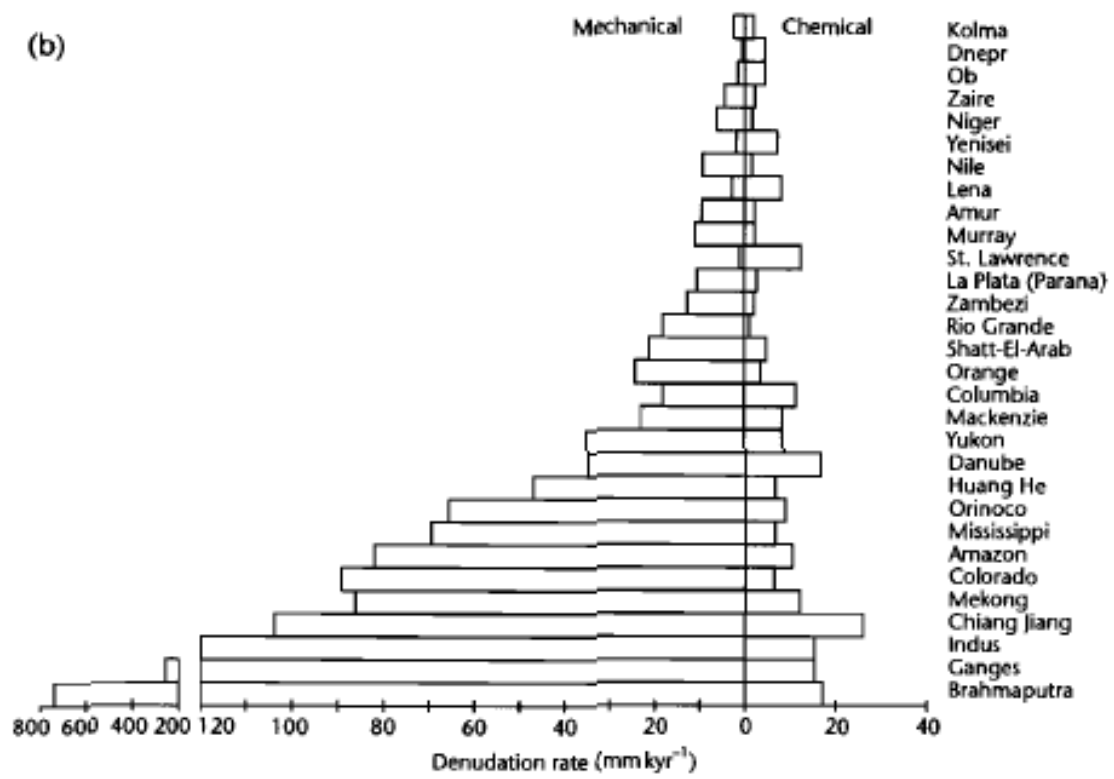


Fig. 7.6 (a) Estimated total denudation rates for major externally drained basins. Size of black circles is proportional to denudation rate; (b) Histogram comparing mechanical and chemical denudation rates for the world's major externally drained basins. After Summerfield and Hulton (1994). Reproduced courtesy of American Geophysical Union.

Table 7.2 Sediment and solute yields of the world's major rivers (after Summerfield and Hulton 1994, and sources cited therein).

River basin	Area 10⁶ km²	Sediment yield t km⁻² yr⁻¹ (equivalent mechanical denudation rate, mm kyr⁻¹)	Solute yield t km⁻² yr⁻¹ (equivalent chemical denudation rate, mm kyr⁻¹)	Chemical denudation as % of total
Amazon	5.98	221 (82)	29 (11)	11.6
Amur	2.04	28 (10)	6 (2)	17.6
Brahmaputra	0.64	1808 (670)	49 (18)	2.6
Chiang Jiang	1.73	281 (104)	72 (27)	20.4
Colorado	0.70	239 (89)	19 (7)	7.4
Columbia	0.67	48 (18)	32 (12)	40.0
Danube	0.79	94 (35)	45 (17)	32.4
Dnepr	0.54	2 (1)	12 (4)	85.7
Ganges	0.98	694 (257)	42 (16)	5.7
Huang He	0.79	127 (47)	18 (7)	12.4
Indus	0.93	323 (120)	42 (16)	11.5
Kolyma	0.65	9 (3)	4 (1)	30.8
La Plata (Parana)	2.86	30 (11)	9 (3)	23.1
Lena	2.45	7 (3)	22 (8)	75.9
Mackenzie	1.77	62 (23)	23 (9)	27.1
Mekong	0.76	232 (86)	36 (13)	13.4
Mississippi	3.20	189 (70)	20 (7)	9.6
Murray	1.14	30 (11)	6 (2)	9.7
Nelson	1.24	–	16 (6)	–
Niger	2.16	19 (7)	4 (1)	17.4
Nile	3.63	28 (10)	3 (1)	9.7
Ob	2.98	6 (2)	11 (4)	64.7
Orange	0.89	65 (24)	11 (4)	14.5
Orinoco	0.92	179 (66)	23 (9)	11.4
Rio Grande	0.63	48 (18)	4 (1)	7.7
Sao Francisco	0.62	11 (4)	–	–
Shatt-El-Arab	0.89	56 (21)	14 (5)	20.0
St Lawrence	1.05	2 (1)	34 (13)	94.4
Tocantins	0.76	–	–	–
Yenisei	2.55	5 (2)	18 (7)	78.3
Yukon	0.84	94 (35)	23 (9)	19.7
Zaire	3.63	14 (5)	6 (2)	30.0
Zambezi	1.41	34 (13)	6 (2)	15.0

O efeito da altitude

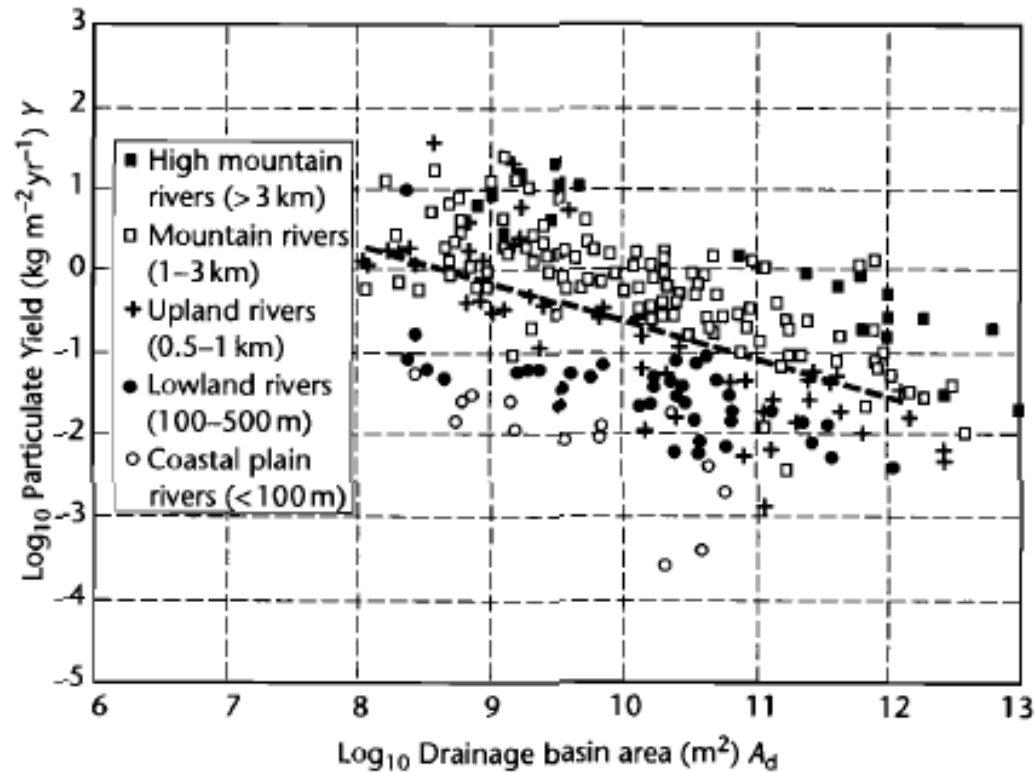


Fig. 7.7 Plot of drainage basin area versus particulate sediment yield for the elevation classes of rivers of Milliman and Syvitski (1992). The regression for all of the river data has the form $Y = \exp(9.18 - 0.46 \ln A_d)$. After Hay (1998). Reproduced courtesy of Elsevier.

O efeito do tipo de rocha denudada

Table 7.4 Rock types at the Earth's surface by percentage.

Class	Rock type	Percentage (by area)
Plutonic	Granite	10.4
	Gabbro and ultrabasics	0.6
Metamorphic	Marble	0.4
	Amphibolite	1.9
	Mica-schist	1.5
	Gneiss	10.4
	Quartzite	0.8
Volcanic	Basalt	4.15
	Andesite	3.0
	Rhyolite	0.75
Sedimentary	Quartz-arenite	12.6
	Arkose (felspathic arenite)	0.8
	Greywacke (lithic, argillaceous arenite)	2.4
	Shale	33.1
	Limestone and dolomite	15.9
	Evaporite (gypsum and halite)	1.3

Table 7.5 Weathering rates of major rock types, relative to granite.

Rock type	Weathering rate
Granite	1
Gneiss/schist	1
Gabbro	1.3
Sandstones	1.3
Volcanics	1.5
Shales	2.5
Other metamorphic	5
Carbonates	12
Gypsum	40
Rock salt	80

Table 7.6 Water discharge, suspended and solute loads, and mean elevation of world's major rivers.

River	Water discharge ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Suspended load (Mtyr^{-1})	Solute load (Mtyr^{-1})	Mean elevation (m)
Amazon	200,000	1150	223	426
Brahmaputra	19,300	520	61	2734
Columbia	7930	15	35	1329
Colville	492	520	6	469
Danube	6660	70	60	501
Dnepr	1650	2.1	11	152
Fraser	3550	20	11	1140
Ganges	11,600	524	75	890
Indus	7610	250	41	1855
Irrawaddy	13,600	260	92	758
Jana	920	3	1	703
Lena	16,200	12	88	602
Mackenzie	9830	125	64	634
Magdalena	6980	220	28	1203
Mekong	14,900	160	60	1062
Mississippi	18,400	400	125	656
Murray	698	30	9	266
Niger	6020	32	10	429
Nile	317	125	18	662
Ob	12,200	16	50	301
Orange	2890	91	12	1241
Orinoco	34,900	150	39	456
Parana	18,000	112	56	564
Po	1490	18	10	793
Rio Grande	95	30	2	1279
Shatt al Arab	1460	103	18	669
St. Lawrence	14,300	4	59	265
Xi Jiang	9510	80	132	670
Yangtze	28,500	480	226	1688
Yellow (Huang He)	1550	120	22	1885
Yenisei	17,800	13	65	749
Yukon	6180	60	34	741
Zaire	40,900	32.8	36	740
Zambezi	6980	48	15	1033

O aporte sedimentar para a bacia é o produto da produção sedimentar pela área de captação de drenagem, assim, rios com grande captação têm mais sedimento sendo transportado.

Transporte de sedimentos

- Rios
- Geleiras
- Vento
- Correntes costeiras e marinhas

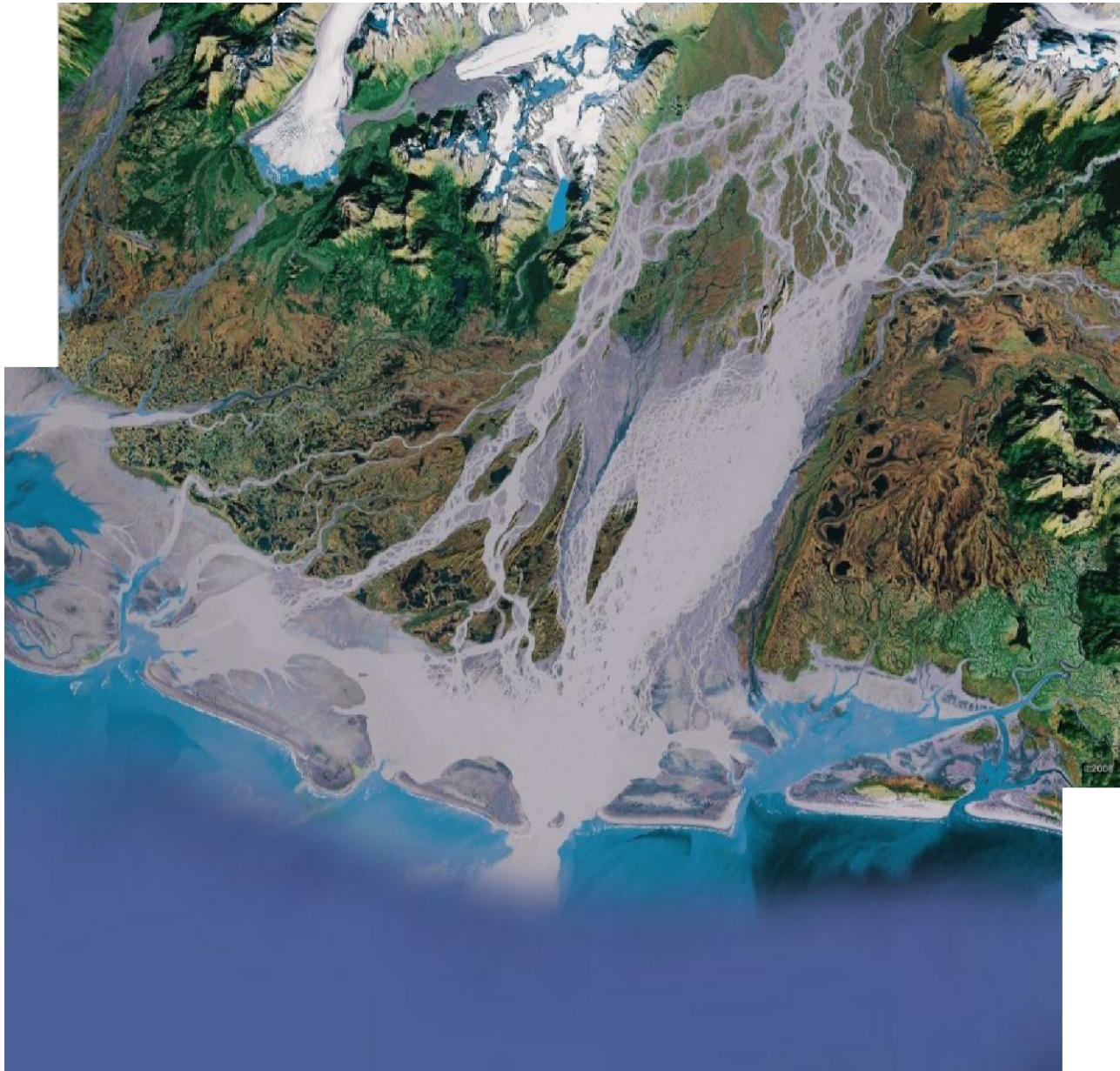






Image © 2006 TerraMetrics

5 km

© 2005 Google



Image © 2006 TerraMetrics

10 km

© 2005 Google™

Pointer 11°47'45.12" N 15°26'21.45" W elev 3 m

Streaming ||||| 100%

Eye alt 185.20 km



Image © 2006 TerraMetrics



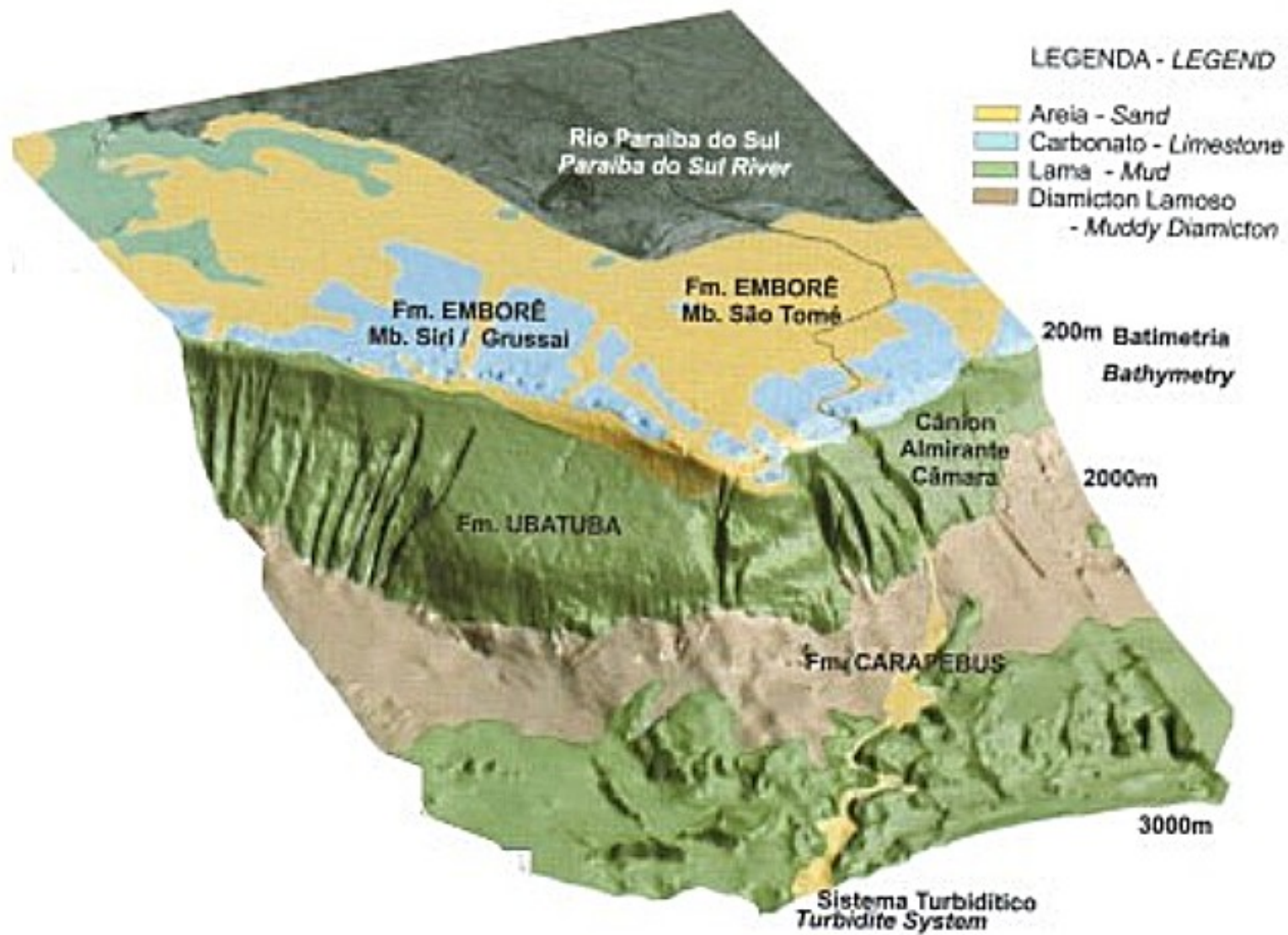


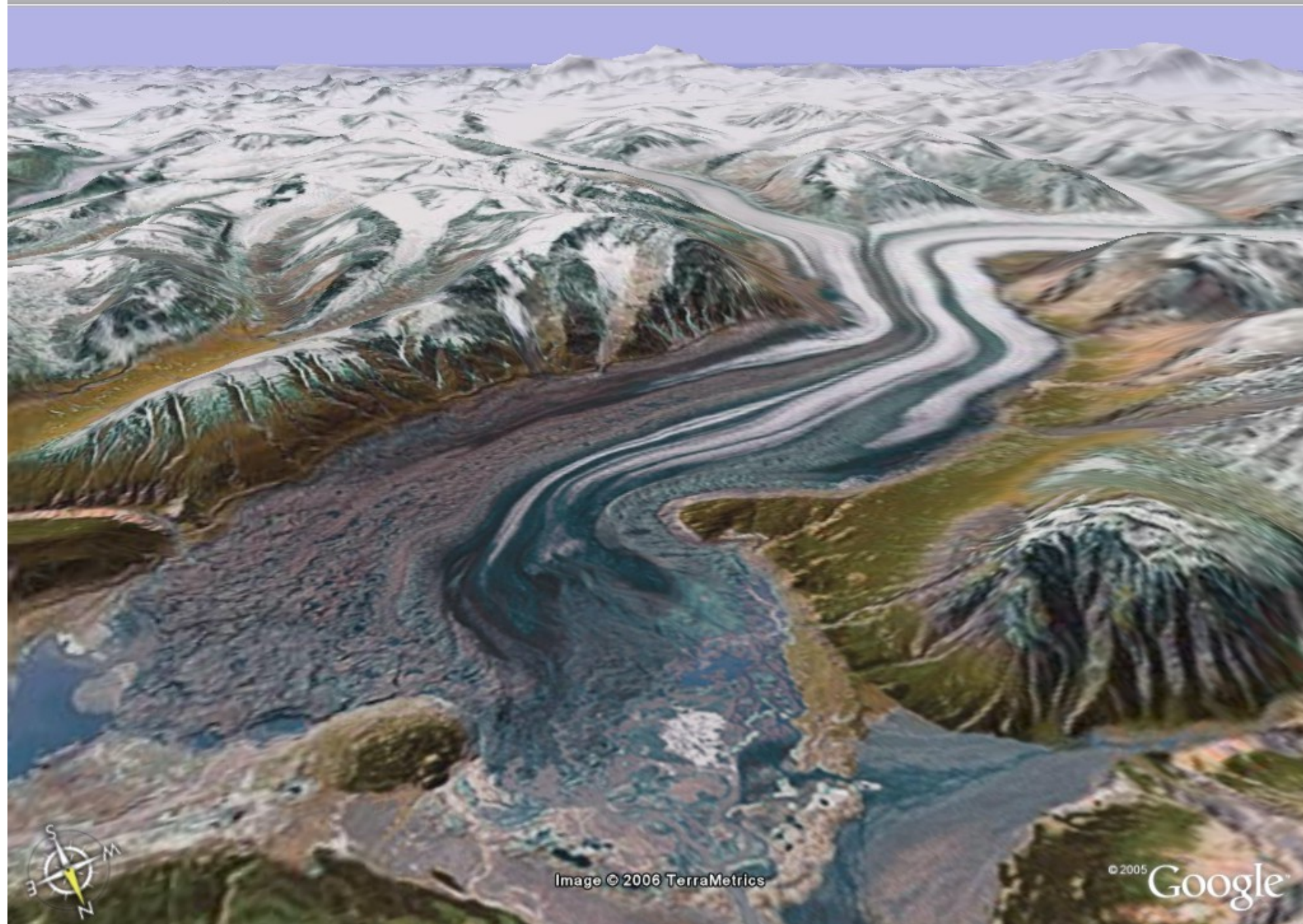
10 km

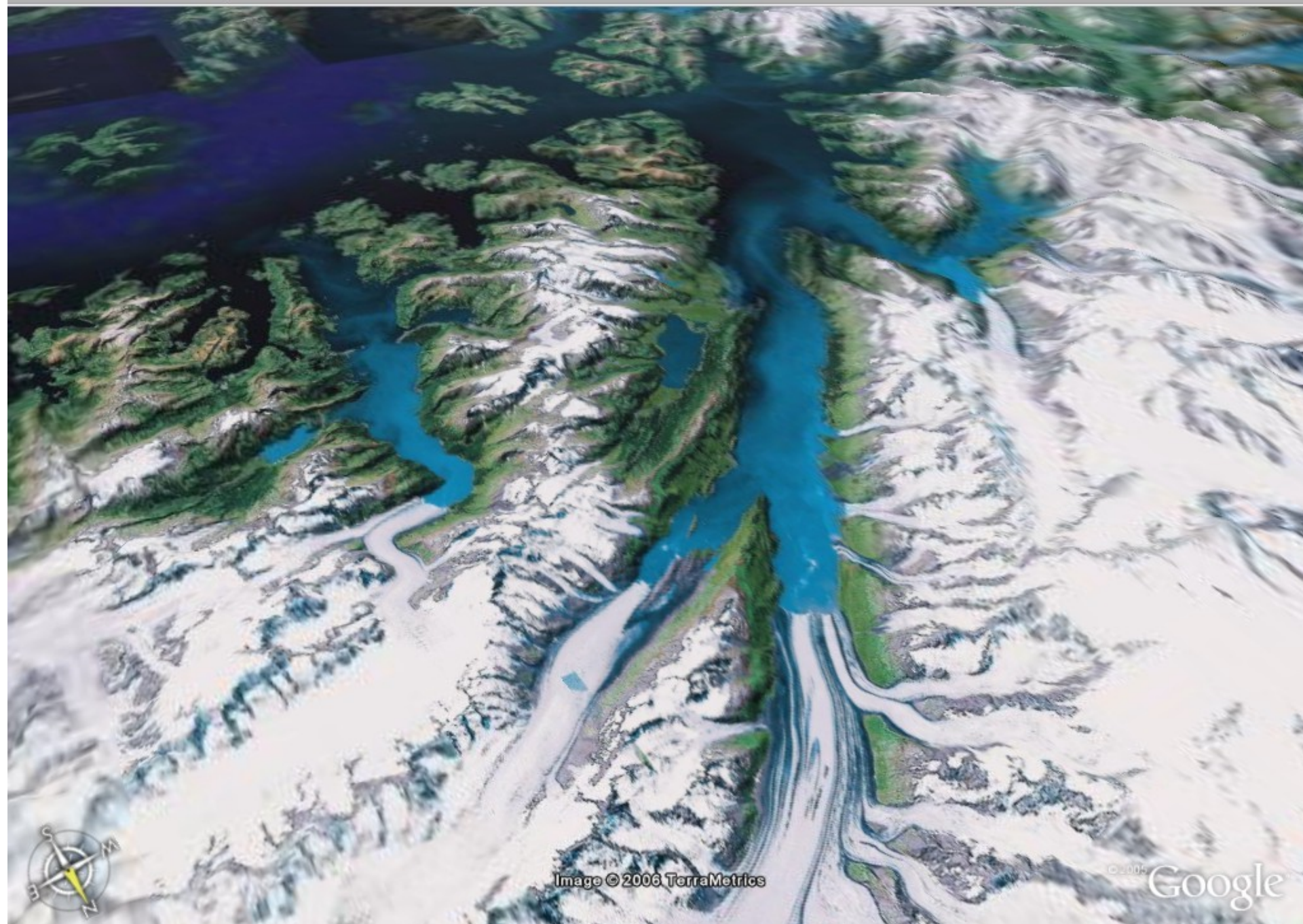


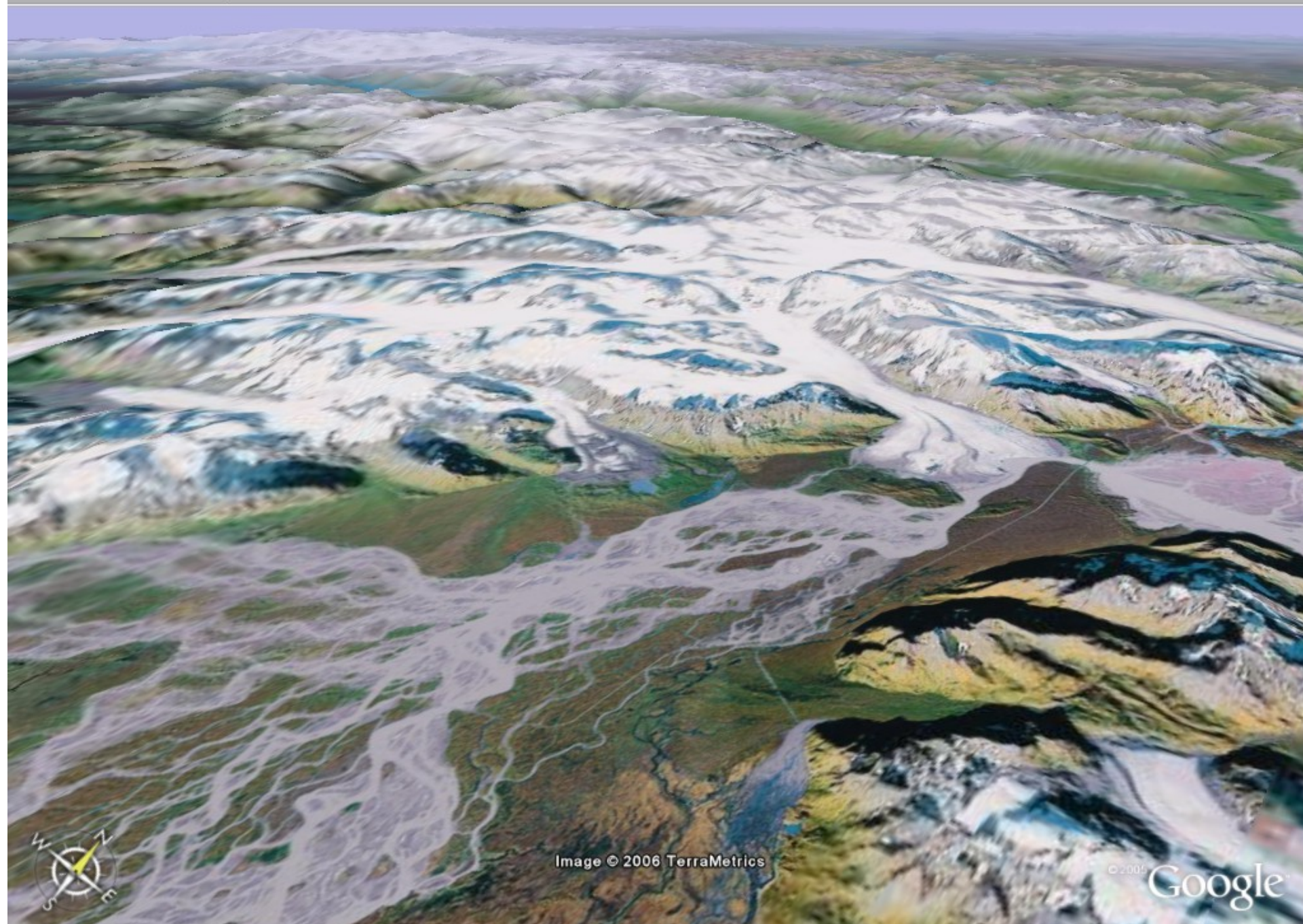
Image © 2006 TerraMetrics

© 2005 Google











Bah





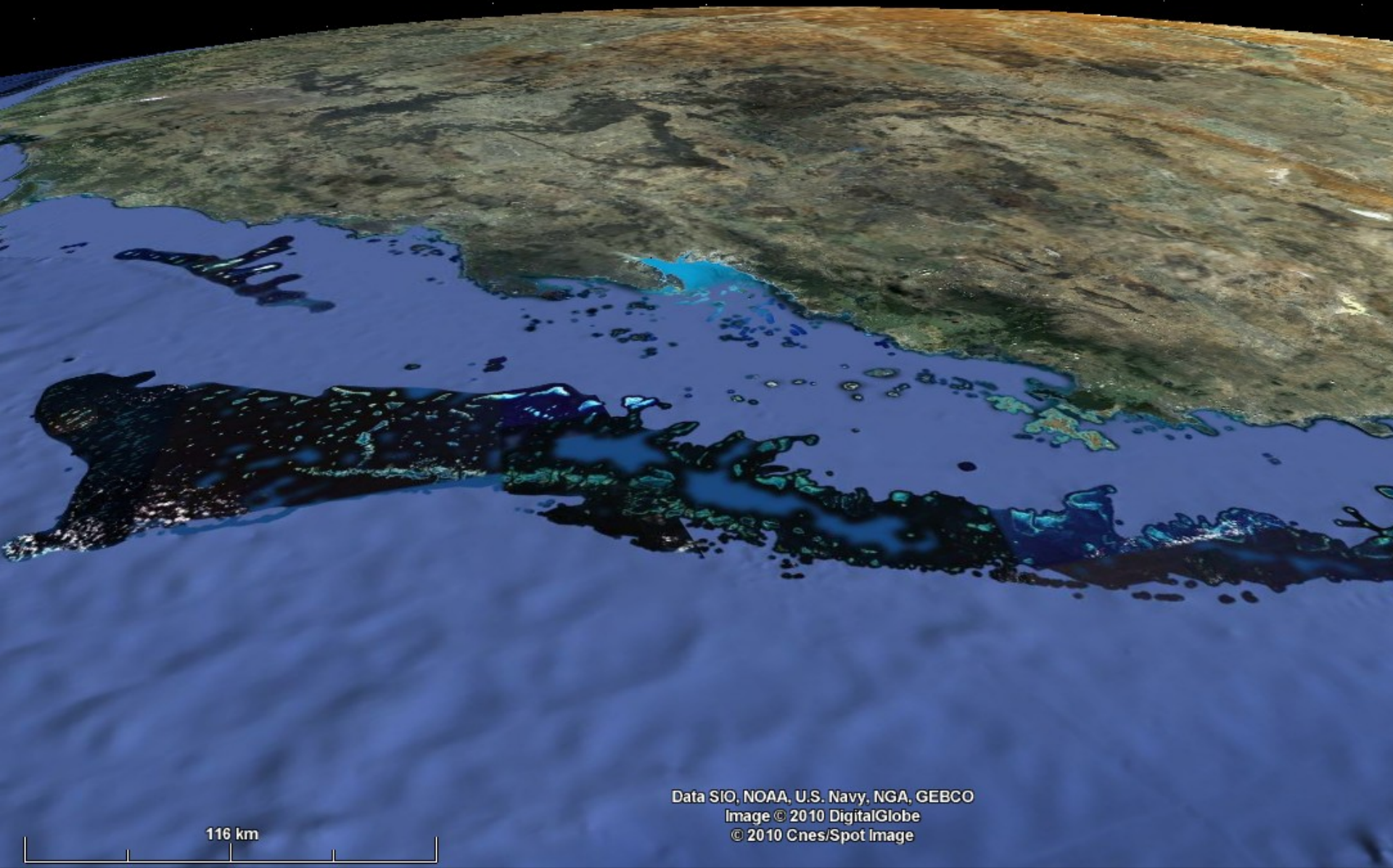
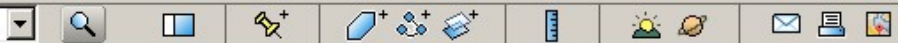
2010 m

19°05'50.25" S 12°37'14.08" L

Image © 2010 DigitalGlobe
© 2010 Cnes/Spot Image
Image © 2010 TerraMetrics
Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO

elev 94 m

5 A



Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO
Image © 2010 DigitalGlobe
© 2010 Cnes/Spot Image

116 km

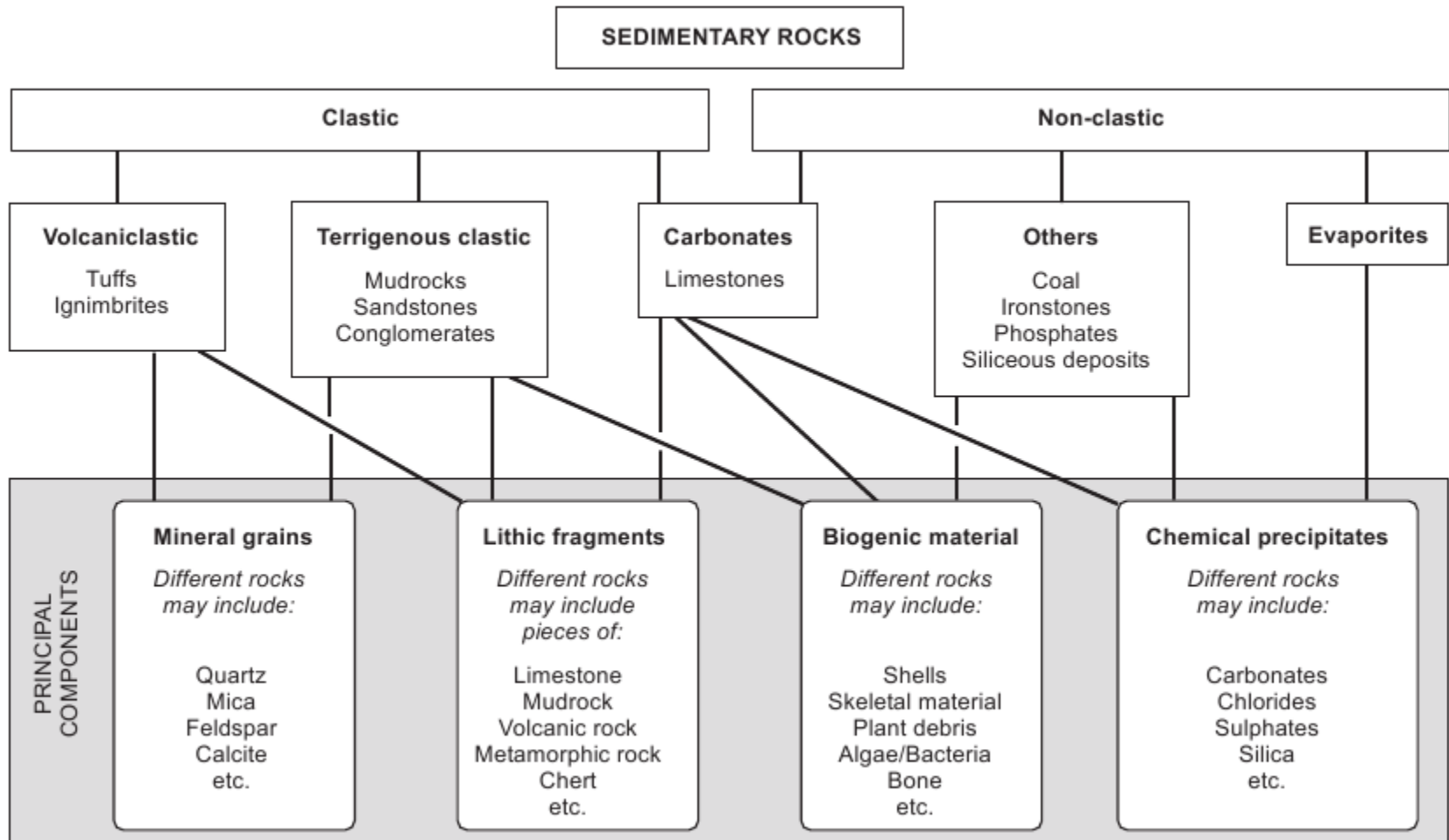
20°48'22.49" S 149°45'55.22" L

elev 0 m

Altitude d

4. Sedimentos e Rochas Sedimentares

Sedimentos e rochas sedimentares



Sedimentos autóctones

Sedimentos biogênicos



Estromatólitos

Sedimentos biogênicos



Recifes de corais

Sedimentos ortoquímicos





Evaporitos

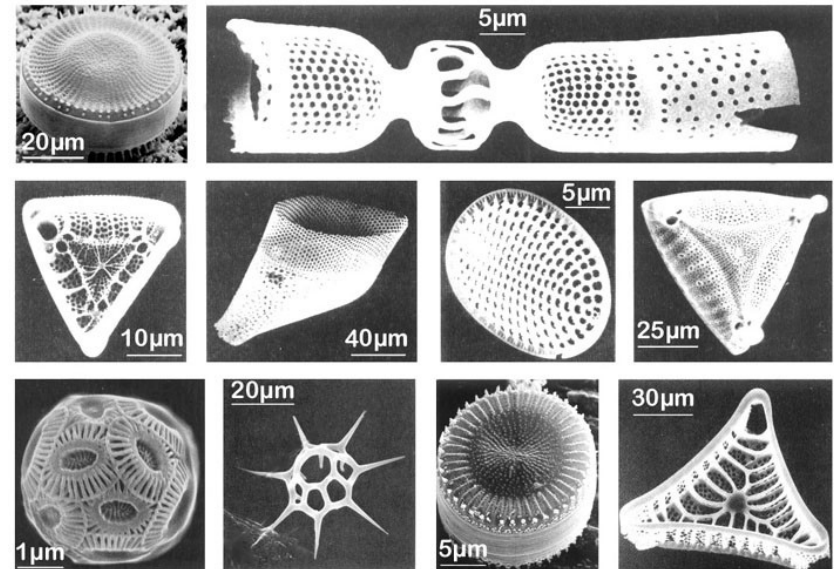
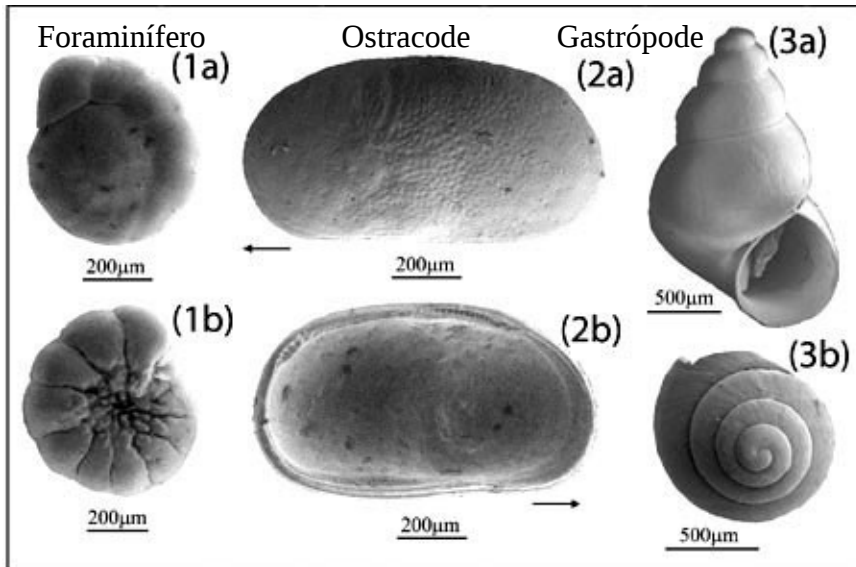
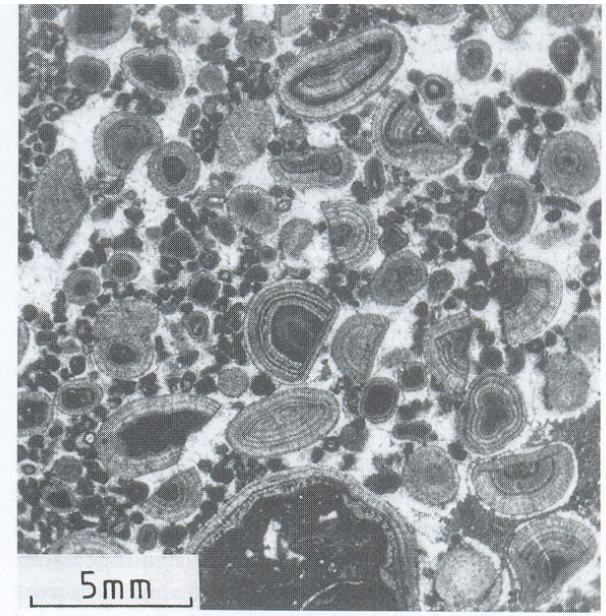
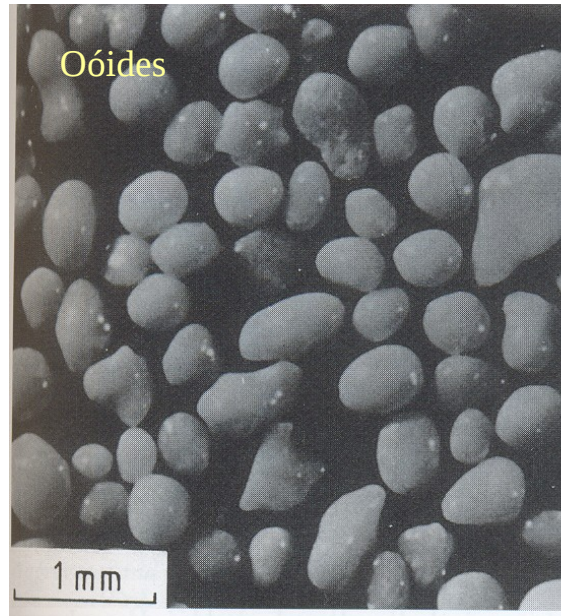
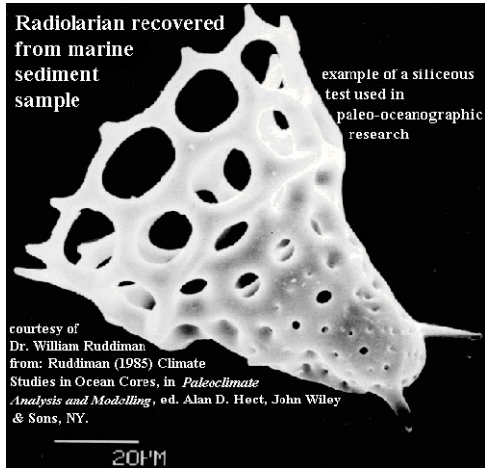


(c)

Evaporitos

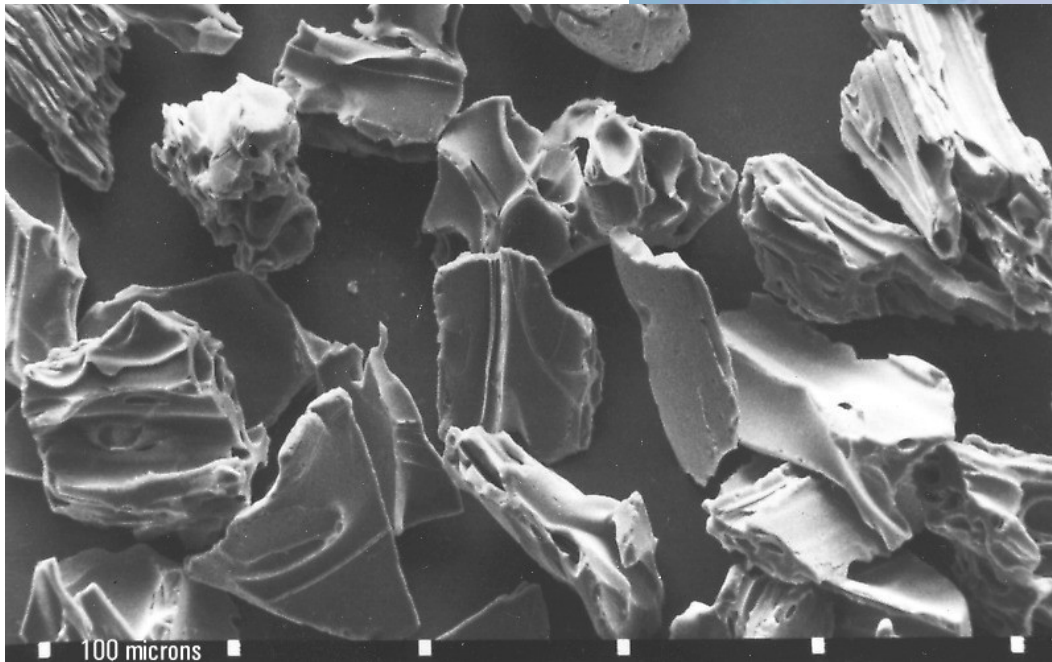
Sedimentos alóctones

Sedimentos alobioquímicos



Selection of planktonic diatoms (not representative for the mediterranean)

Sedimentos vulcanoclásticos



Vidro vulcânico

Sedimentos terrígenos



Univ. of Georgia
Department of
Geology

260
Sample number

1 cm



Quais os critérios utilizados para descrever os sedimentos terrígenos?

Mineralogia e textura

Principais componentes

- Silicatos
 - Quartzo*
 - Feldspato*
 - Minerais pesados (zircão, turmalina, estauroлита, anfibólios, piroxênios, ...)
 - Argilominerais (caulinita, esmectita, ilita, clorita...)*
- Fragmentos de rocha
- Óxidos (hematita, rutilo, magnetita, etc.)

O que determina a mineralogia dos sedimentos terrígenos?



Praia de Biondi (Austrália)



Equador



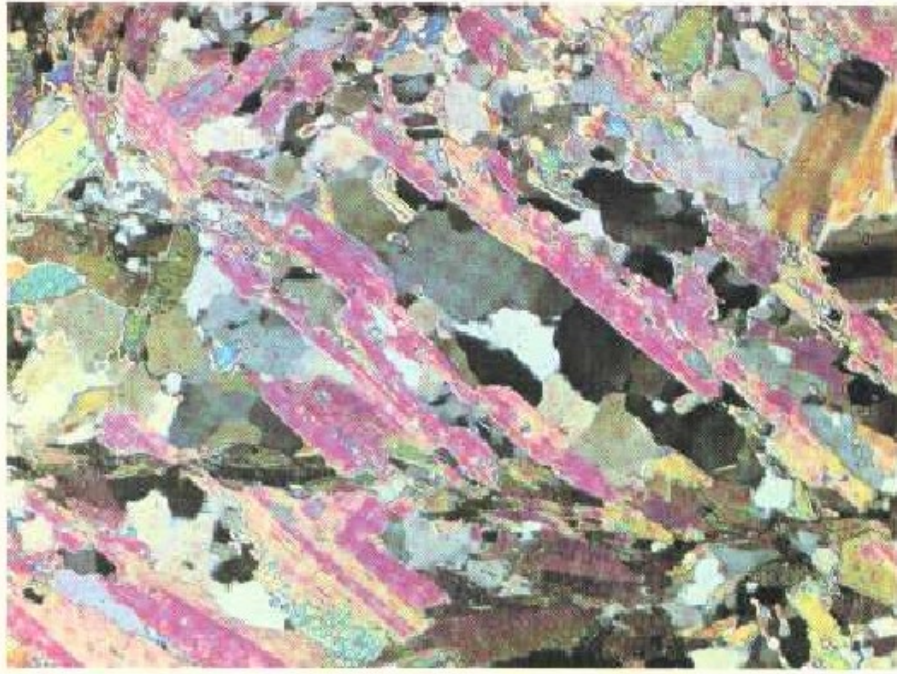
Islândia

Fontes graníticas

10 cm



Fontes Metmórficas

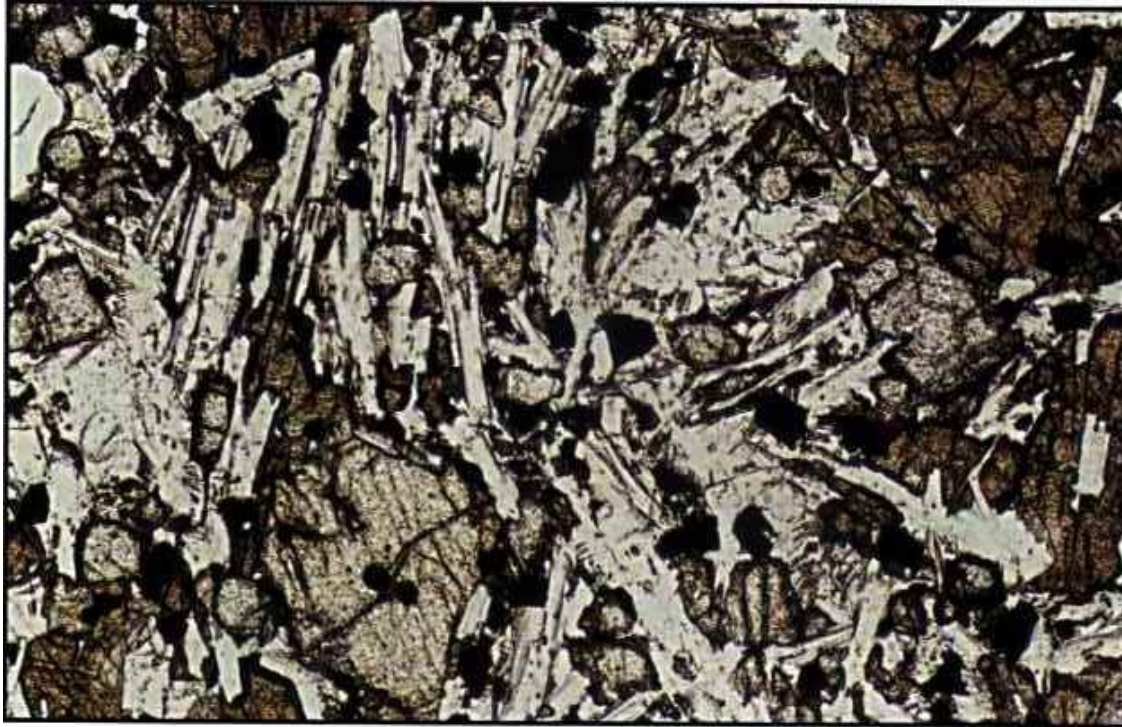


0.3 mm



5 cm

Fontes vulcânicas

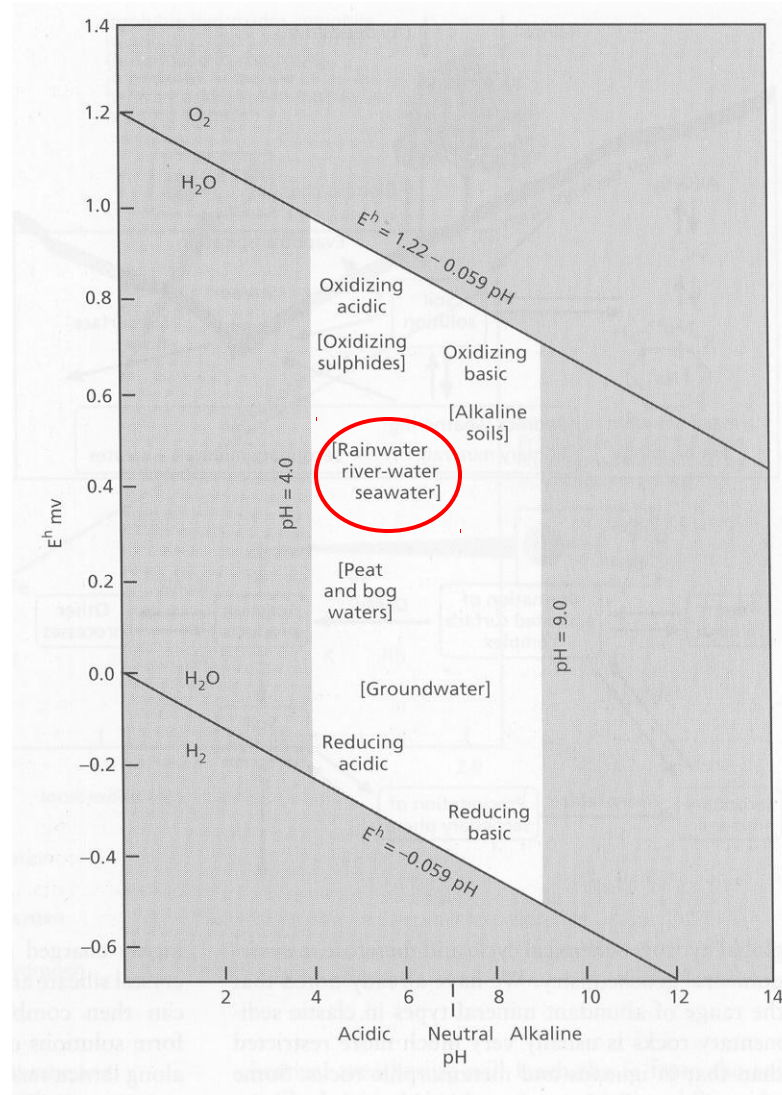


0.3 mm

Arenito



0.3 mm



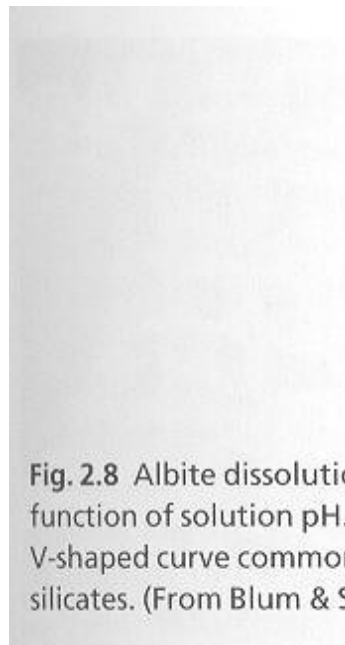
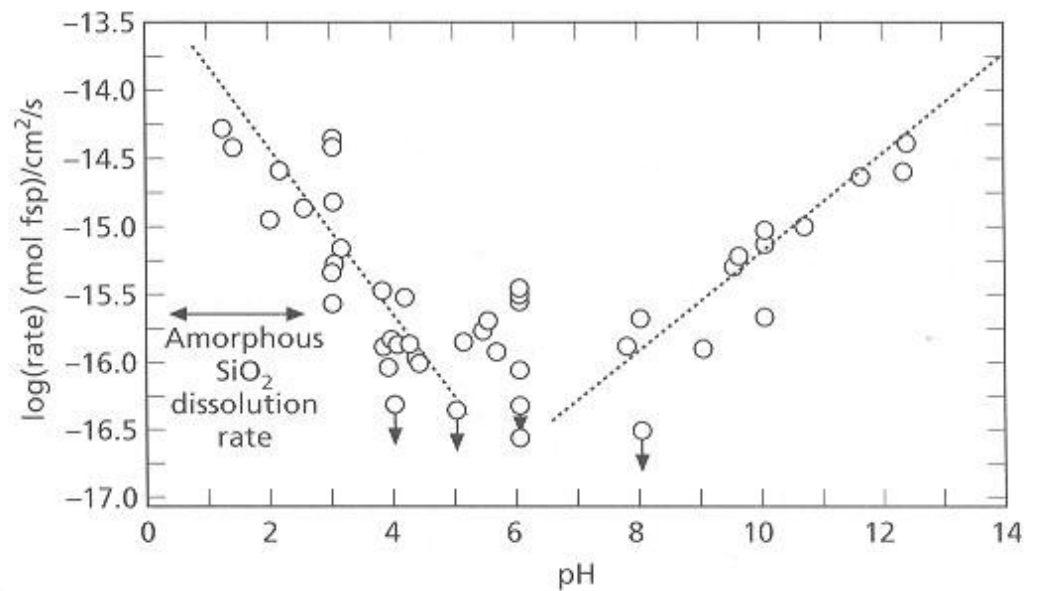
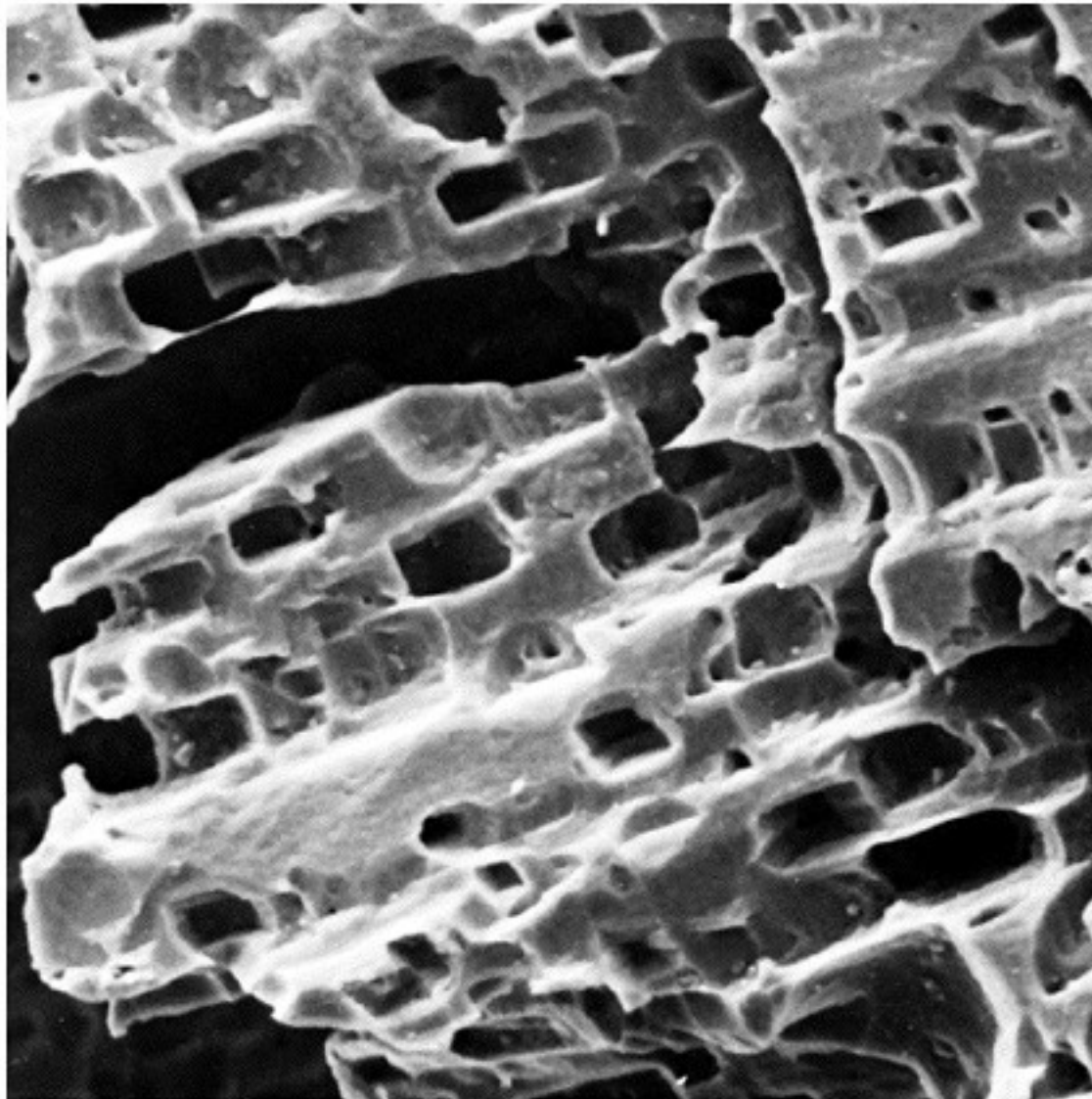
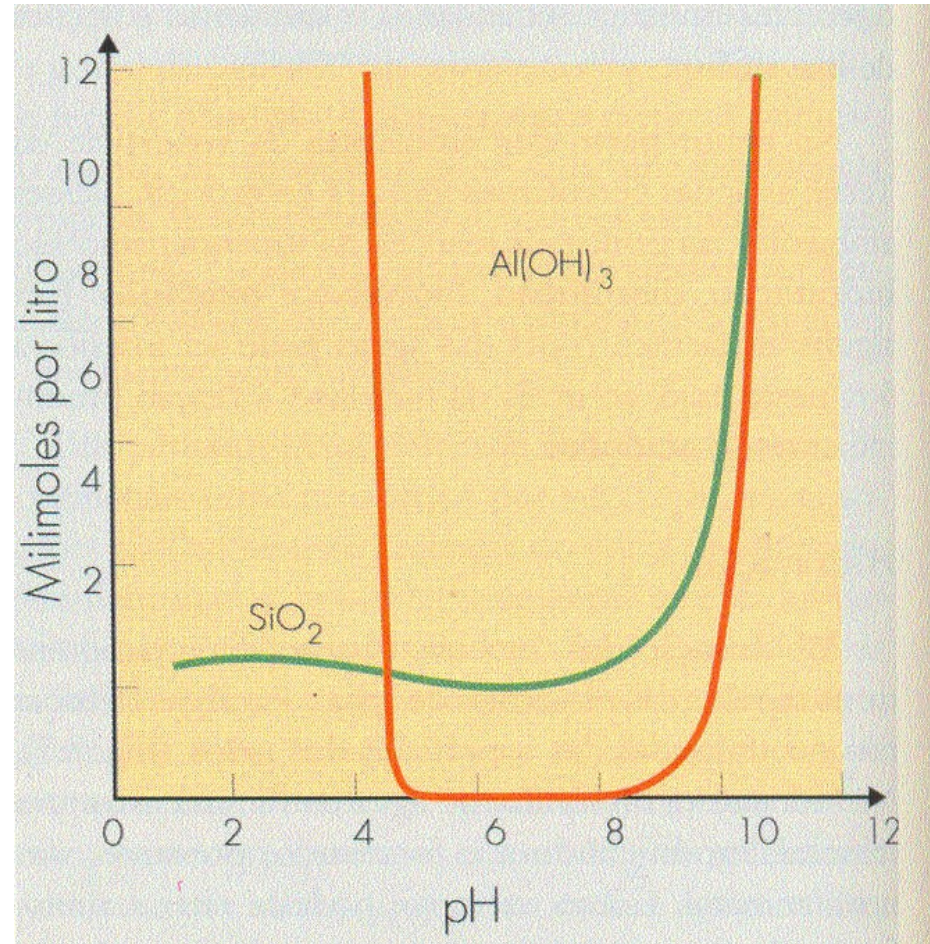


Fig. 2.8 Albite dissolution rate as a function of solution pH. Note the V-shaped curve common to many silicates. (From Blum & Stillings, 1995.)






Solubilidade de sílica e alumina



**Table
6.2**

**Stability of Common Minerals
Under Weathering**

Stability of Minerals	Rate of Weathering
Most stable	Slowest
Iron oxides (hematite)	
Aluminum hydroxides (gibbsite)	
Quartz	
Clay minerals	
Muscovite mica	
Potassium feldspar (orthoclase)	
Biotite mica	
Sodium-rich feldspar (albite)	
Amphiboles	
Pyroxene	
Calcium-rich feldspar (anorthite)	
Olivine	
Calcite	
Halite	
Least stable	

**Table
31**

**Some Common Minerals
of Igneous, Sedimentary,
and Metamorphic Rocks**

Igneous Rocks	Sedimentary Rocks	Metamorphic Rocks
Quartz*	Quartz*	Quartz*
Feldspar*	Clay minerals*	Feldspar*
Mica*	Feldspar*	Mica*
Pyroxene*	Calcite	Garnet*
Amphibole*	Dolomite	Pyroxene*
Olivine*	Gypsum	Staurolite*
	Halite	Kyanite*

Asterisks indicate that a mineral is a silicate.

Table 2.3 Relative rates of dissolution of various minerals in laboratory experiments at pH 5 far from equilibrium. (From Drever & Clow, 1995, and sources cited therein; see also Sverdrup & Warfvinge, 1995, table 20.)

Mineral	Rate/rate for albite
Quartz	0.02
Muscovite (mica)	0.22
Biotite (mica)	0.6
Microcline (K-feldspar)	0.6
Sanidine (K-feldspar)	2
Albite (Na-plagioclase)	1
Bytownite (Na/Ca-plagioclase)	15
Enstatite (orthopyroxene)	57
Diopside (clinopyroxene)	85
Forsterite (Mg-olivine)	250
Dolomite	360 000
Calcite	6000 000

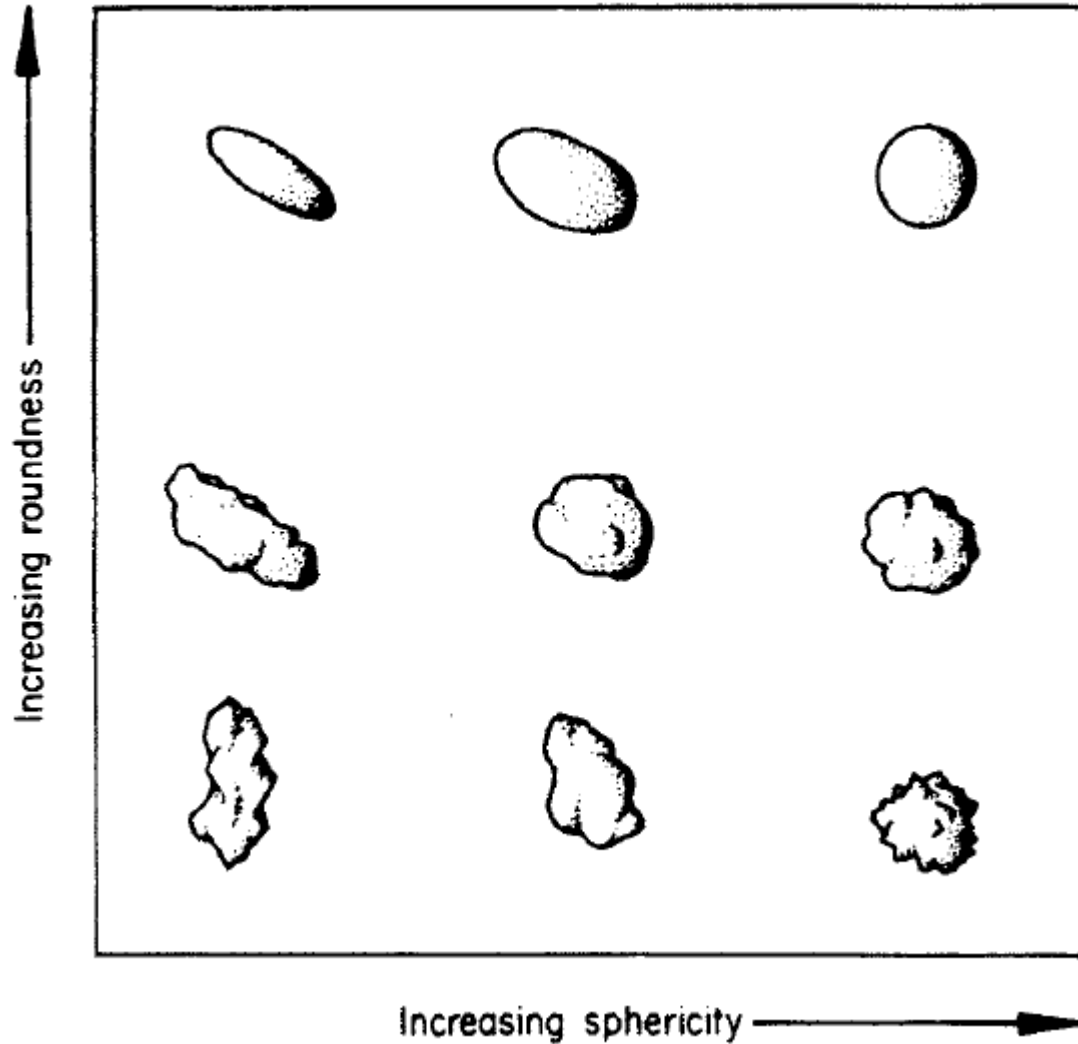
O que é textura?



Granulação

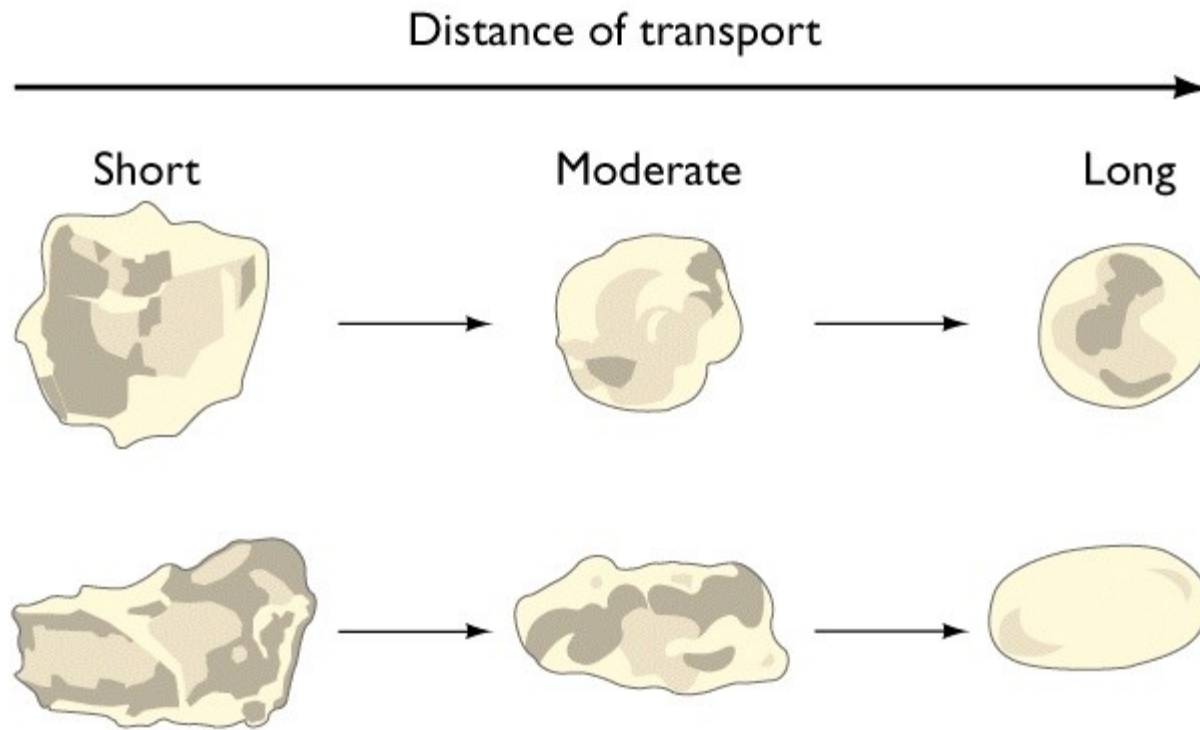
Intervalo granulométrico (mm)	Classificação nominal			
	Proposição original (inglês)		Tradução usual (português)	
> 256	GRAVEL	Boulder	CASCALHO (ou balastro em Portugal)	Matacão
256-64		Cobble		Bloco ou calhau
64-4,0		Pebble		Seixo
4,0-2,0		Granule		Grânulo
2,0-1,0	SAND	Very coarse sand	AREIA	Areia muito grossa
1,0-0,50		Coarse sand		Areia grossa
0,50-0,250		Medium sand		Areia média
0,250-0,125		Fine sand		Areia fina
0,125-0,062		Very fine sand		Areia muito fina
0,062-0,031	SILT	Coarse silt	SILTE	Silte grosso
0,031-0,016		Medium silt		Silte médio
0,016-0,008		Fine silt		Silte fino
0,008-0,004		Very fine silt		Silte muito fino
<0,004	CLAY	Clay	ARGILA	Argila

Esfericidade e arredondamento

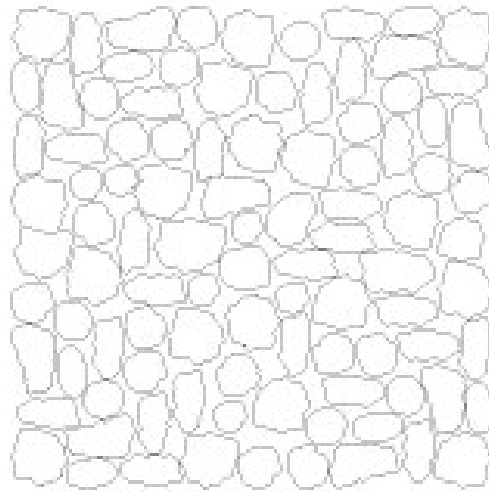


Selley (2000)

O que determina a textura dos
sedimentos?

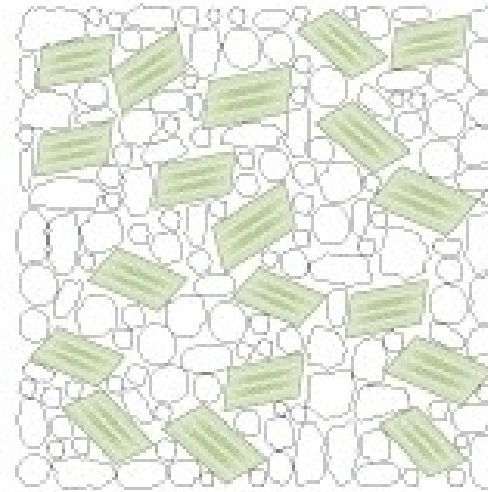


Maturidade mineralógica



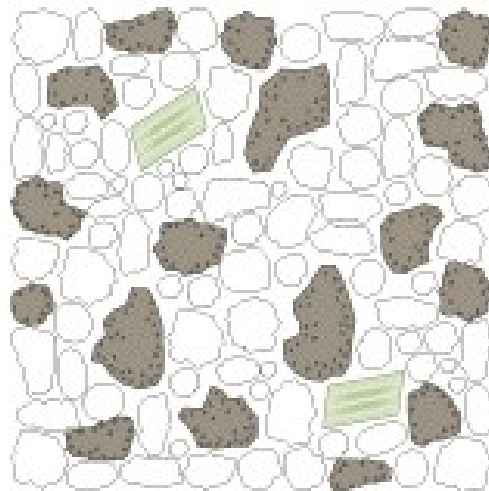
(a) Quartz arenite:
pure quartz

1 mm



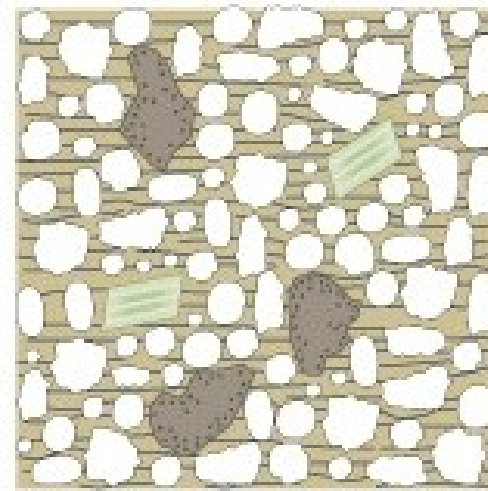
(b) Arkose:
feldspar-rich

1 mm



(c) Lithic sandstone:
rock-fragment-rich

1 mm

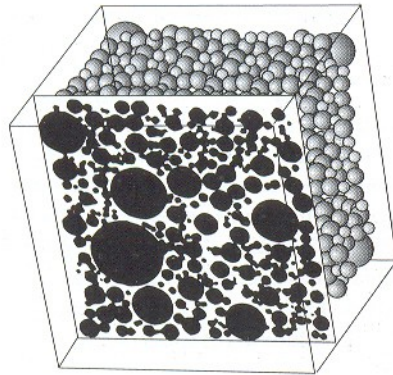


(d) Graywacke:
matrix-rich

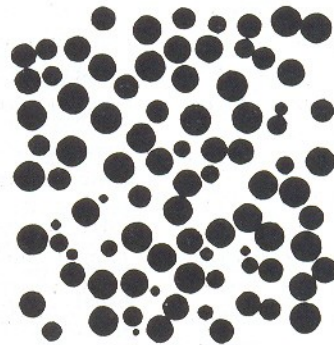
1 mm

Maturidade textural

Seleção

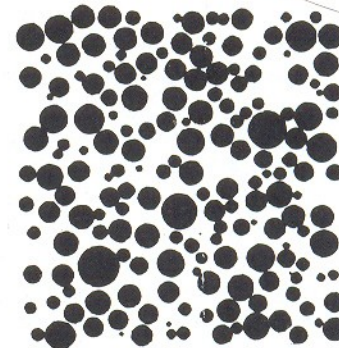


3-D dataset



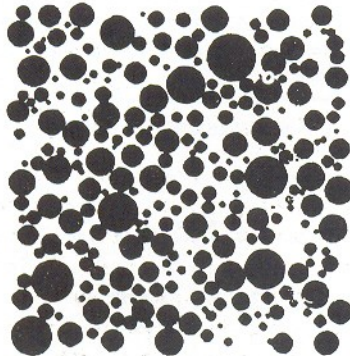
Very well sorted

$\phi = 0.0$



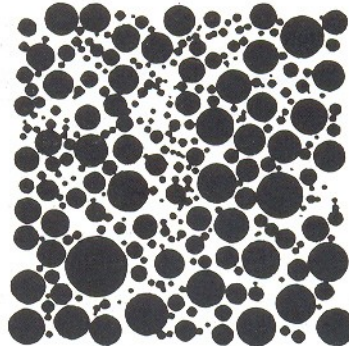
Well sorted

$\phi = 0.36$



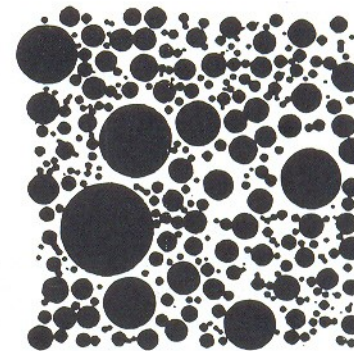
Moderately well sorted

$\phi = 0.67$



Moderately sorted

$\phi = 0.74$



Poorly sorted

$\phi = 1.15$

Arredondamento

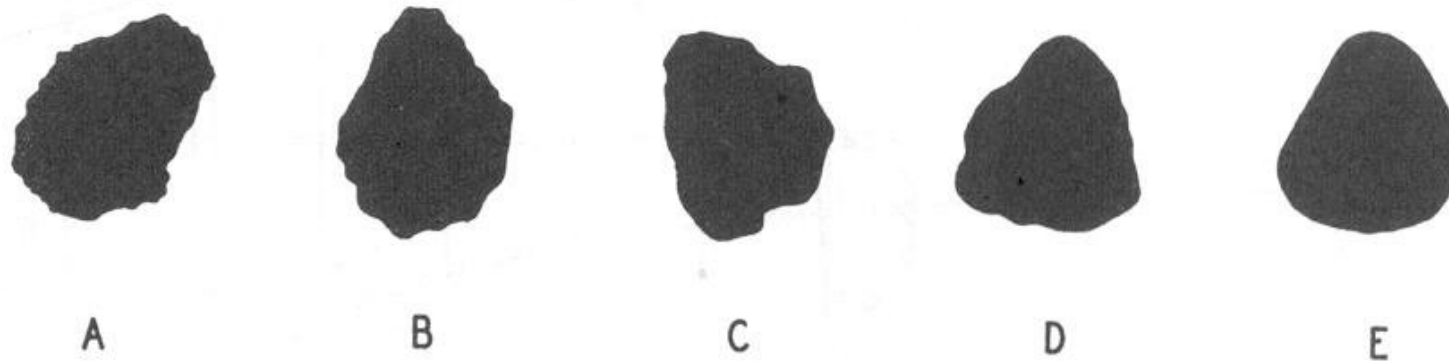
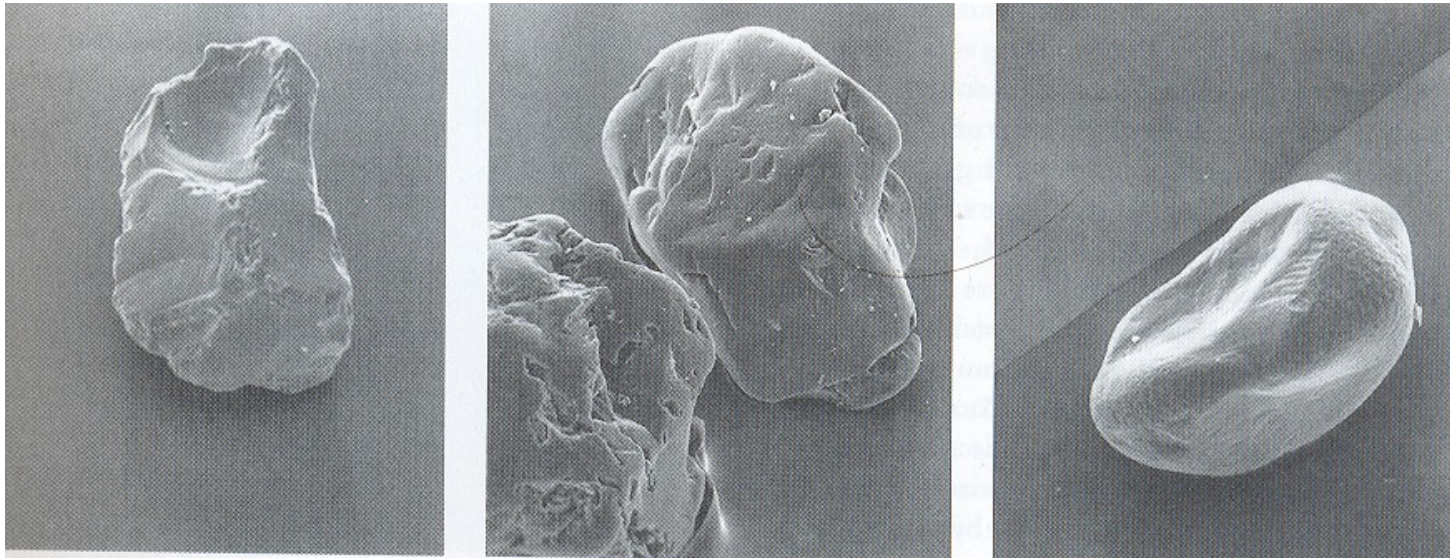
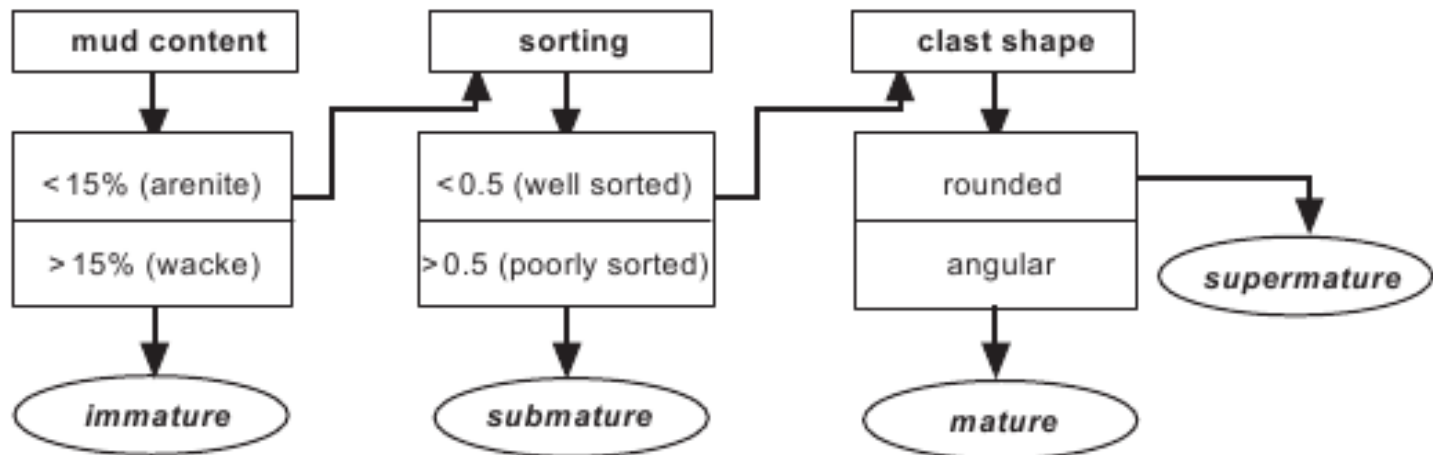


FIG. 3-24. Roundness classes. A: angular; B: subangular; C: subrounded; D: rounded; E: well rounded.



TEXTURAL MATURITY OF SANDSTONES



Nichols 2009

Qual a maturidade?



Qual sedimento apresenta maior maturidade textural?



Sumário

- Tipos de sedimentos
 - Autóctones (biogênicos e químicos)
 - Alóctones (alobioquímicos, terrígenos e alobioquímicos)
- Sedimentos terrígenos
 - Mineralogia
 - Textura
 - Maturidade textural
 - Maturidade mineralógica

Fontes bibliográficas:

Allen, P. A. & Allen, J. R. Basin analysis – principles and applications Blackwell Publishing, 2005, 549 pp.

Brookfield, M. E. Principles of Stratigraphy Blackwell Publishing, 2004, 340 pp.

Leeder, M. R. Sedimentology and sedimentary basins: from turbulence to tectonics Blackwell, 1999, 531pp.

Nichols, G. Sedimentology and Stratigraphy Wiley-Blackwell, 2009, 419 pp.

Selley, R. C. Applied Sedimentology 2000, 521 pp.