

Rochagem no manejo da fertilidade do solo e seu impacto na mitigação de gases de efeito estufa

Eder de Souza Martins

Geólogo, Dr. – Ciências do Solo e Geomorfologia

Pesquisador da Embrapa

Professor de Pós-Graduação da UnB

Bolsista de Produtividade do CNPq

eder.martins@embrapa.br

61-3388 9803, 3388 9870

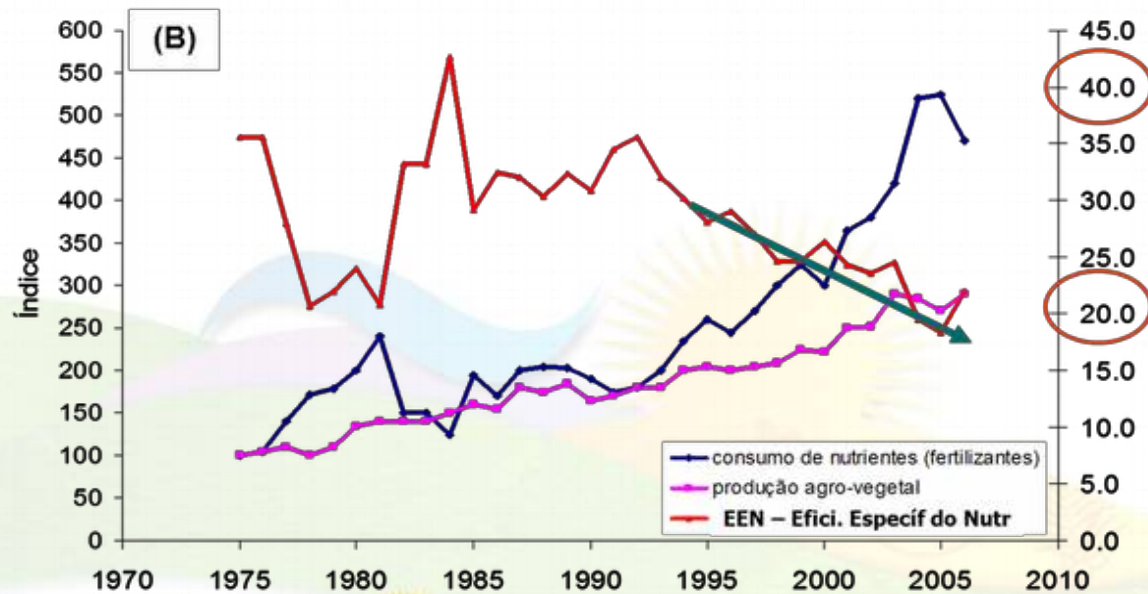
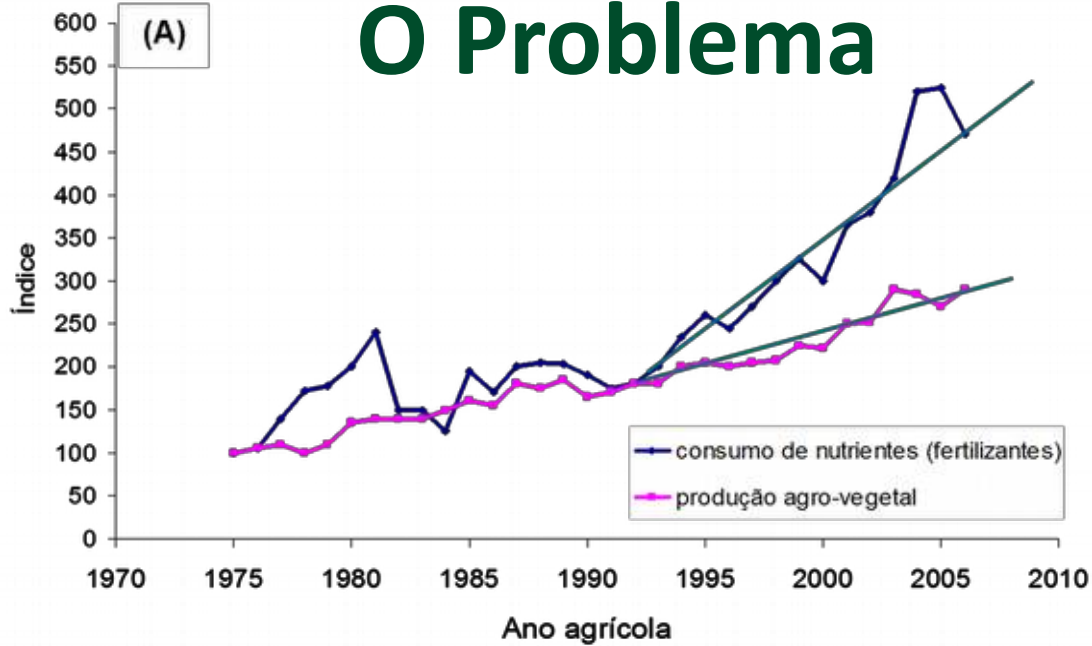


Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento

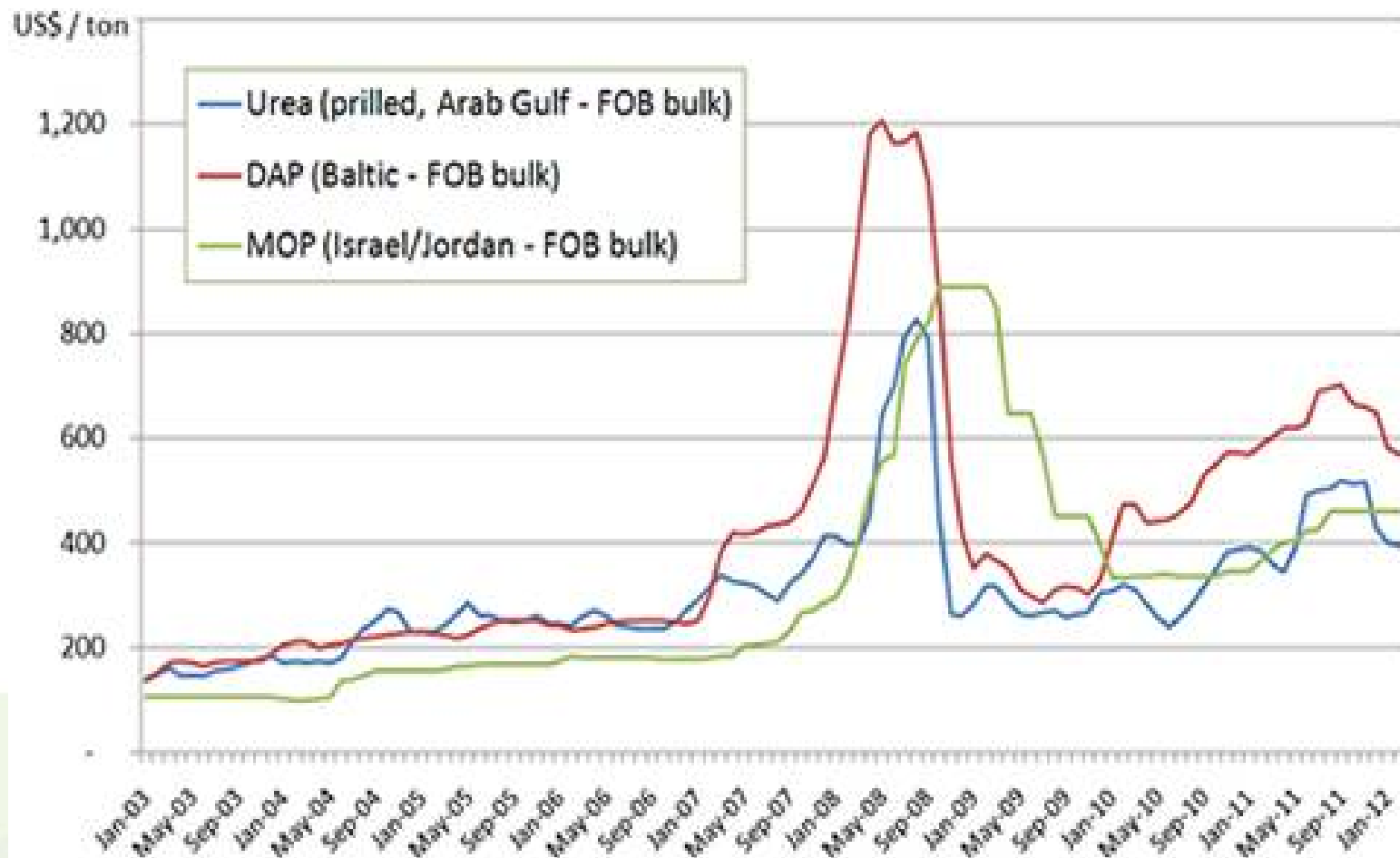


- Base Conceitual
- Potencial da Rochagem no Sequestro de C

O Problema

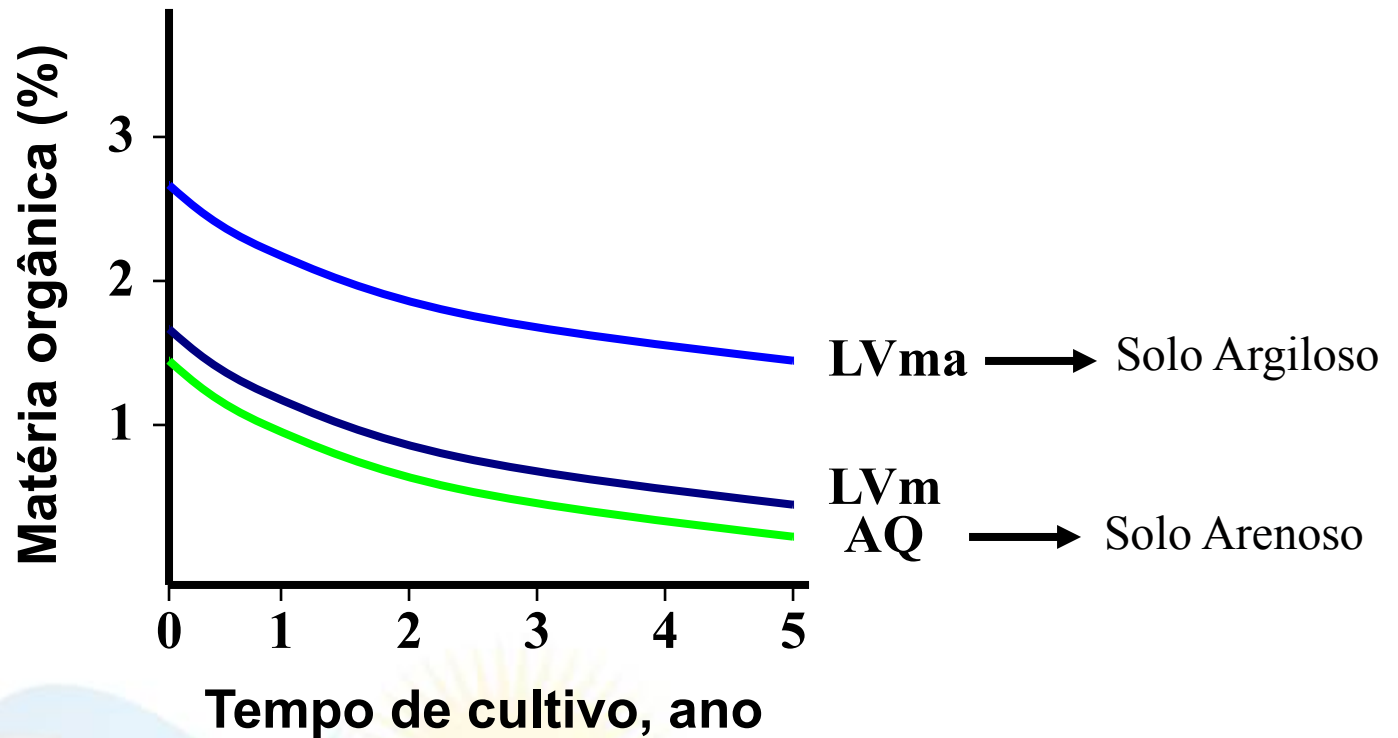


O Problema



Source: ICIS Pricing

O Problema



Redução (MO)
AQ - 80%
LVm - 76%
LVma - 41%

Fonte: Silva et al. (1994)

ROCHAGEM (ingl. *stonemeal*)

**Uso de rochas cominuídas como condicionadores
de solo e fontes de nutrientes para solos
agrícolas**

Definições

Classe de ânion		Tipo de rochas*	Cations principais	Cobertura da crosta (% área) ¹⁰	Solubilidade em água
Carbonato	CO ₃ ²⁻	Calcário (sedimentar) ¹ Carbonatito (ígneo) ² Mármore (metamórfico) ³	Ca, Mg	10,0	Alta
Sulfato	SO ₄ ²⁻	Depósitos evaporíticos (sedimentar) ⁴	Ca	0,0	Muito alta
Fosfato	PO ₄ ³⁻	Fosforito (sedimentar) ⁵ Foscorito (ígneo) ⁶	Ca	0,0	Baixa
Silicato	SiO ₄ ⁴⁻	Sedimentar ⁷ Ígneo ⁸ Metamórfico ⁹	Ca, Mg, K	90,0	Muito baixa

*Exemplos de pesquisa com agrominerais *in natura*: ¹Sousa et al. (1989); ²Andrade et al. (2002); ³Raymundo et al. (2013); ⁴Freire et al. (2014); ⁵Chaves et al. (2013); ⁶Resende et al. (2006); ⁷Lopes (1971); ⁸Mancuso et al. (2014); ⁹Duarte et al. (2012).
¹⁰Scoffin (1987).

AGROMINERAL SILICÁTICO

Agromineral derivado de minerais silicáticos
como matéria prima para condicionadores
de solo e fontes de nutrientes

Agromineral silicático *in natura*



Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento

Dissolução de condicionadores de solo

Dissolução congruente

Dissolução total; todos os componentes dissolvidos em água

- ☐ *Calcário* – CO_4^{2-} , Ca^{2+} e Mg^{2+}
- ☐ *Gesso* – SO_4^{2-} e Ca^{2+} (Mg^{2+} , K^+)
- ☐ *Silicato* – H_3SiO_4^- e Ca^{2+} (Mg^{2+})
- ☐ *Aluminossilicato* - H_3SiO_4^- e Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+

Dissolução congruente
Dissolução total

Dissolução incongruente
Dissolução parcial

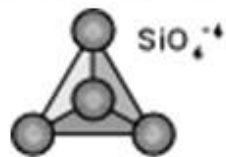
Dissolução incongruente

Dissolução parcial de H_3SiO_4^- e Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ ; formação de argilominerais 2:1;

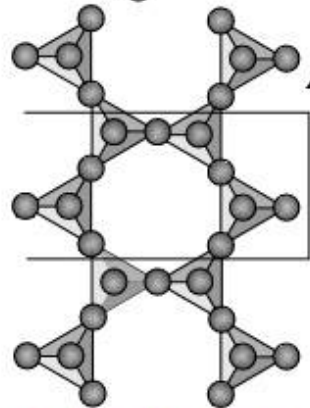
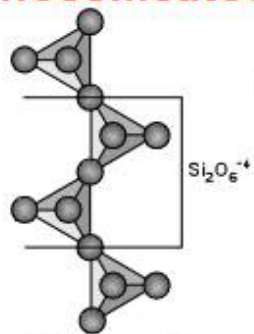
Alta CTC e elevada carga negativa permanente

nesossilicatos

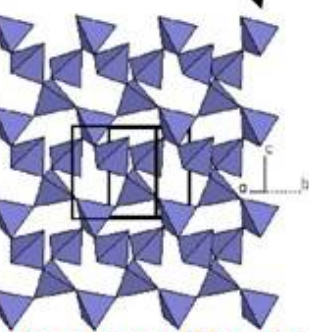
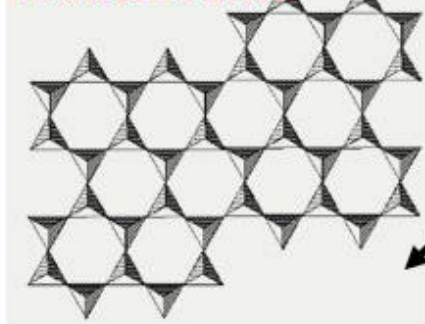
Estabilidade VS Estrutura Cristalina



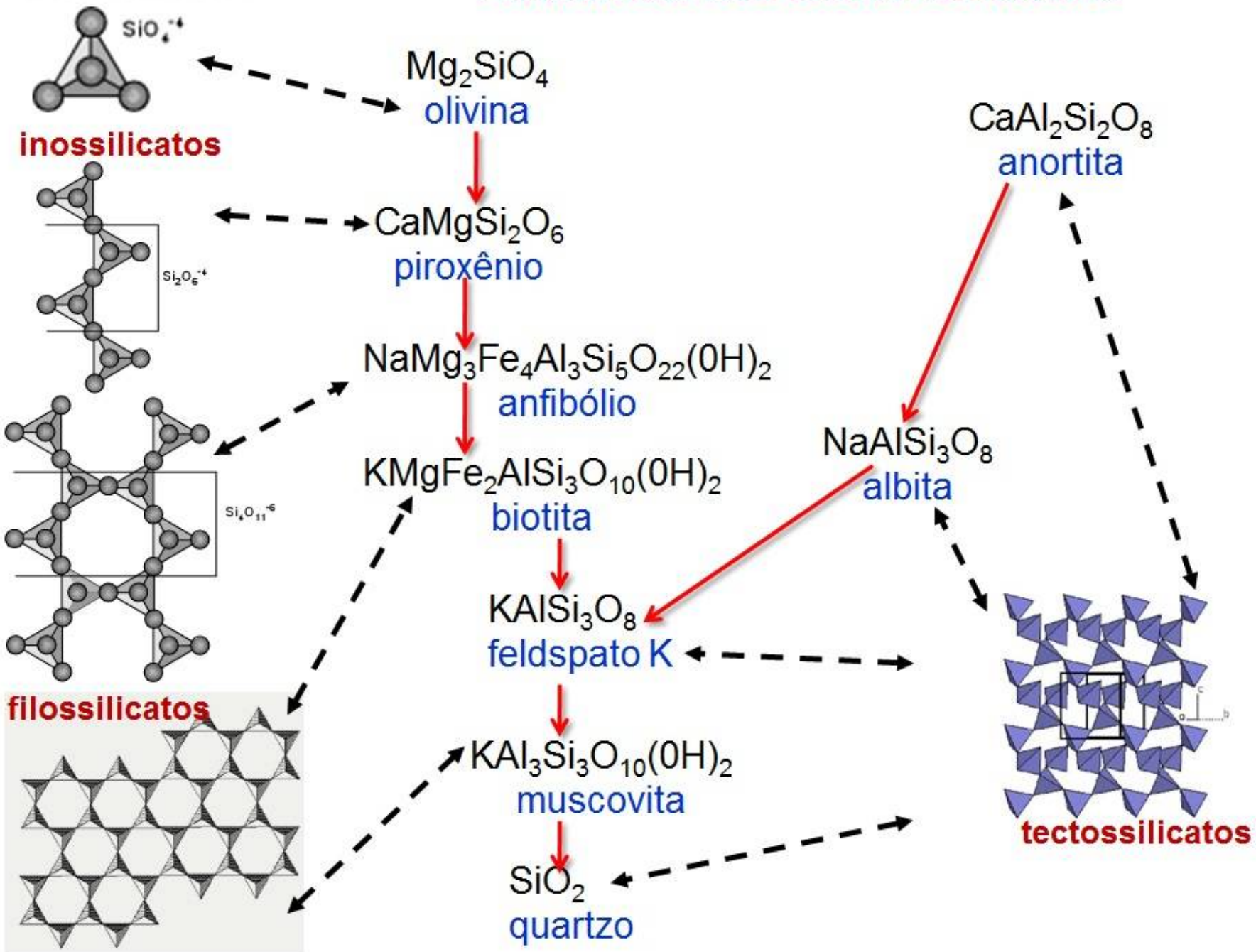
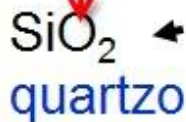
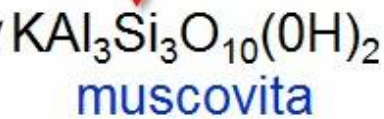
inosilicatos



filossilicatos



tectosilicatos

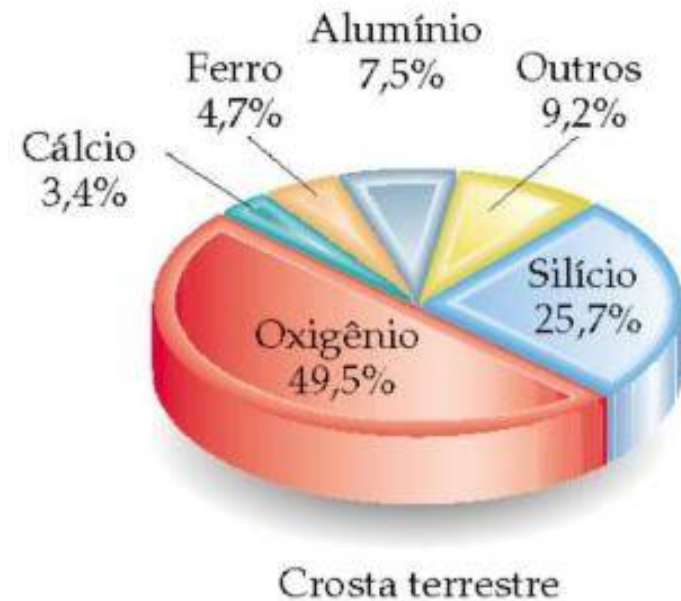
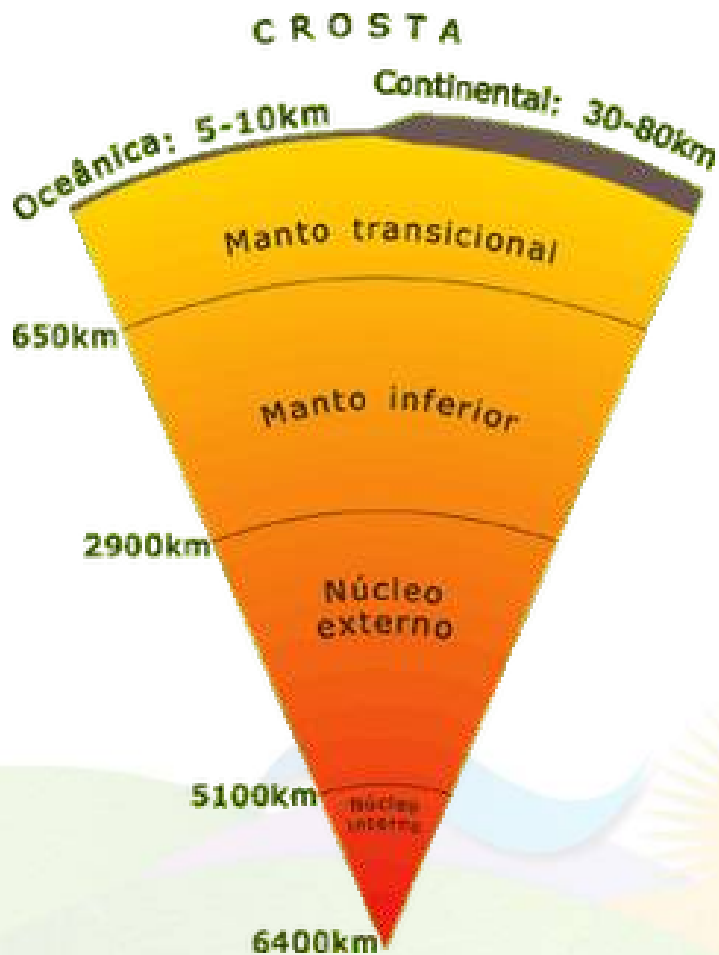


Química Total

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
Rocha	%									
VERDETE	58,18	15,44	6,70	2,52	0,08	0,06	9,78	0,92	0,04	0,12
GRANITO	57,09	12,99	5,37	3,46	5,73	1,29	4,23	0,46	1,37	0,15
ULTRAMAFICA	32,49	7,16	14,08	18,53	12,99	1,71	3,10	2,87	1,22	0,22
CARBONATITO	8,36	0,96	8,46	10,81	32,85	0,06	1,39	1,57	5,60	0,22
BIOTITA XISTO	52,74	10,45	10,15	13,91	5,27	0,86	2,07	0,45	0,06	0,18
LATOSSOLO	39,18	33,10	7,52	0,02	<0,01	<0,01	0,01	2,27	0,02	<0,01

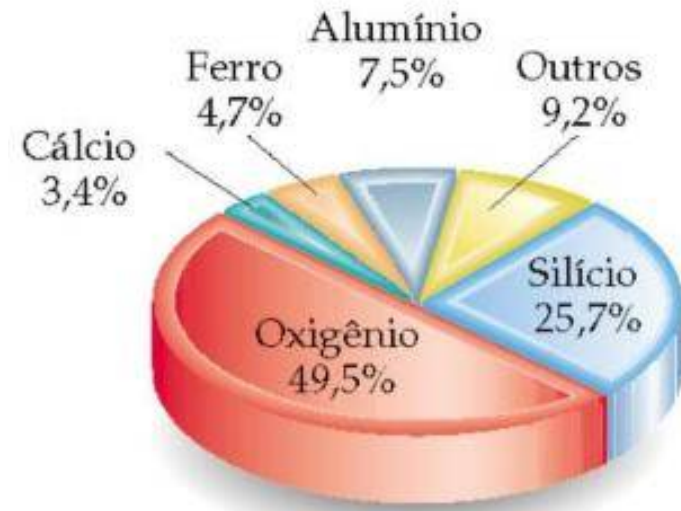
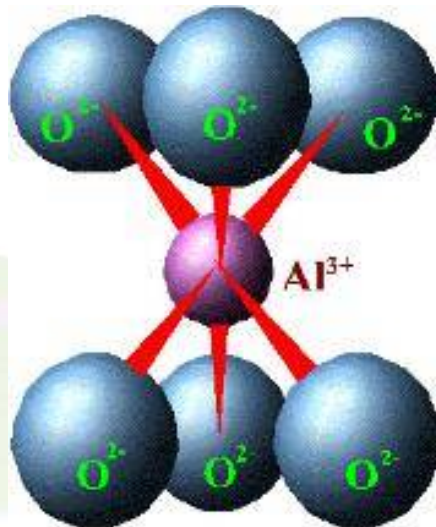
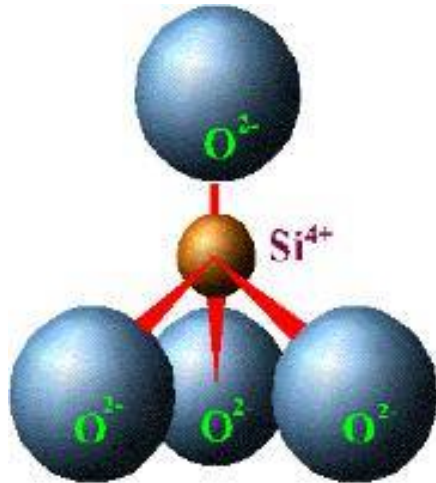
	Cu	Pb	Zn	Ni	As	Cd	Sb	Bi	Hg
Rocha	ppm								
VERDETE	25,6	9,9	40	48,2	0,5	<0,1	<0,1	<0,1	<0,01
GRANITO	123,1	16,4	47	50,4	0,7	0,1	<0,1	0,1	<0,01
ULTRAMAFICA	87,3	19,1	93	443,9	2,3	0,1	<0,1	0,2	<0,01
CARBONATITO	90,9	22,2	62	84,7	1,6	0,3	<0,1	0,1	<0,01
BIOTITA XISTO	53,9	10,3	151	93,3	0,6	<0,1	<0,1	0,3	<0,01
LATOSSOLO	14,0	39,9	7	4,3	7,3	<0,1	0,6	1,1	<0,01

Química Total



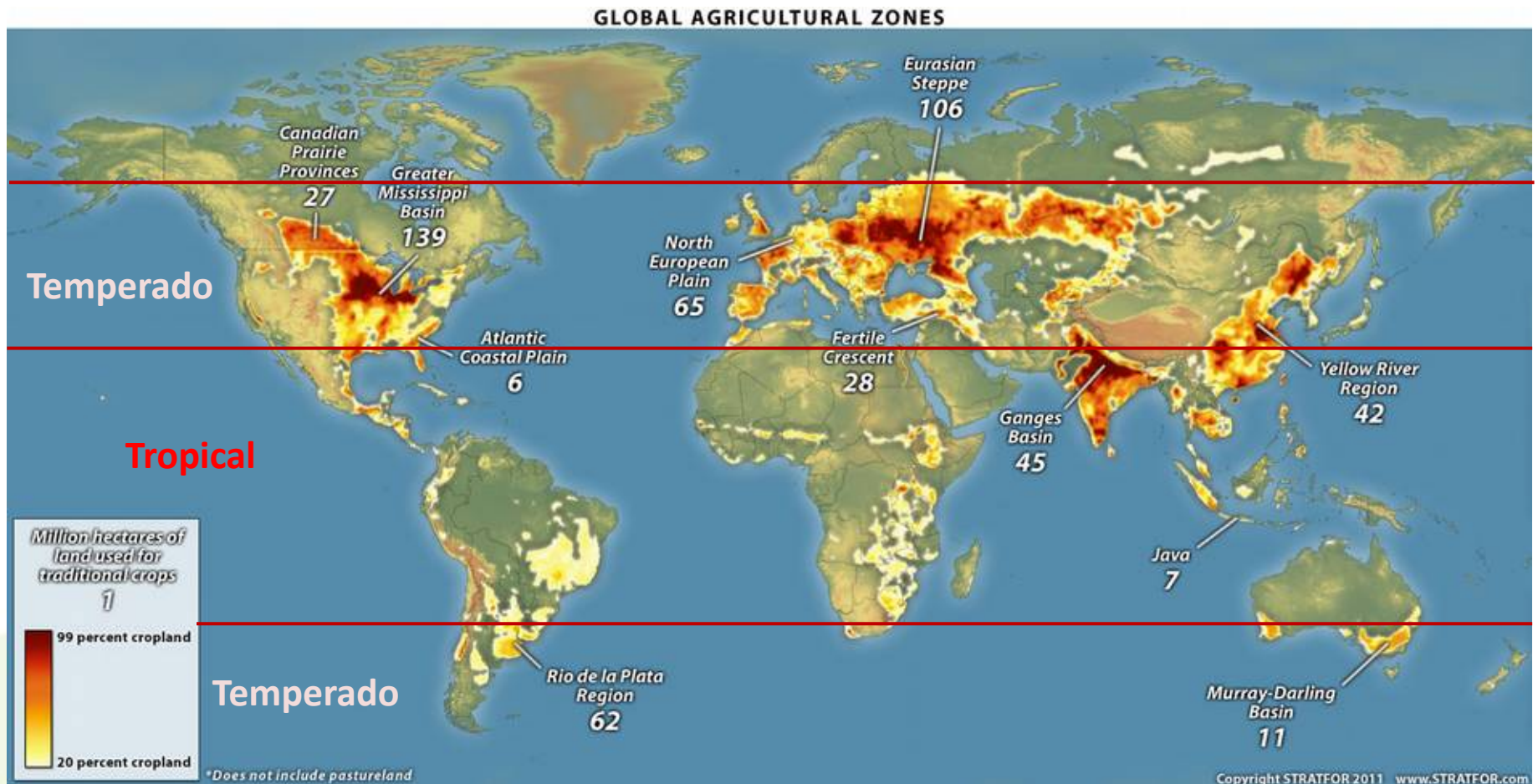
$$O + Si + Al = 82,4\%$$

Química Total

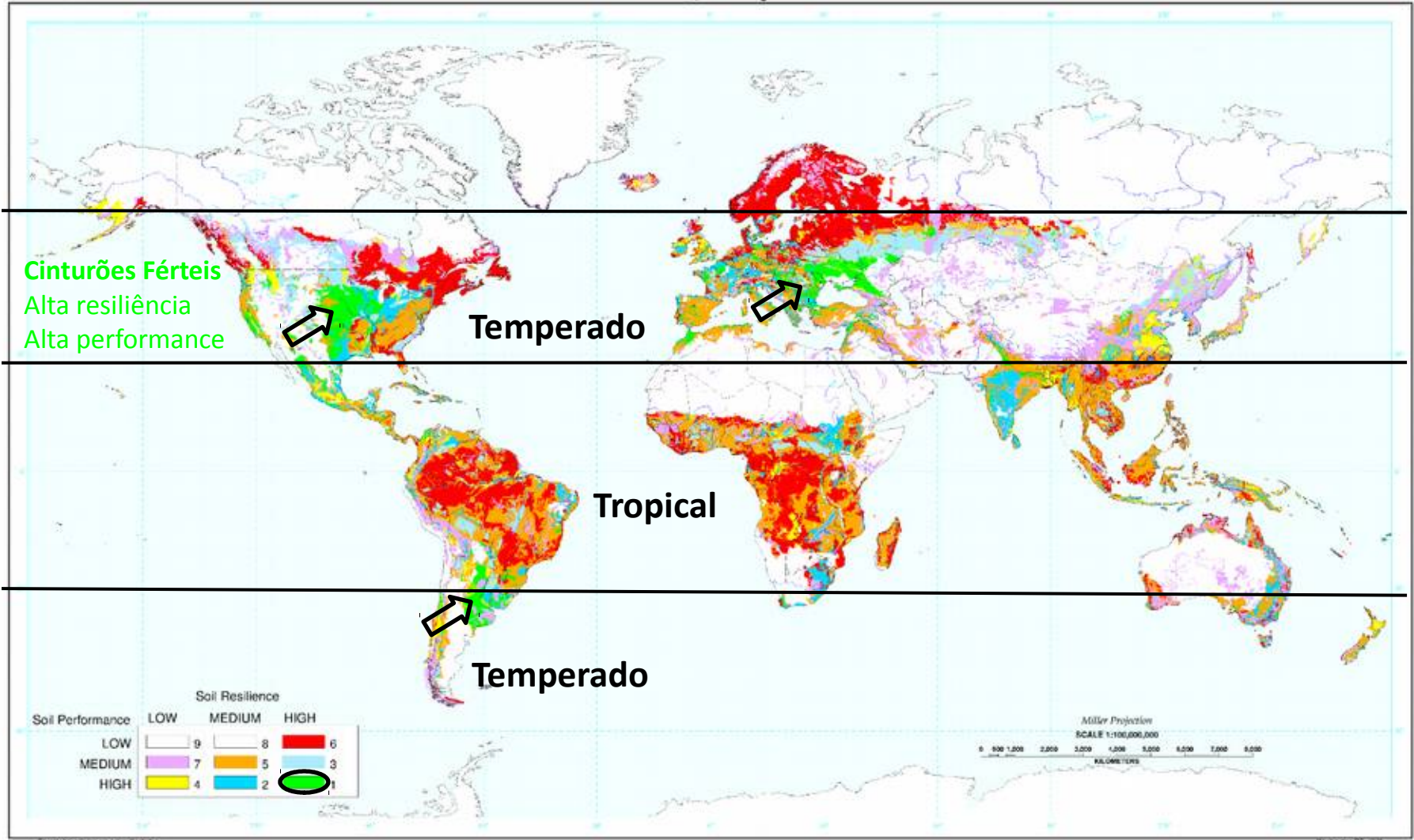


Crosta terrestre

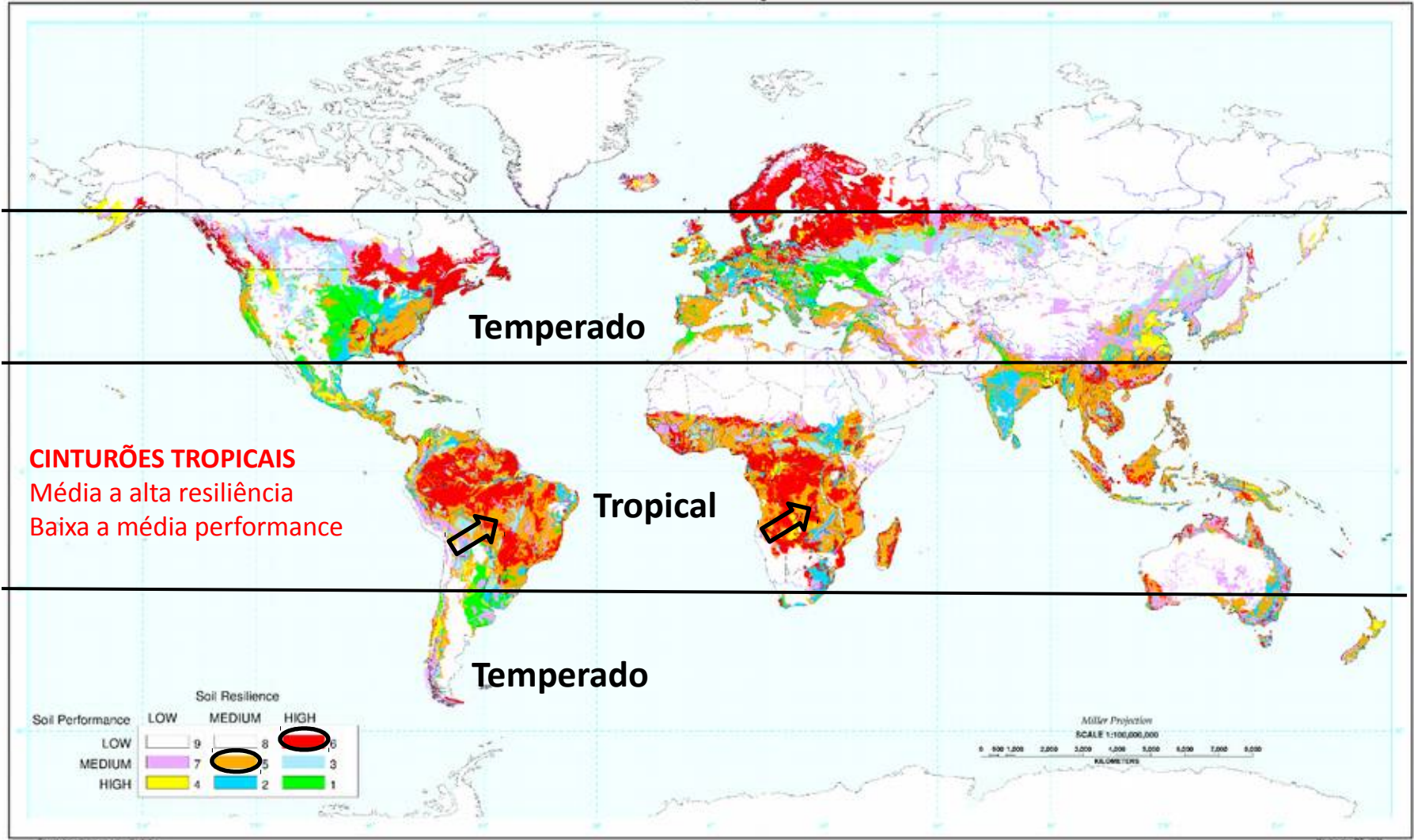
$$\text{O} + \text{Si} + \text{Al} = 82,4\%$$



Inherent Land Quality Assessment



Inherent Land Quality Assessment



CINTURÕES TROPICAIS
Média a alta resiliência
Baixa a média performance

Temperado

Tropical

Temperado

Solo tropical antigo *vs.* Solo temperado jovem

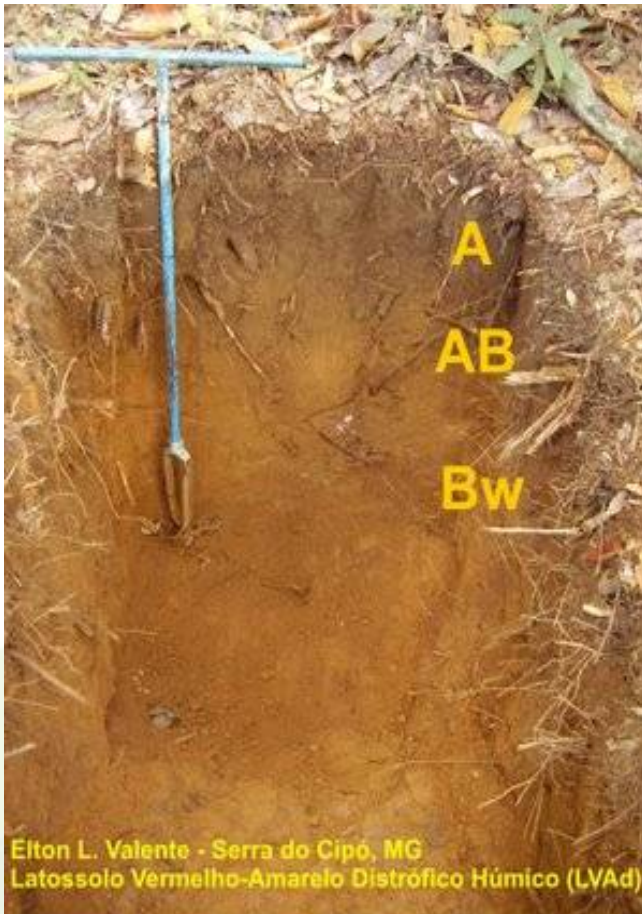
Composição química total de elementos maiores de solos agrícolas

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	
Oxisol (Brazil) ¹	39,18	33,10	7,52	0,02	<0,01	<0,01	0,01	2,27	0,02	<0,01	} 10 ⁶ -10 ⁷ anos
Kansas (EUA) ²	79,90	10,70	2,29	0,88	1,23	1,68	2,62	0,71	na	0,04	
Nanking (China) ²	72,80	15,40	4,31	1,59	0,95	1,28	2,21	0,78	na	0,12	} 10 ³ -10 ⁴ anos
Kaiserstuhl (Ukraine) ²	59,90	7,78	2,90	3,45	23,11	0,84	1,27	0,32	na	0,07	
Switzerland ³	71,00	13,87	1,93	0,36	1,23	3,93	3,84	0,32	na	0,04	

Composição química total de elementos traços de solos agrícolas

	Cu	Zn	Ni	Pb
Oxisol (Brazil) ¹	14,0	7,0	4,3	39,9
Kansas (EUA) ²	10,0	44,0	11,0	11,0
Nanking (China) ²	30,0	78,0	34,0	12,0
Kaiserstuhl (Ukraine) ²	13,0	35,0	23,0	12,0

Fontes: 1. Dados Embrapa (Eder Martins); 2. Taylor et al. 1983. Geochemistry of loess 3. Egli et al. 2001. Weathering of soils on glacial deposits.



LATOSSOLO – Solo tropical

- Intemperismo profundo
- Minerais principais – Óxidos e hidróxidos de Al e Fe, caulinita
- Alta acidez e Al trocável
- Alta densidade de cargas positivas
- Baixa CTC (matéria orgânica)
- Alta CTA (óxidos e hidróxidos)



MOLLISOL – Solo temperado

- Baixo intemperismo
- Minerais principais – argilominerais 2:1
- Solos com pH neutros a levemente alcalinos
- Alta densidade de cargas negativas
- Alta CTC (matéria orgânica e argilominerais 2:1)
- Baixa CTA

<http://en.wikipedia.org/wiki/Mollisol#mediaviewer/File:Mollisol.jpg>

Base conceitual

Temperado



Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+



Anions: SiO_4^{-4} , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NO_4^-

Tropical



A
AB
Bw

PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NO_4^-

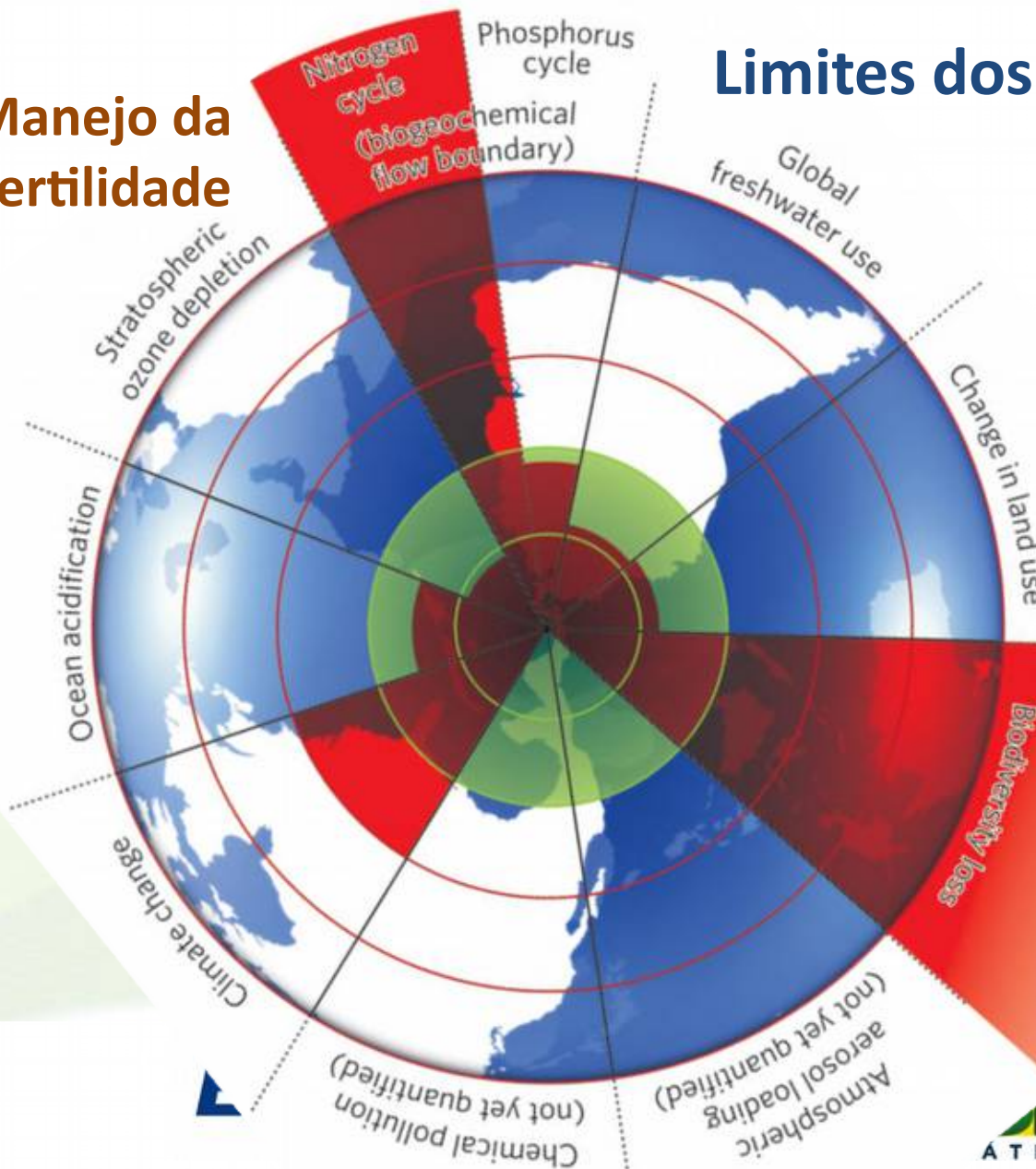
+



Cations: Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+

Manejo da Fertilidade

Limites dos recursos naturais



Fonte: Rockström et al. (2009) A safe operating space for humanity. *Nature*, 461: 472-475

Papel duplo dos agrominerais silicáticos

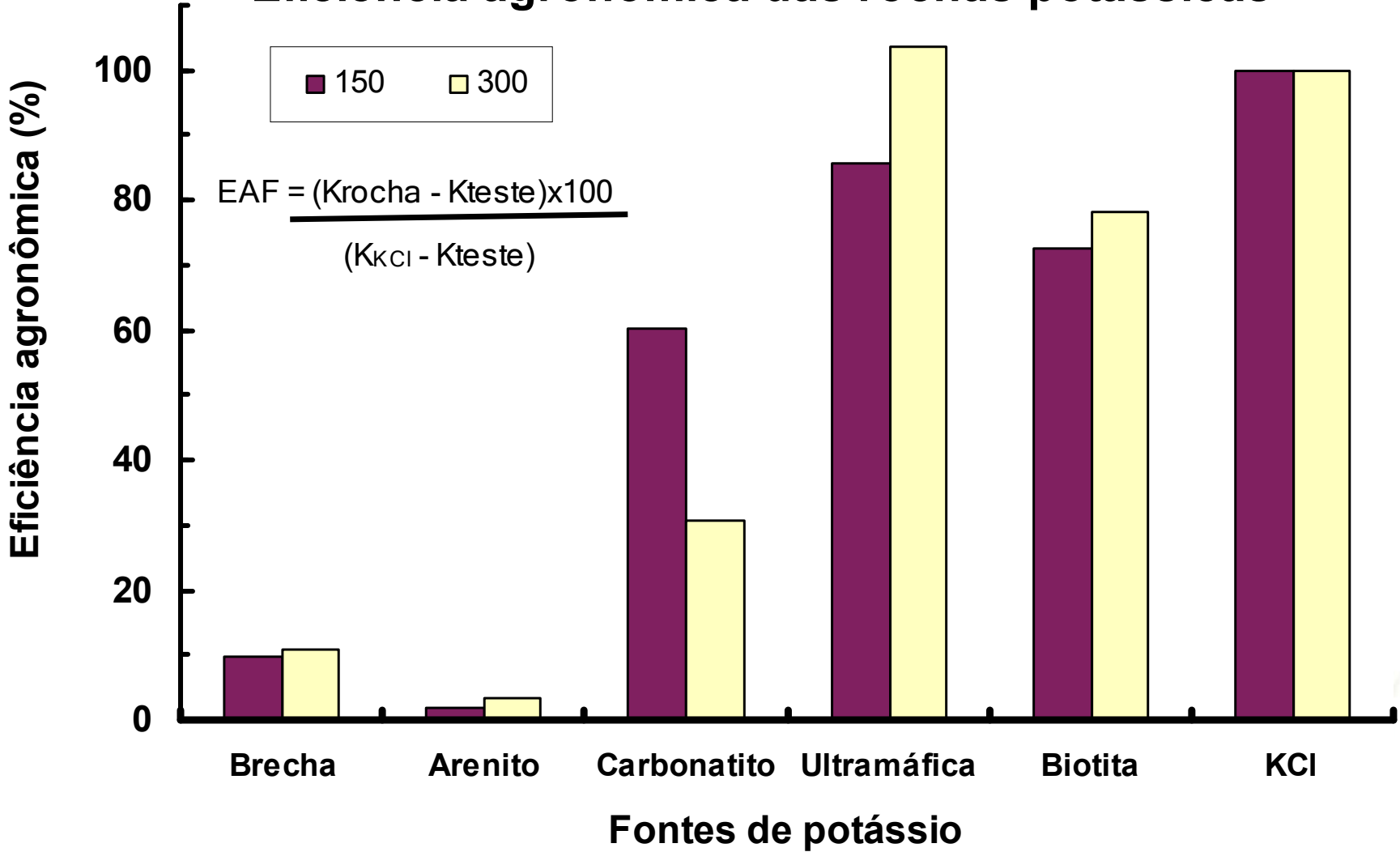
Condicionador do solo

- Aumenta CTC pela formação de argilominerais 2:1
- Aumenta o pH do solo
- Diminui o Al trocável do solo
- Aumenta a eficiência de uso de nutrientes
- Diminui a perda de nutrientes
- Estimula a atividade biológica do solo e das raízes das plantas cultivadas

Fertilizante

- Disponibiliza **K**, Ca, Mg, Si, Fe, Mn, Ni, Zn, Cu, Se, Mo...

Eficiência agrônômica das rochas potássicas



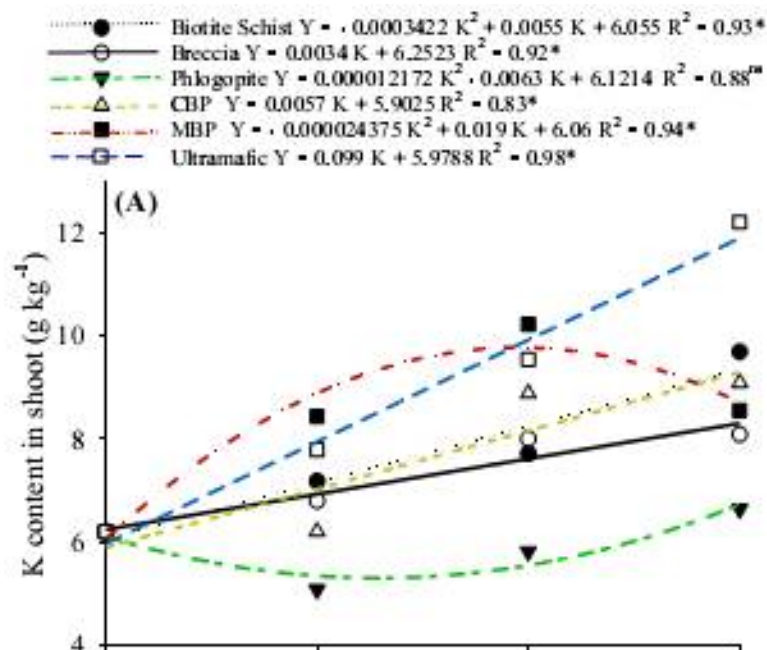
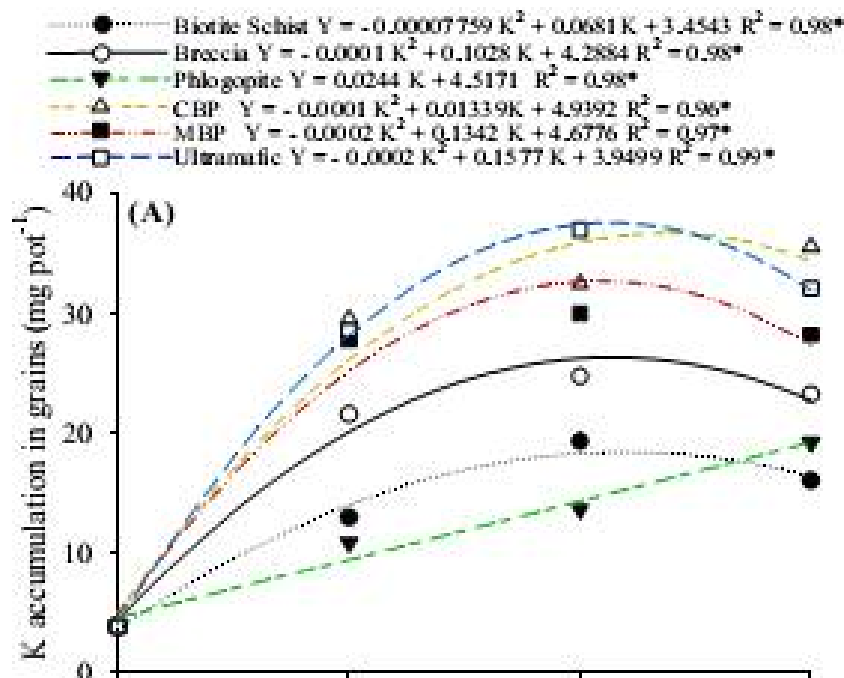


Table 1. Total content of K₂O, Na₂O, P₂O₅, CaO, MgO, Cu, Zn and Ni in crushed rocks¹.

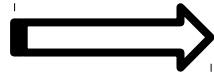
Rock	K ₂ O ⁽²⁾	Na ₂ O ⁽²⁾	P ₂ O ₅ ⁽²⁾	CaO ⁽²⁾	MgO ⁽²⁾	Cu ⁽³⁾	Zn ⁽³⁾	Ni ⁽³⁾
	Percent (%)					Milligram per kilogram (mg kg ⁻¹)		
Breccia	2.18	0.31	0.94	9.03	7.09	59.9	128.7	73.9
Ultramafic	3.10	1.71	1.22	13	18.50	87.4	113.1	651.9
CBP ⁽⁴⁾	3.39	1.62	0.19	3.19	3.88	437.5	123.0	2.8
MBP ⁽⁵⁾	11.80	0.72	0.42	3.58	0.70	816.8	28184	380.3
Biotite Schist	2.07	0.86	0.06	5.27	13.8	9.9	290.5	146.4
Phlogopite	7.71	0.16	0.2	0.98	22.89	9.1	902.7	1425.2

⁽¹⁾ Rocks crushed at 0.3 mm in this analysis; ⁽²⁾ method 4A and 4B of Acmelab (Canada) Laboratory which has as principle the sample fusion in lithium metaborate/tetraborate; ⁽³⁾ Method 3052 USEPA (1996); ⁽⁴⁾ Chapada byproduct; ⁽⁵⁾ mining byproduct.



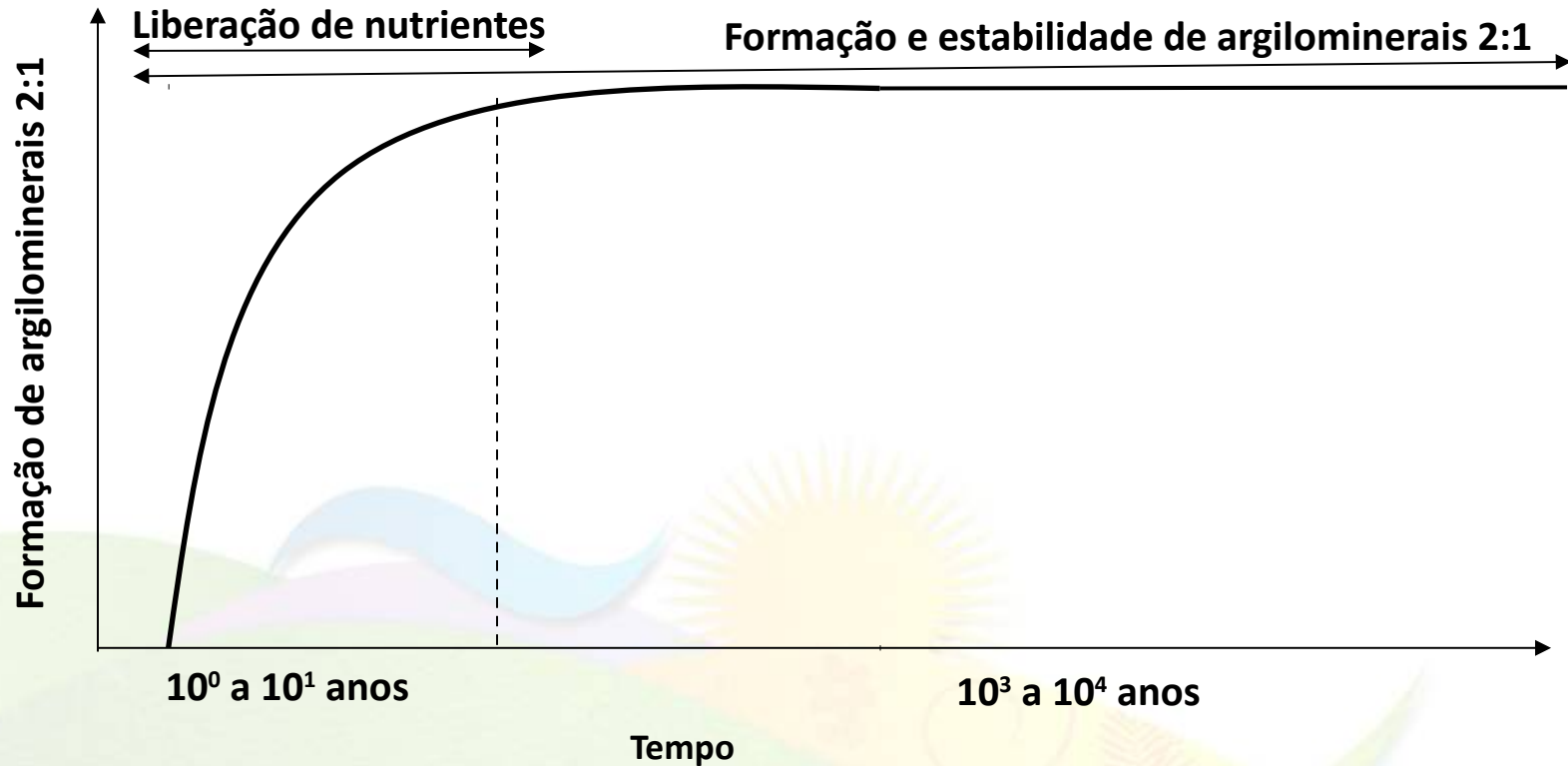
Geração de CTC por biointemperismo

Biotita
fase sólida

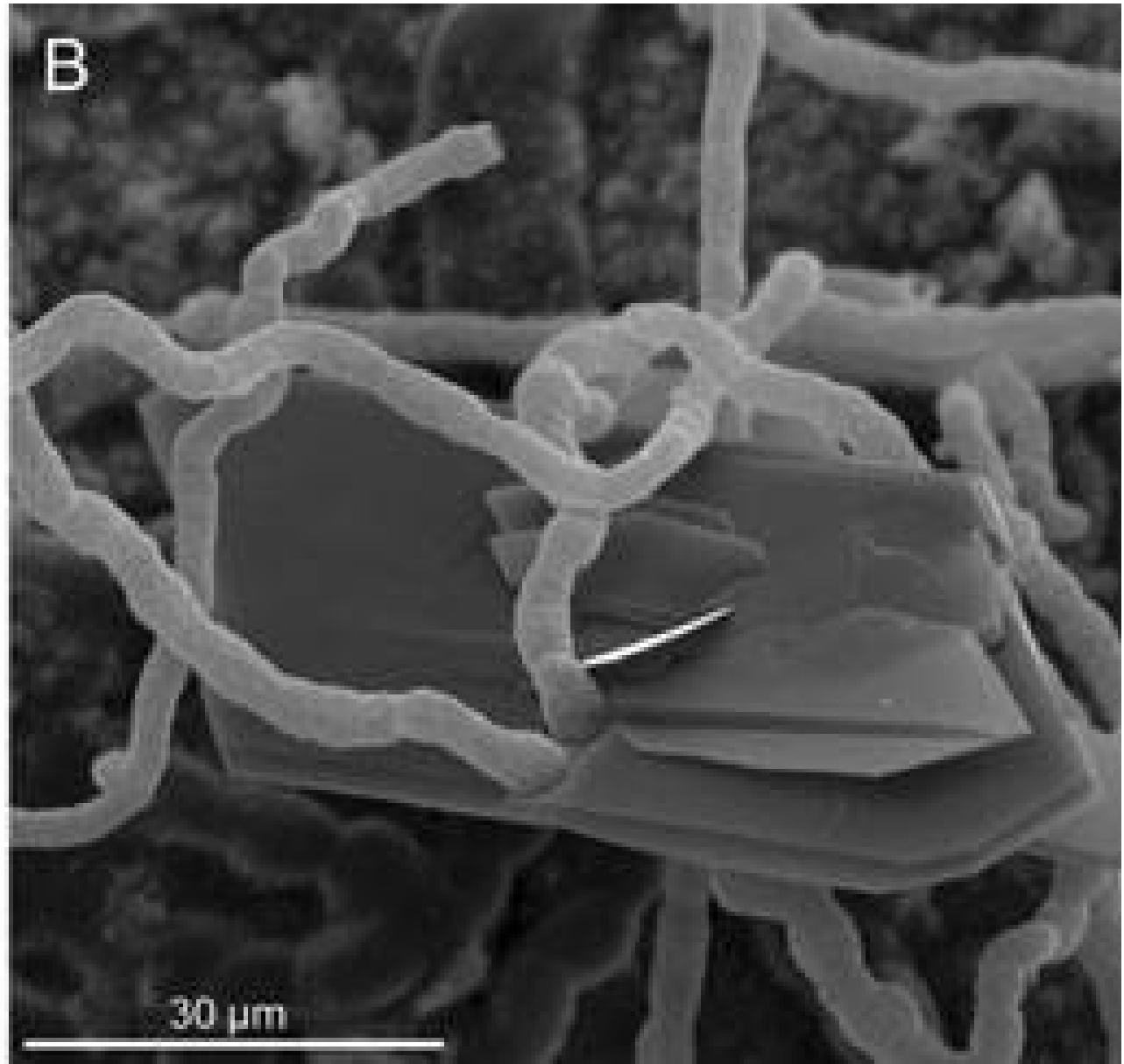


Vermiculita
fase sólida (CTC)

+ K +Si +Mg +Fe
em solução (nutrientes)

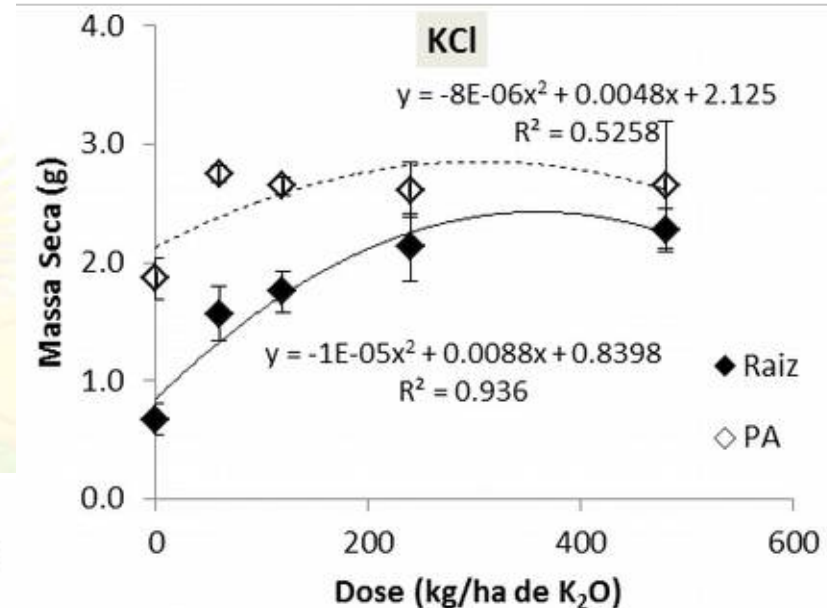
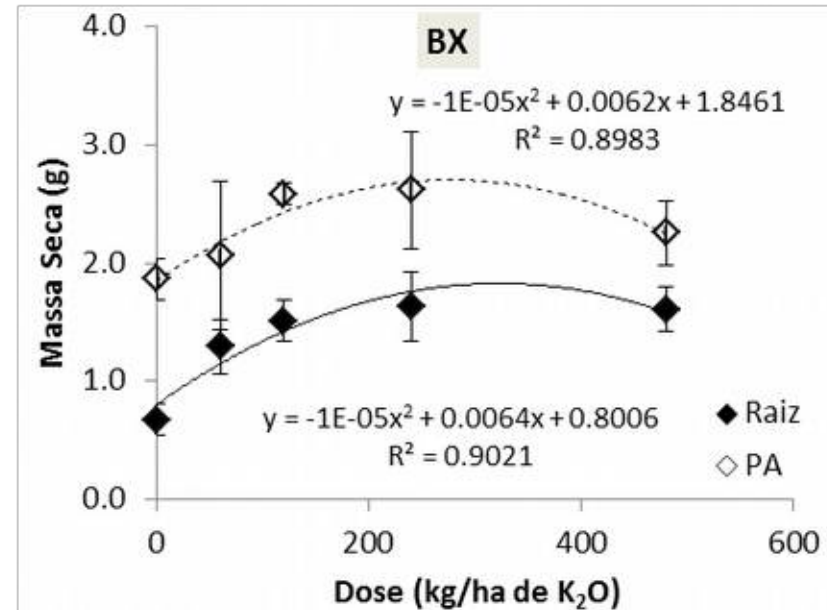
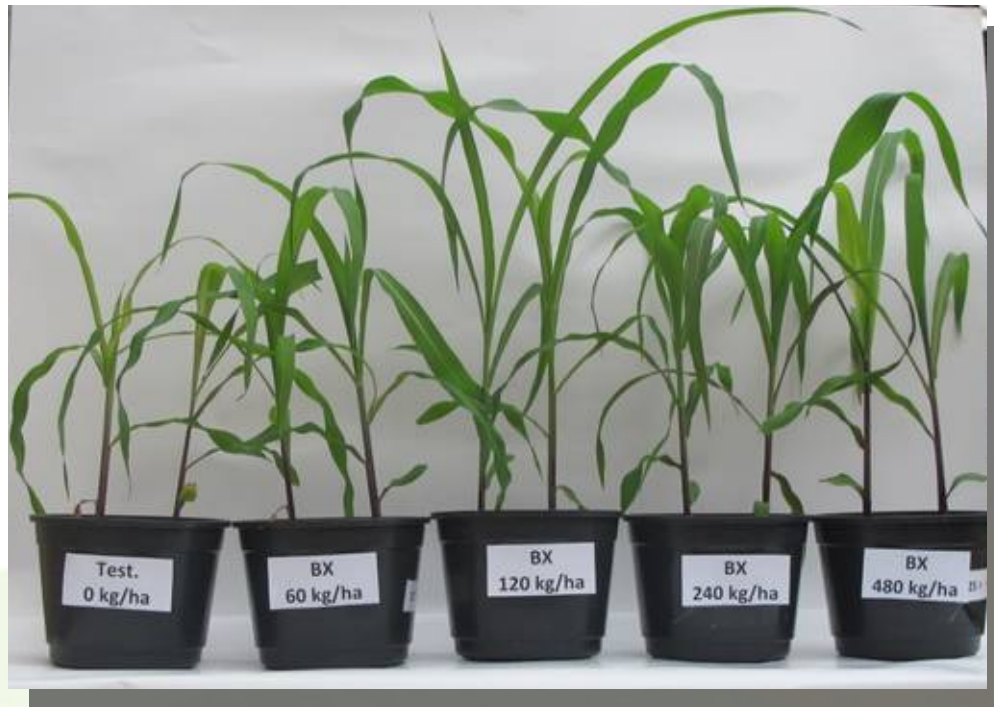


Geração de CTC por biointemperismo



Fonte: Bonneville et al
(2011) Tree-mycorrhiza
Symbiosis accelerate mineral
weathering. *Geoch.
Cosmoch. Acta*, 75:6988-
7005

Avaliação do biotita xisto como fertilizante potássico



Avaliação de novas fontes

Avaliação agronômica do uso de agrominerais silicáticos como fonte de potássio para a cultura do milho

Dose recomendada de 240 kg ha⁻¹ de K₂O

FONTES	Massa parte aérea (g)*		Eficiência*** %	Grau de Eficiência
	Média**	desv.		
Hydrosienito Ca (PE)	3,20 a	0,40	122	Muito Eficiente
Hydrosienito HS2-Ca-Mg (PE)	3,17 a	0,01	121	
Sienito (BA)	2,88 ab	0,27	110	
KCl	2,61 b	0,23	100	Eficiente
Biotita xisto Pedreira Araguaia(GO)	2,62 b	0,50	100	
Kamafugito (GO)	2,50 bc	0,26	95	
Sienito (GO)	2,07 cd	0,26	79	Pouco Eficiente
Fonolito Curimbaba (MG)	1,97 d	0,12	75	
Tefrifonolito (GO)	1,95 d	0,29	74	Ineficiente
Sienito (PE)	1,86 d	0,28	71	
Controle (sem adubação)	1,86 d	0,17	71	

* Teste t de avaliação de médias. Nível de significância de 0,05. Software Sisvar 5.3

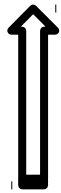
** Médias seguidas de mesma letra são similares

***O cálculo da eficiência tomou como referência a produção média de massa seca do tratamento com KCl

Geração de CTC por biointemperismo

Biointemperismo de mica xisto

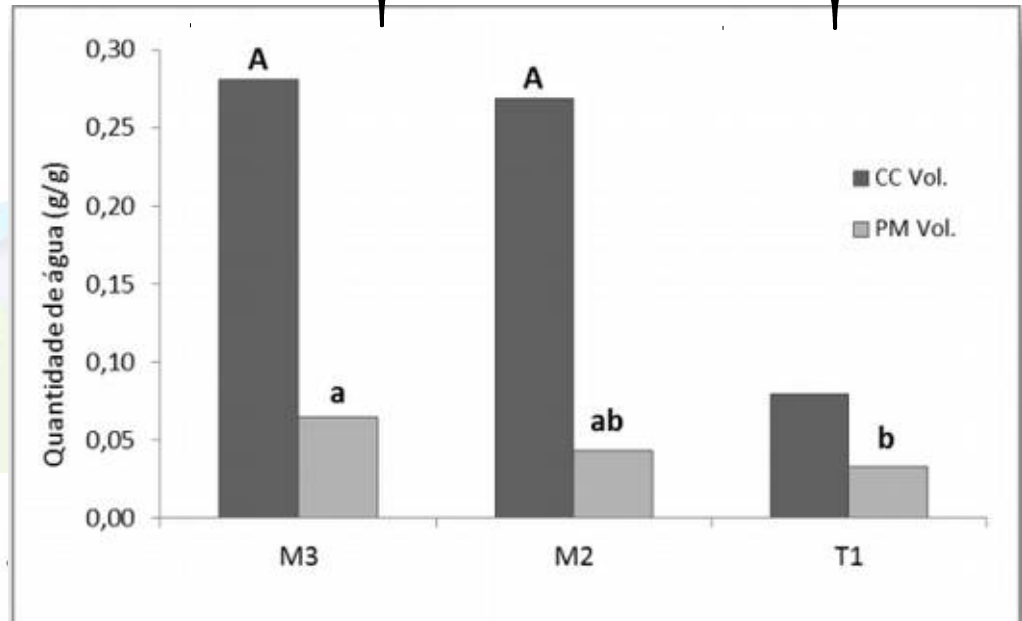
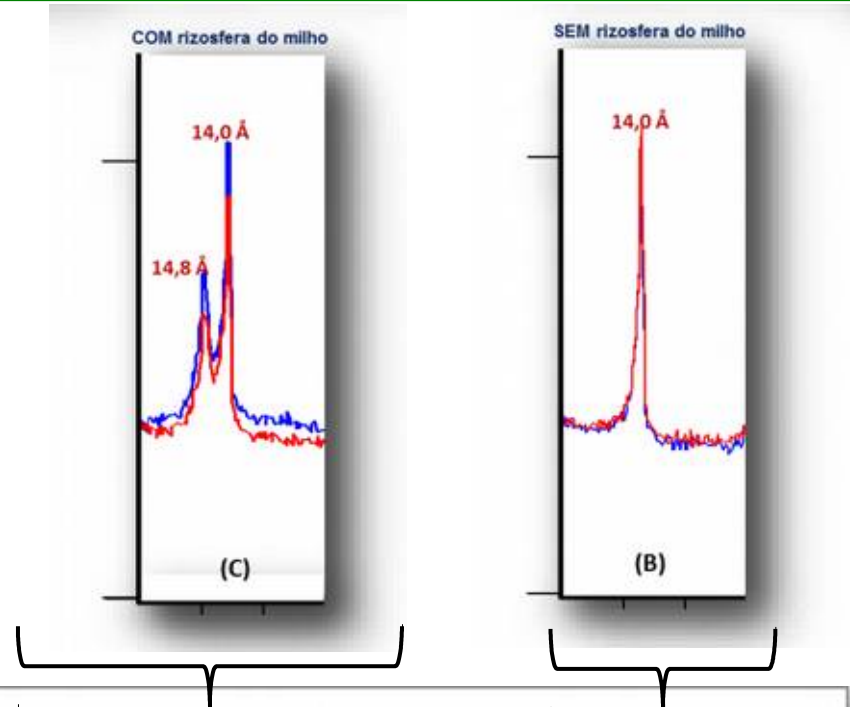
Vermiculita



Hidrobiotita

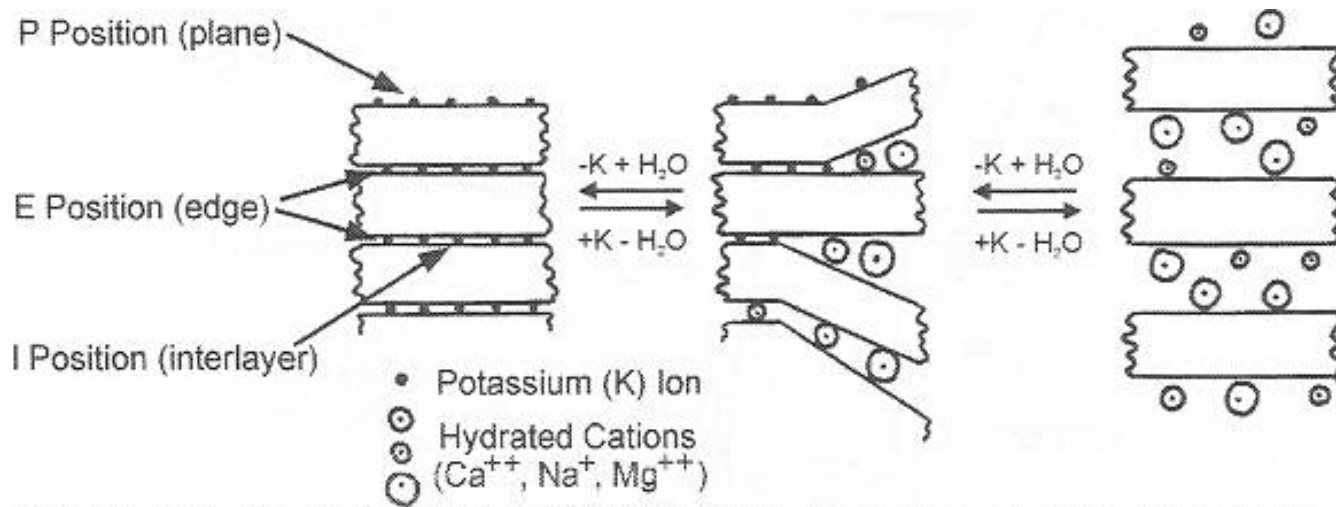


Biotita



Geração de CTC por biointemperismo

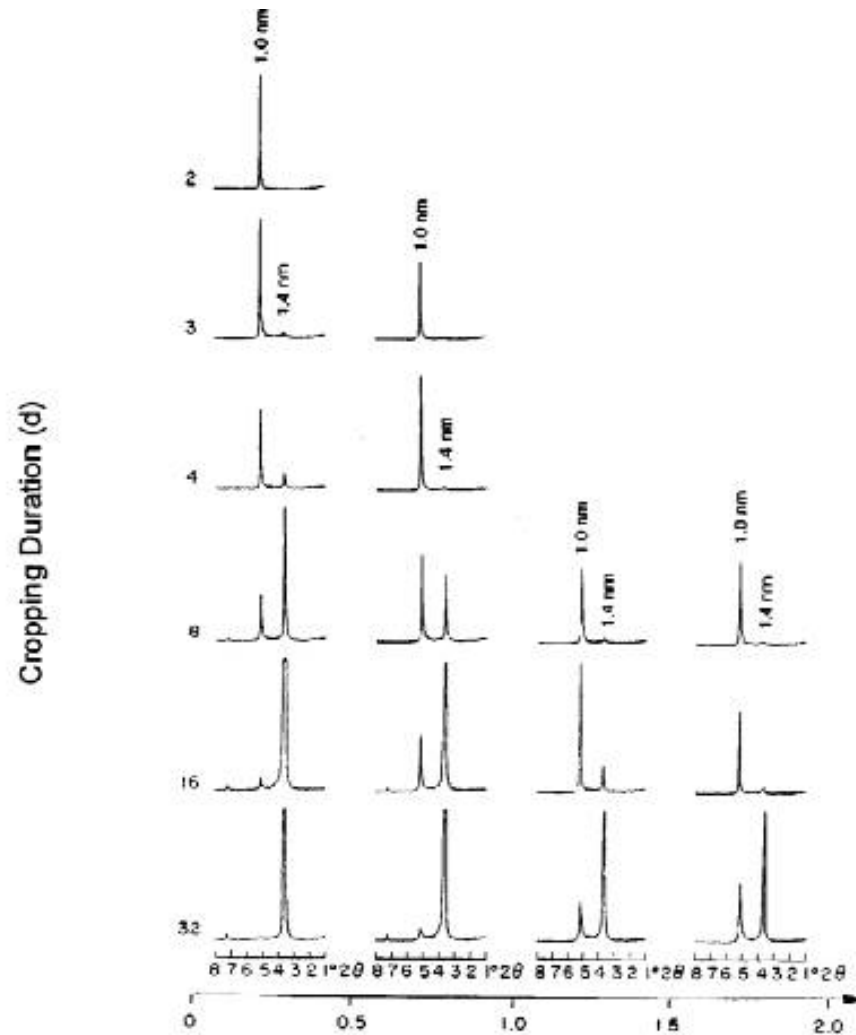
Biotita \longrightarrow Vermiculita + K +Si +Mg +Fe



K Content (%)	10	4-6	<1
CEC	0	30-50	150

Source: Van Straaten (2007)

Geração de CTC por biointemperismo



Biotita = 1,0 nm

Vermiculita = 1,4 nm

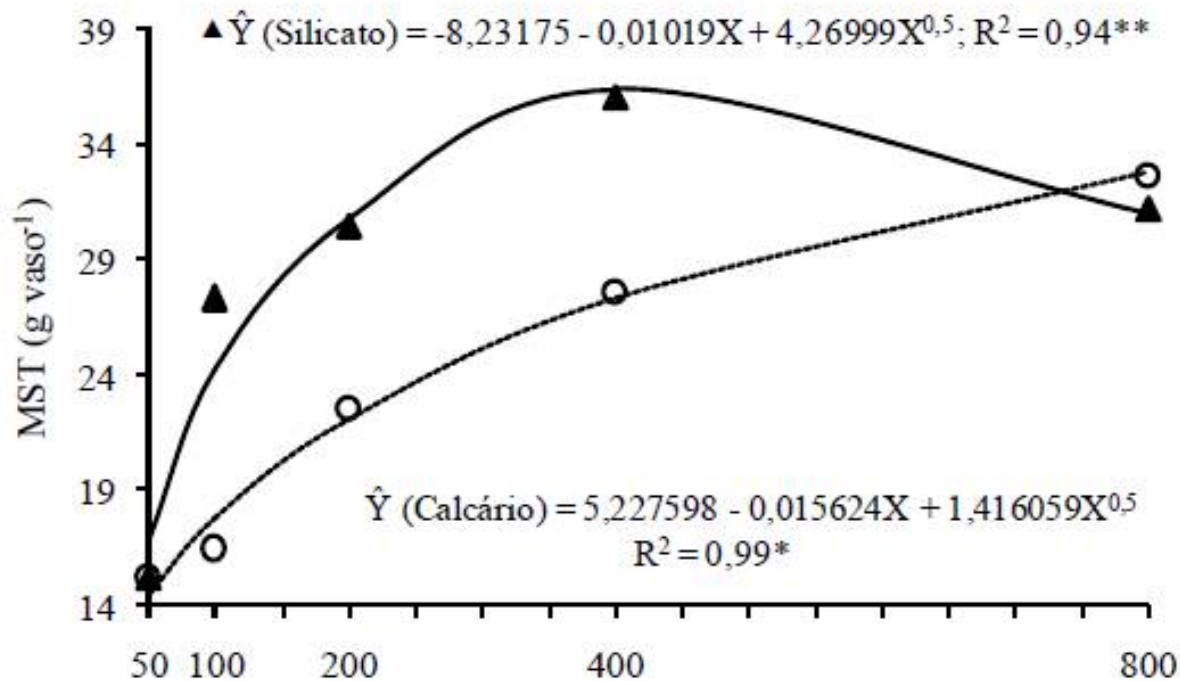
Fonte: Hinsinger et al. (2012)

Processos de Intemperismo

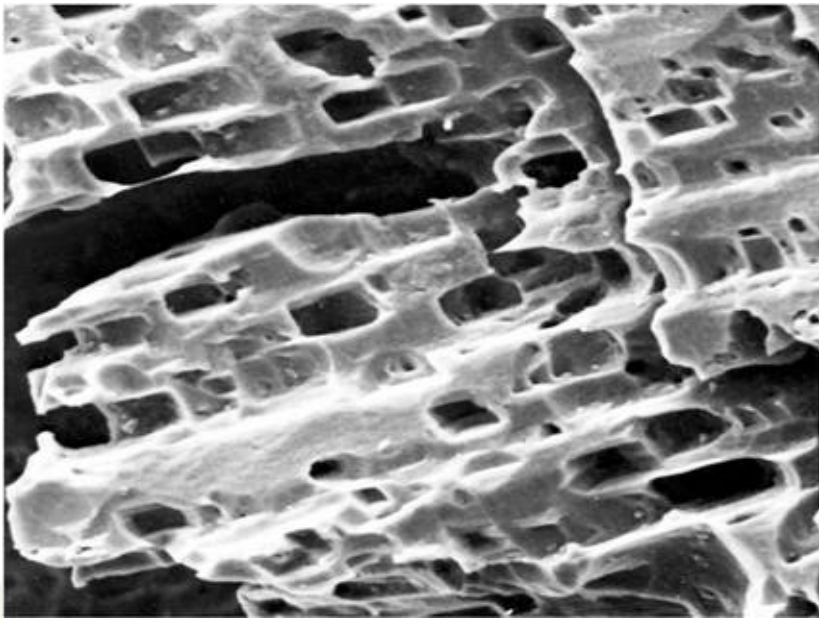
- ✓ Formação de novos minerais com carga negativa permanente
- ✓ Liberação de bases para o solo e plantas (Ca, Mg, K)
- ✓ Saturação com H_3SiO_4^- nos sítios de carga positiva (óxidos e hidróxidos de Fe e de Al)

Processos de Intemperismo

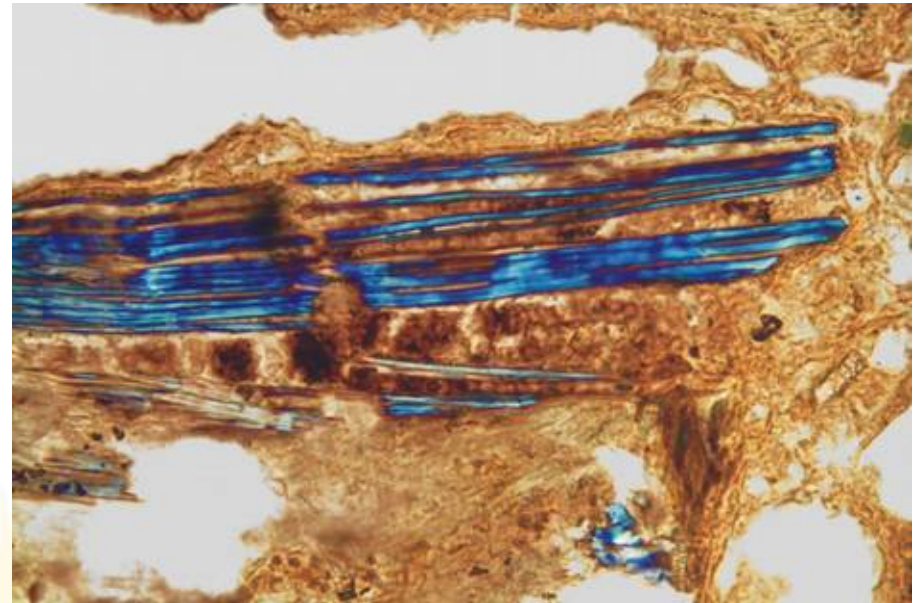
- ✓ Eficiência da absorção do fósforo: liberação de P pela ação do ânion silicato (H_3SiO_4^-) (Lopes et al., 2010)



Processos de Intemperismo



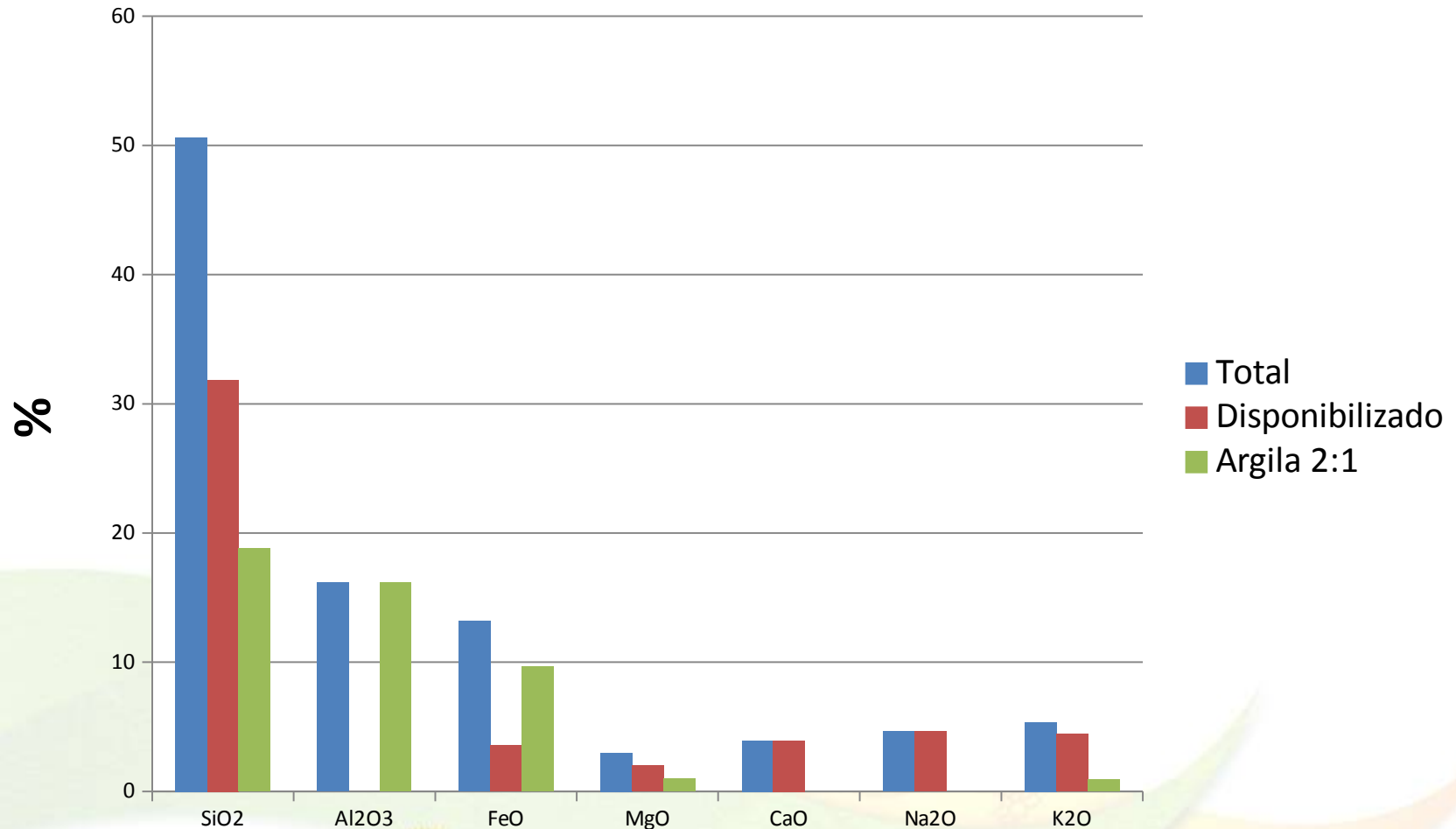
Dissolução Total
Insumos convencionais



Dissolução Parcial + Formação de Argila
Agrominerais silicáticos

Processos de Intemperismo

- ✓ Disponibilização de nutrientes e formação de novos minerais



Variáveis da Rochagem

Pó de rocha

- Composição química
- Composição mineralógica
- Granulometria...

Sistema de cultivos

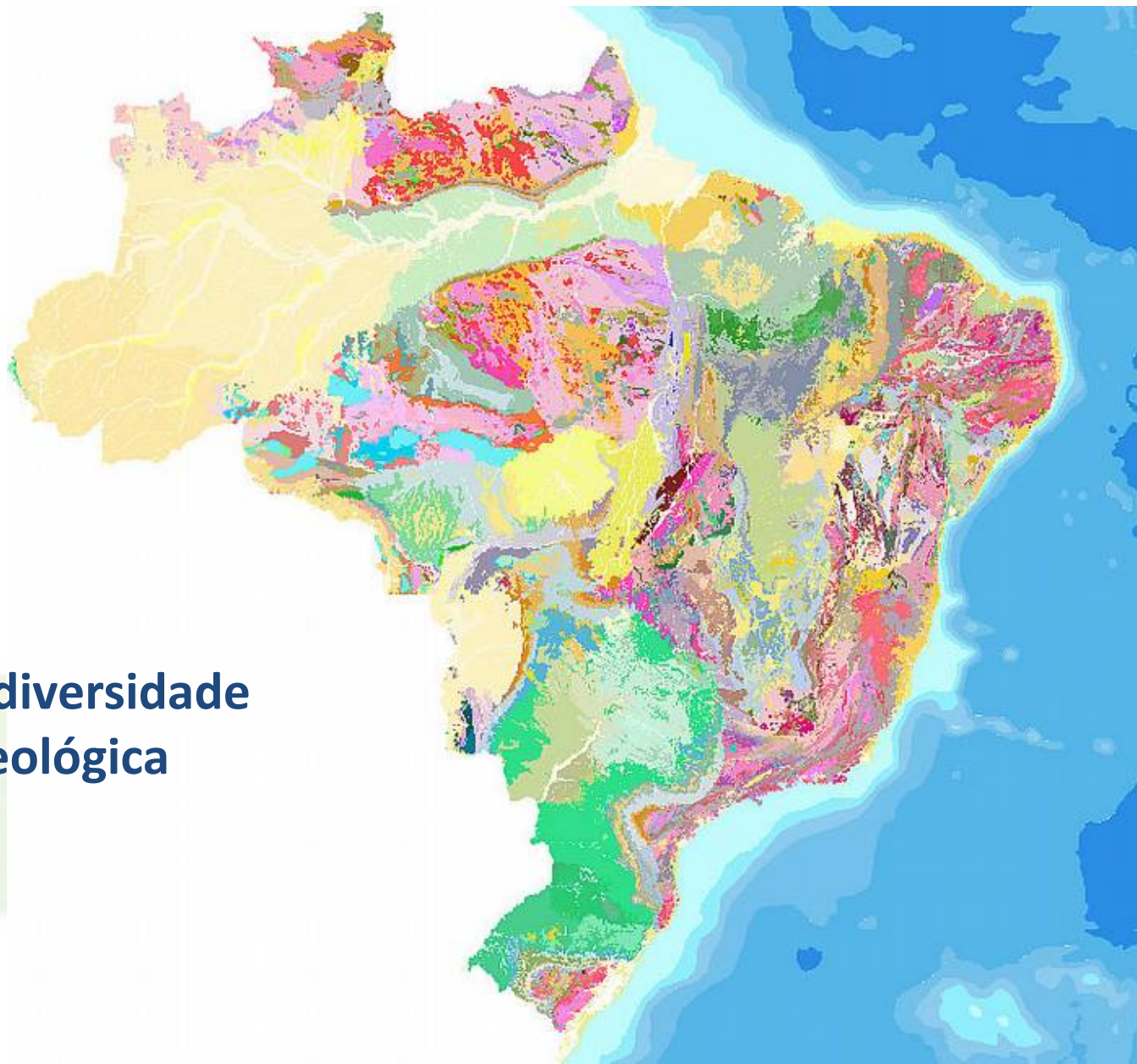
- Desenvolvimento de raízes
- Ciclagem
- Cobertura do solo...

Solo

- Composição química
- Composição mineralógica
- Atividade biológica...

Clima

- Precipitação
- Temperatura
- Edafoclima...



**Megadiversidade
geológica**

Processo da Rochagem

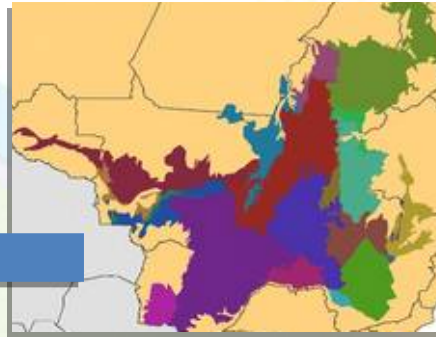
- 1. Agrogeologia:** Estudo dos solos agrícolas e das fontes de nutrientes e condicionadores regionais;
- 2. Seleção de rochas:** Seleção de rochas em função da disponibilidade, composição química e mineralógica;
- 3. Produção de rochas moídas:** Definição da tecnologia e do grau de moagem em função da eficiência agronômica;
- 4. Manejo:** Aplicação de agrominerais regionais com a finalidade de manejar a fertilidade do solo (nutrientes + cargas negativas).



3. Produção de rochas moídas



2. Seleção de rochas

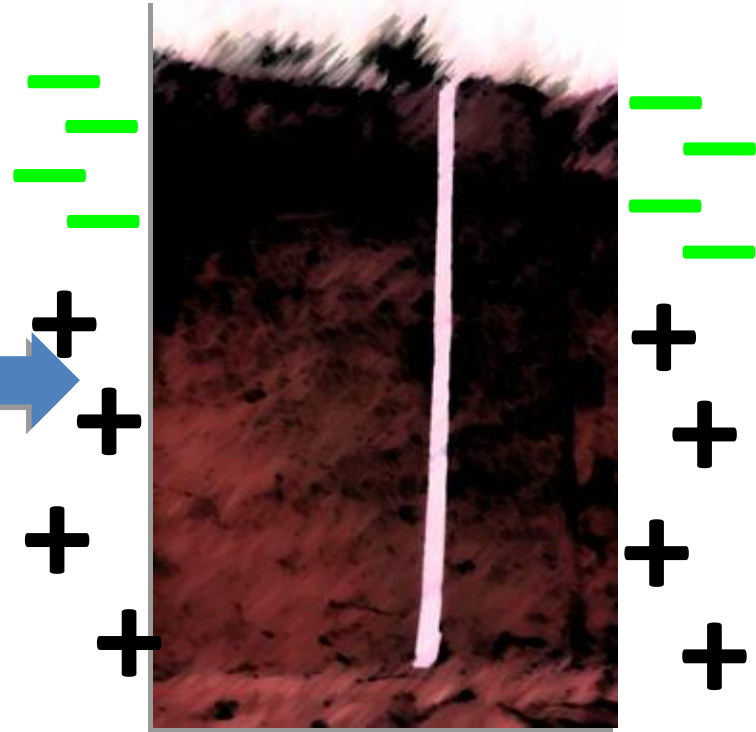


1. Agrogeologia



4. Manejo

ANTROPOSSOLO



Produção de Antropossolo: Formação de nova camada de solo a partir do intemperismo da rocha moída no solo original ao longo do tempo.

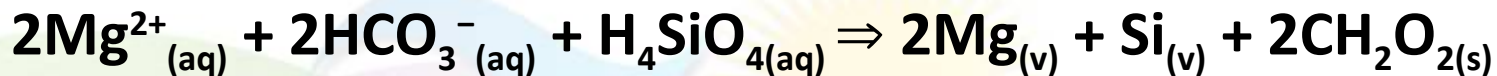
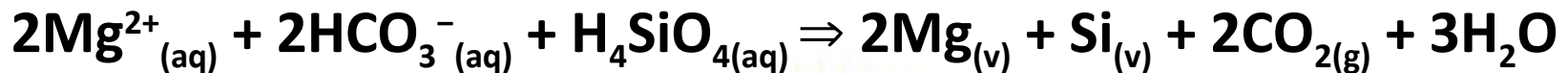
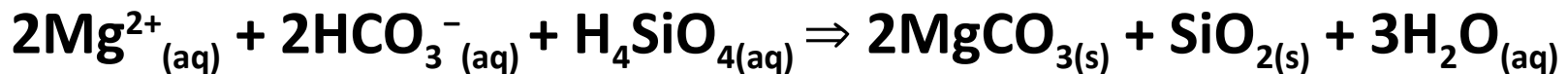
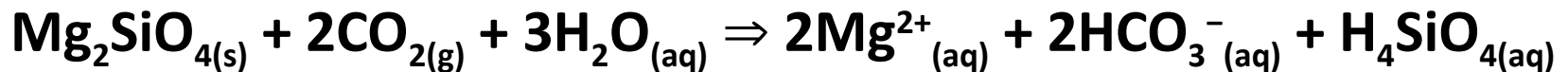
***Propriedades emergentes** – aumento da capacidade produtiva; intensificação ecológica; melhoria da eficiência de aproveitamento de nutrientes; mitigação do efeito estufa; **acumulação de carbono no solo...**

Potencial da Rochagem no Sequestro de C

Geoengineering Technology

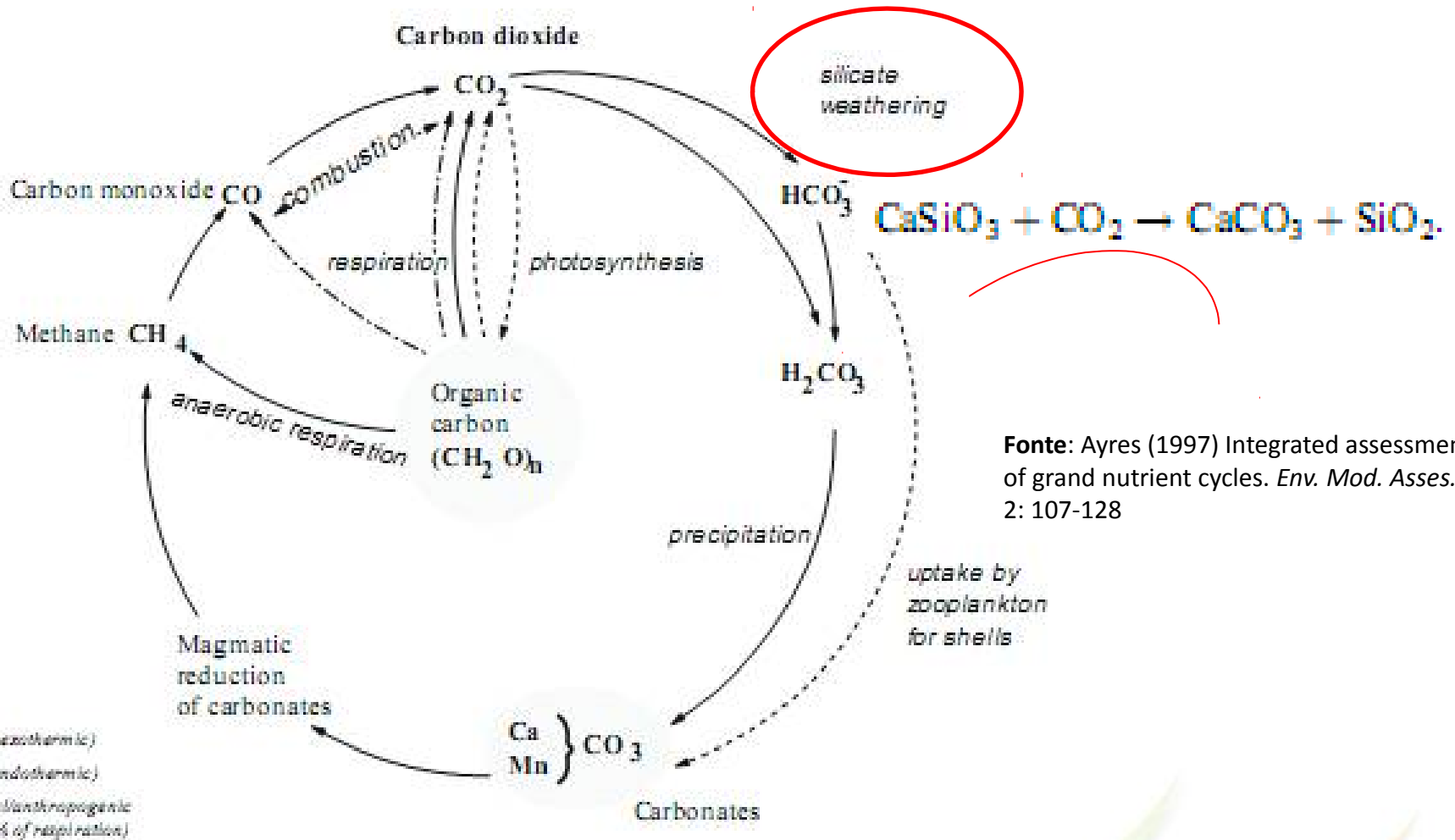
“Enhanced weathering” – “Stimulated weathering”

Rochas moídas aplicadas a solos, rios e oceanos



Fontes: Schuiling e Krijgsman (2006); Hartmann e Kempe (2008); Köhler et al. (2010); Schuiling et al (2011); Hartmann et al. (2013); Moosdorf et al. (2014)

Ciclo do C e do Si

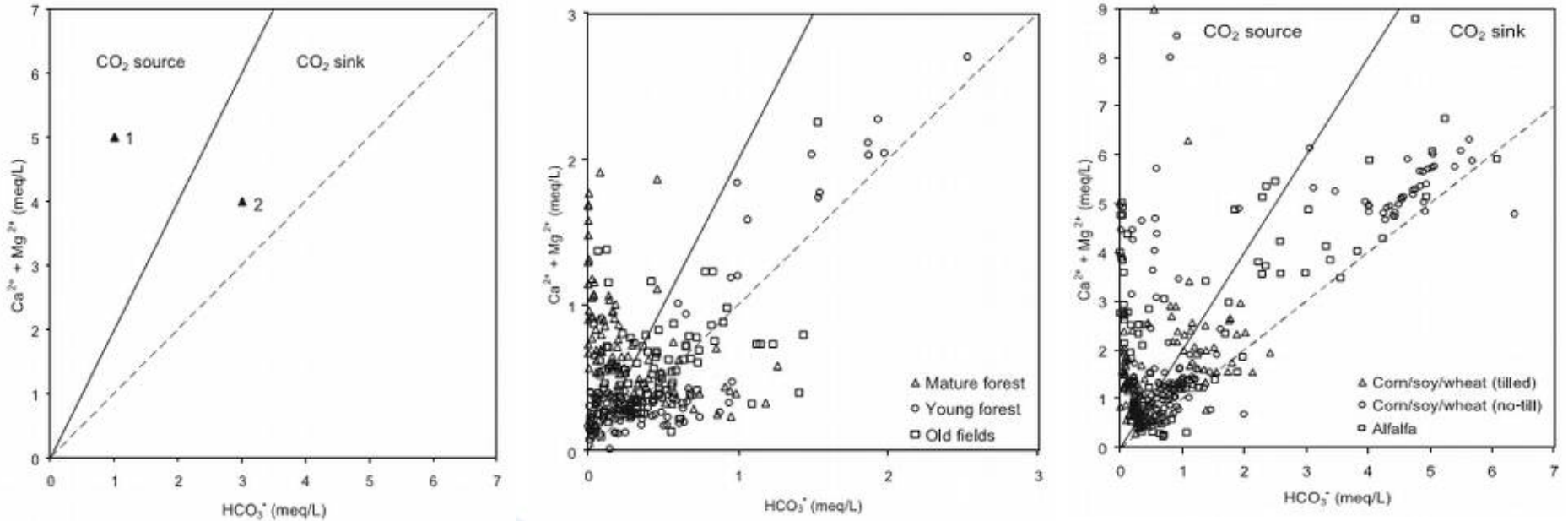


Fonte: Ayres (1997) Integrated assessment of grand nutrient cycles. *Env. Mod. Asses.*, 2: 107-128

Figure 2. Carbon cycle: chemical transformations.

Potencial da Rochagem no Sequestro de C

Calagem – fonte ou depósito de C



Fonte: Hamilton et al. (2007)

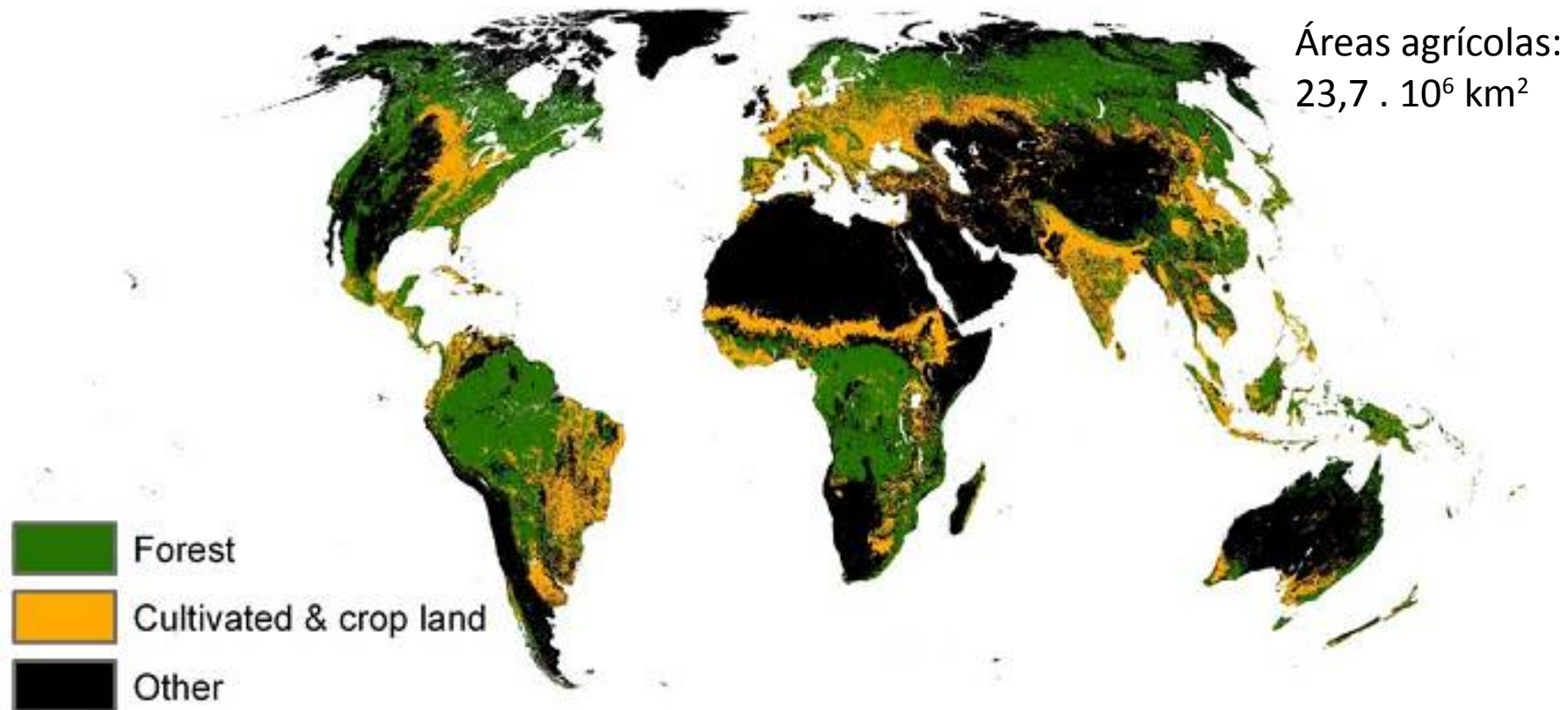
Potencial da Rochagem no Sequestro de C

Geoengineering Technology

Bibliografia básica

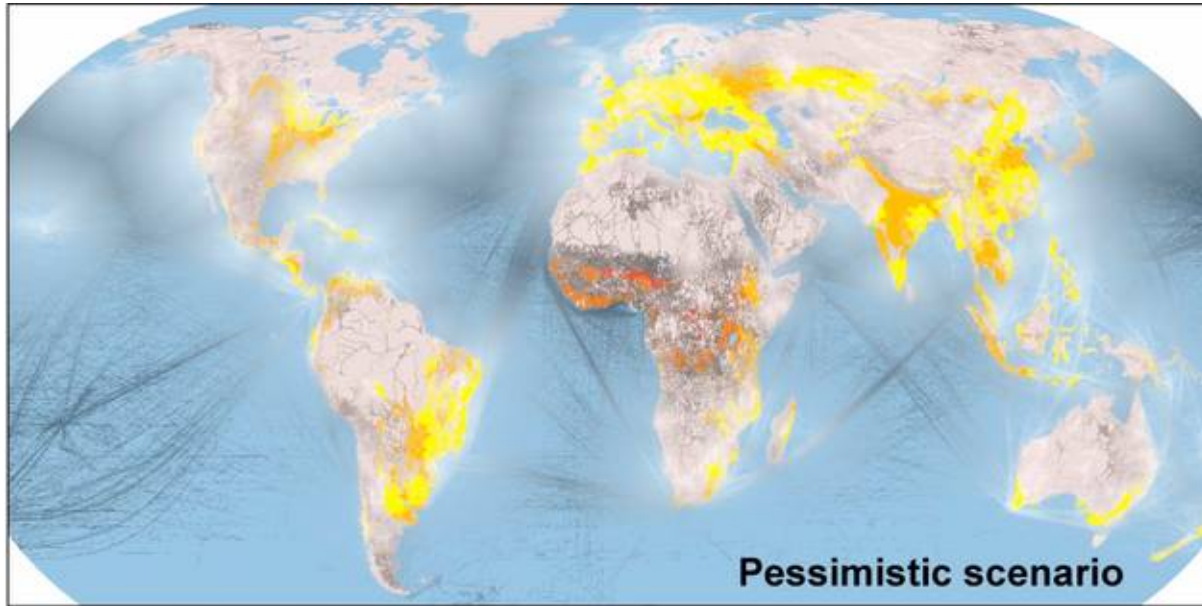
- Schuiling e Krijgsman (2006) Enhanced weathering. **Climatic Change**, 74, 349-354.
- Hamilton et al (2007) Evidence for carbon sequestration by agricultural liming. **Global Biogeochemical Cycles**, 21, GB2021, 12 pp.
- Hartmann e Kempe (2008) What is the maximum potential for CO₂ sequestration by “stimulated” weathering in global scale? **Naturwissenschaften**, 95, 1159–1164.
- Köhler et al. (2010) Geoengineering potential of artificially enhanced silicate weathering of olivine. **PNAS**, 107(47), 20229-20233.
- Schuiling et al (2011) Enhanced silicate weathering is not limited by silicic acid saturation. **PNAS**, 108(12), E41.
- Hartmann et al. (2013) Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy. **Reviews of Geophysics**, 51 , 113-149.
- Moosdorf et al. (2014) Carbon Dioxide Efficiency of Terrestrial Enhanced Weathering. **Environ. Sci. Technol.**, 48, 4809-4816.

Potencial da Rochagem no Sequestro de C

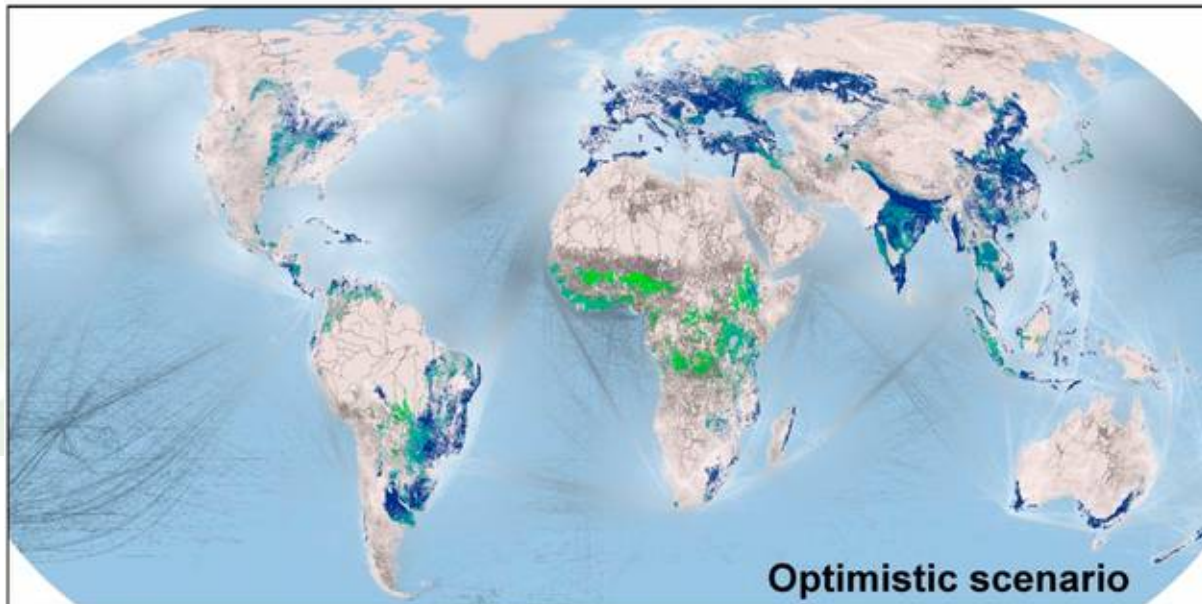
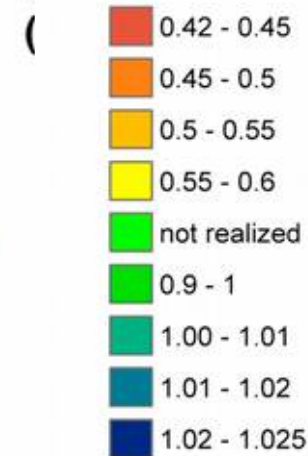


Fonte: Hartmann e Kempe (2008)

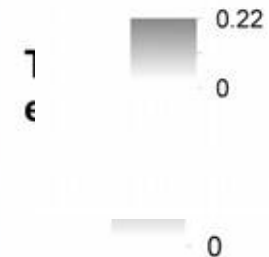
Potencial da Rochagem no Sequestro de C



CO₂ available
for sequestration
(t CO₂ t⁻¹ rock)

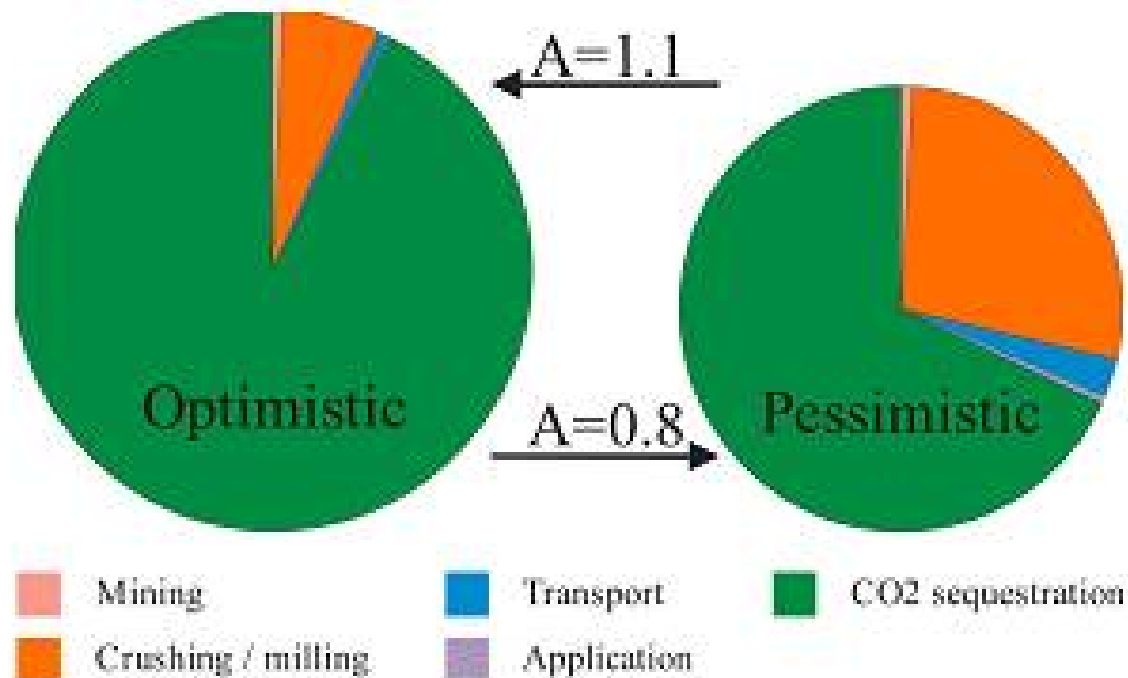


Transport CO₂
emissions (t CO₂)



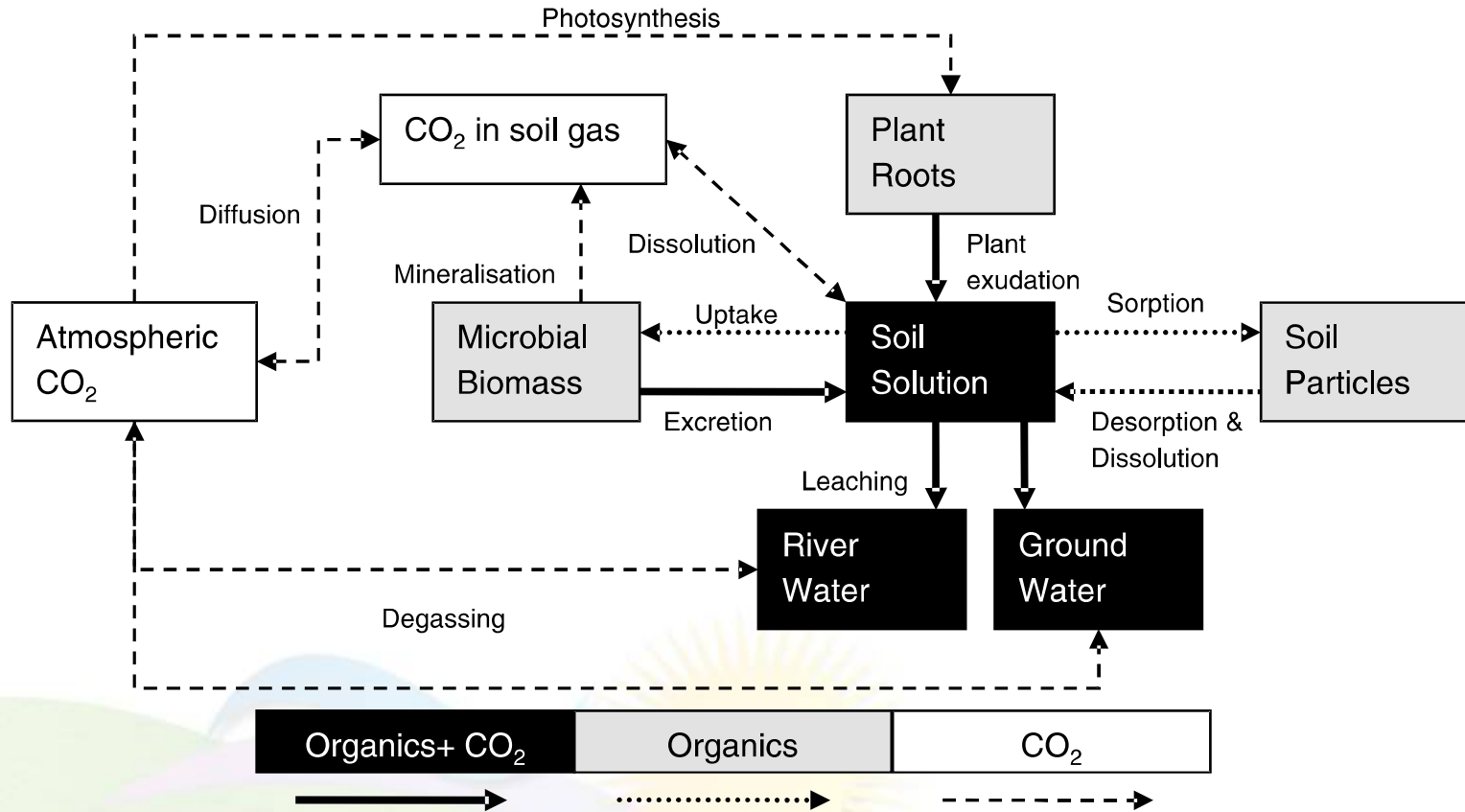
2014)

Potencial da Rochagem no Sequestro de C



Fonte: Moosdorf et al. (2014)

Potencial da Rochagem no Sequestro de C

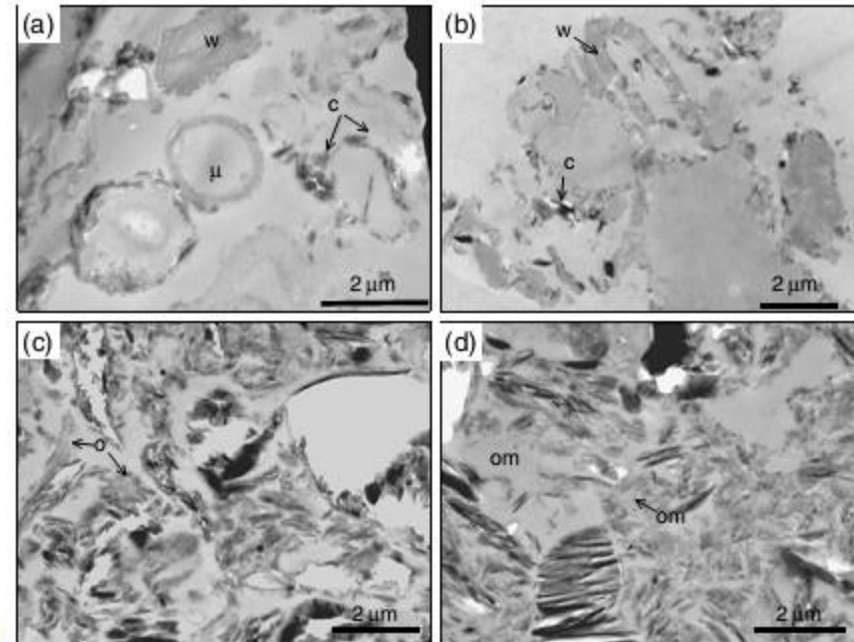
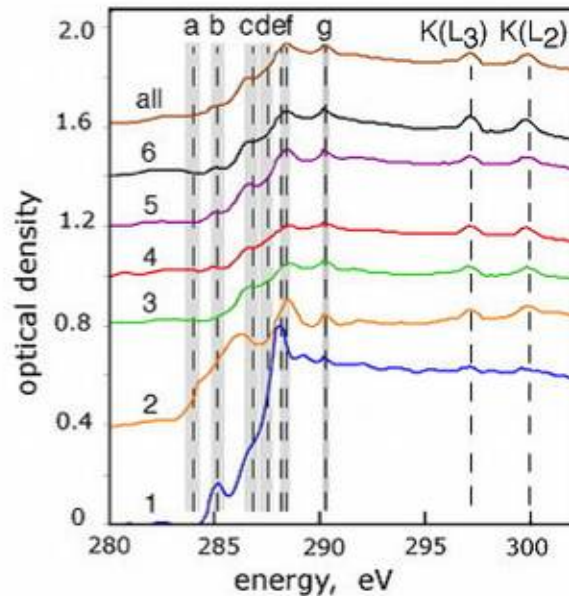
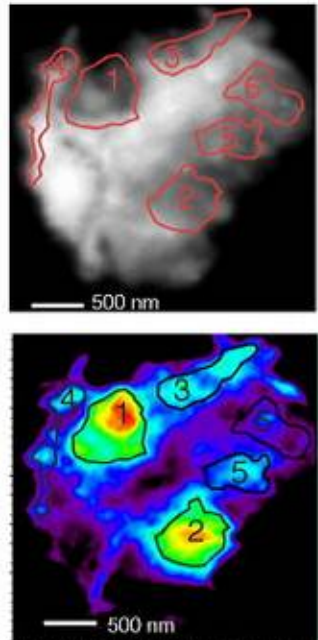


Fonte: Hartmann et al. (2013)

Papel na Indução da Rizosfera



Tipos de MOS associado aos minerais



Kleber 2010 Minerals and carbon stabilization. **19th Cong. Soil Sci.**

Chenu e Plante 2006 Clay-sized organo-mineral complexes in a cultivation chronosequence. **Eur. J. Soil Sci.**, 57, 596-607.

A rochagem a partir de rochas silicáticas

- ✓ *Fornece nutrientes por demanda das plantas*
- ✓ *Produz CTC mineral de longo prazo*
- ✓ *Tem o potencial de mitigar os gases de efeito estufa pela absorção de C no solo*

“A necessidade é a mãe da inovação” Platão



Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento

