



Uso de resíduos da mineração na agricultura

Eder de Souza Martins

Geólogo, Dr. – Geomorfologia e Agrogeologia

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



Plano da Apresentação

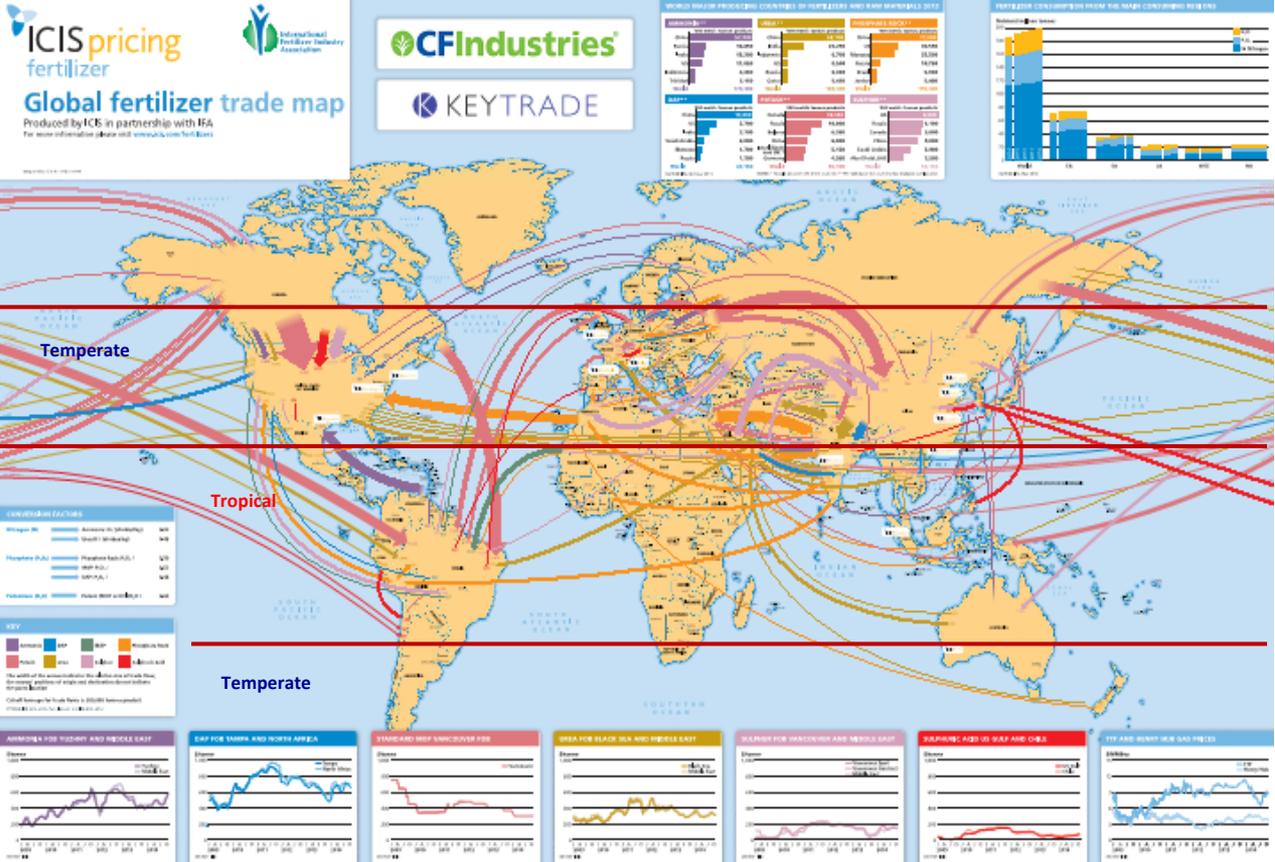
- Contexto e conceitos
- Agrominerais: do global ao regional
- Determinados resíduos como insumos agrícolas



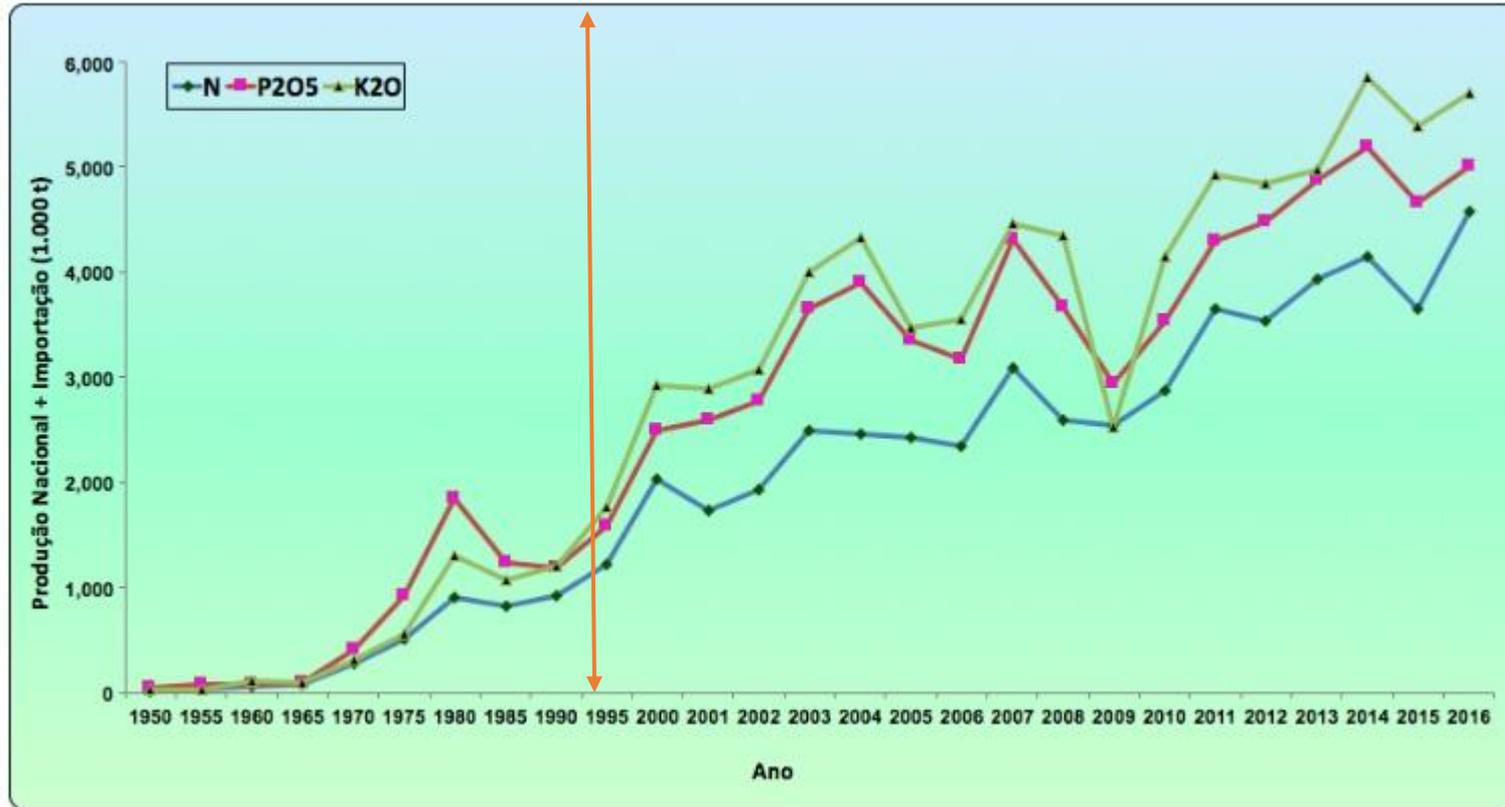
MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



Commodities fertilizantes



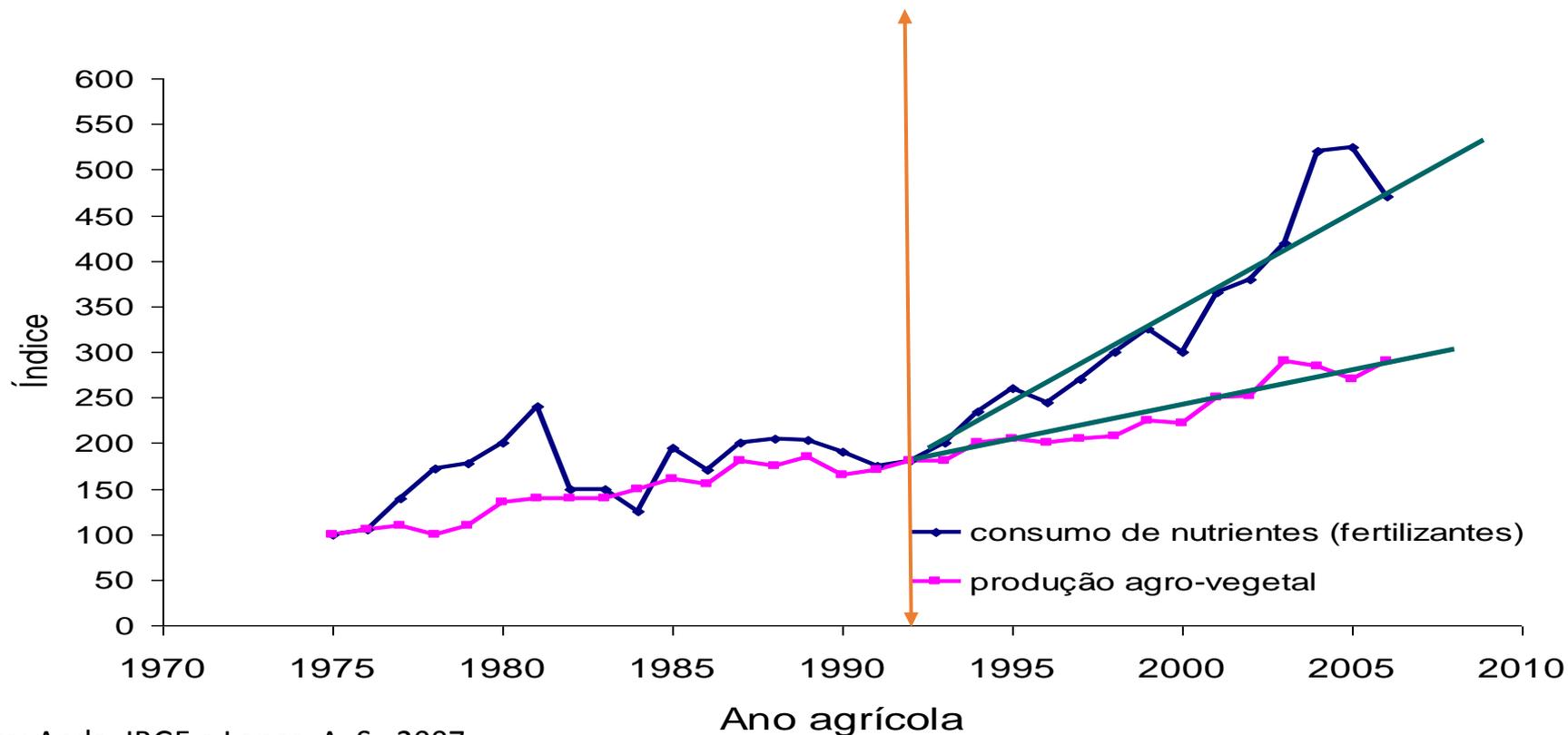
Dependência Externa



K: 95%
P: 50%
N: 70%

Fonte: <http://brasil.ipni.net/article/BRS-3132>

Eficiência de uso de nutrientes



Fonte: Anda; IBGE e Lopes, A. S., 2007



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



Soluções Propostas

16th World Fertilizer Congress of CIEC, Rio de Janeiro (2014)

- ✓ Nanotecnologia para produzir fertilizantes de liberação lenta e controlada
 - ✓ Minerais de argila para controlar a liberação de nutrientes
 - ✓ Fertilizantes organominerais a partir de fontes NPK e resíduos orgânicos agro-industriais
-
- ✓ Bioestimulantes, biofertilizantes e biochar derivados de ácidos húmicos e compostos orgânicos gerados na produção agropecuária e outros resíduos industriais/urbanos
 - ✓ Uso de agrominerais regionais *in natura*
 - ✓ Uso de agrominerais regionais derivados de processos industriais (químicos, bioquímicos e físicos)

Agrogeologia

DEFINIÇÃO

- Ciência que estuda processos geológicos que influenciam a distribuição e formação dos solos, bem como a aplicação de materiais geológicos em sistemas agrícolas e florestais como forma de manter e melhorar a produtividade do solo para o aumento dos benefícios sociais, econômicos e ambientais.

(Chesworth e Van Straaten, 1993)

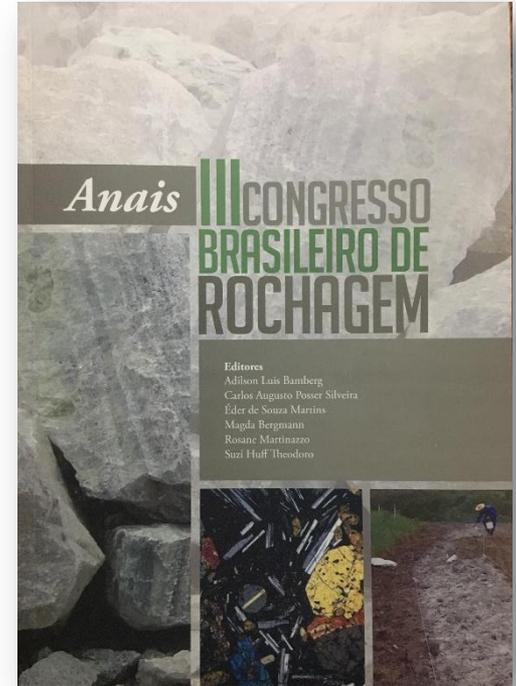
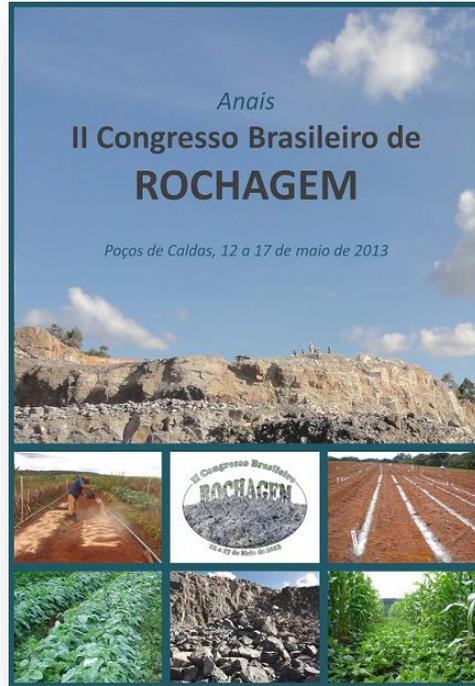
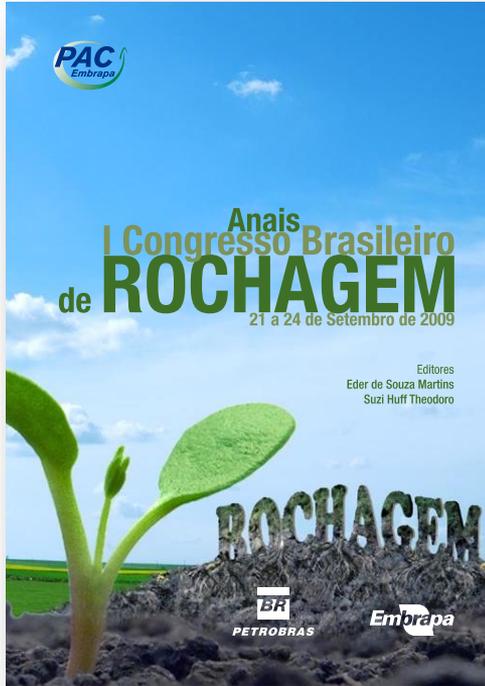
Agrogeologia

HISTÓRICO

- Início - Missoux (1853), Hensel (1890)
- 1ª Conferência na Hungria em 1909
- Keller (1948), Fyfe (1981), Leonardos (1987)
- Brasil - até década de 60 (Seção de Agrogeologia)
A partir de 1999 – pesquisa sistemática
Congressos de Rochagem a partir de 2009
- China – A partir dos anos 2000
Minimizar contaminação de alimentos



Agrogeologia no Brasil



Definições

AGROMINERAL

Matéria prima mineral para produção de insumos destinados ao manejo da fertilidade do solo



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



Tipos de agrominerais

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 ²⁺ , Mg ²⁺	10,0	Baixa
Sulfato	SO ₄ ²⁻	Depósitos evaporíticos (sedimentar) ⁴	Ca ²⁺	0,0	Muito alta
Cloreto	Cl ⁻¹	Depósitos evaporíticos (sedimentar)	K ⁺	0,0	Muito alta
Fosfato	PO ₄ ³⁻	Fosforito (sedimentar) ⁵ Foscorito (ígneo) ⁶	Ca ²⁺	0,0	Baixa
Silicato	SiO ₄ ⁴⁻	Sedimentar ⁷ Ígneo ⁸ Metamórfico ⁹	Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , 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).

Estabilidade dos Minerais

Energia livre de Gibbs de dissolução por hidrólise ($-\Delta G_{sol}$) dos principais minerais formadores de rochas silicáticas. Os menores valores são relativos aos minerais mais estáveis.

Mineral de rocha	Composição química	Classe mineral	$-\Delta G_{sol}$ (kJ mol ⁻¹)
<i>Quartzo</i> ¹	SiO ₂	Tectossilicato	-261
<i>Ortoclásio</i> ¹	KAlSi ₃ O ₈	Tectossilicato	13,7
<i>Albita</i> ¹	NaAlSi ₃ O ₈	Tectossilicato	65,6
<i>Muscovita</i> ¹	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	Filossilicato	178
<i>Biotita</i> ²	KMg ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	Filossilicato	368,7
<i>Anortita</i> ¹	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Tectossilicato	478
<i>Anfibolio</i> ¹	Ca ₂ Mg ₄ Al(Al ₈ Si ₄ O ₂₂)(OH) ₂	Inossilicato	495
<i>Piroxênio</i> ¹	CaMgAlSiO ₃	Inossilicato	537
<i>Olivina</i> ¹	Mg ₂ SiO ₄	Nesossilicato	977

¹Wieland et al. (1988); ²Tardy e Duplay (1992)

Definições

AGROMINERAL SILICÁTICO

Agromineral derivado de minerais silicáticos como matéria prima para fertilizantes, condicionadores e remineralizadores de solos

Agrominerais Silicáticos

Cálcio e Magnésio

Rochas ultramáficas – ricas em olivina, piroxênio, serpentina. Alto Mg, Fe, Ni e Cr (Serpentinito)

Rochas ultramáficas alcalinas – ricas em olivina, piroxênio, feldspatoides. Alto Mg, Ca, K, Fe (Kamafugito)

Rochas básicas – ricas em olivina, piroxênio, plagioclásio. Alto Mg, Ca, Fe (Basalto)

Rochas sedimentares – ricas em argilominerais 2:1 (esmectitas, vermiculita). (Folhelhos, Siltitos)

Potássio

Rochas alcalinas – ricas em feldspatos e feldspatoides. Pode ter alto Na (Fonolito)

Rochas metamórficas – ricas em biotita. Pode ter bases variáveis e quartzo elevado (Gnaisses, Xistos)

Rochas ultramáficas alcalinas – ricas em olivina, piroxênio, feldspatoides. Alto Mg, Ca, K, Fe (Kamafugito)

Rochas sedimentares ou residual – ricas em argilominerais 2:1 (glauconita, esmectitas, vermiculita). (Folhelhos, Siltitos, Saprólitos)

Agrominerais regionais

Material carbonoso e Enxofre

Rochas sedimentares – ricas em argilominerais, material carbonoso e enxofre (Turfa, Folhelho betuminoso, Antracito)

Enxofre

Rochas sedimentares e metamórficas – resíduos derivados de petróleo (enxofre elementar), de mineração de metais, carvão e folhelho betuminoso (pirita)

Fósforo

Rochas sedimentares e ígneas – resíduos derivados de mineração

Dissolução de Agrominerais

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+})

Dissolução congruente
Dissolução total

Agromineral
silicático

Dissolução incongruente

- ☐ *Aluminossilicato* - H_3SiO_4^- e Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+

Dissolução incongruente
Dissolução parcial

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

Alta CTC e elevada carga negativa permanente

Definições

REMINERALIZADOR DE SOLO

Lei 12.890/2013

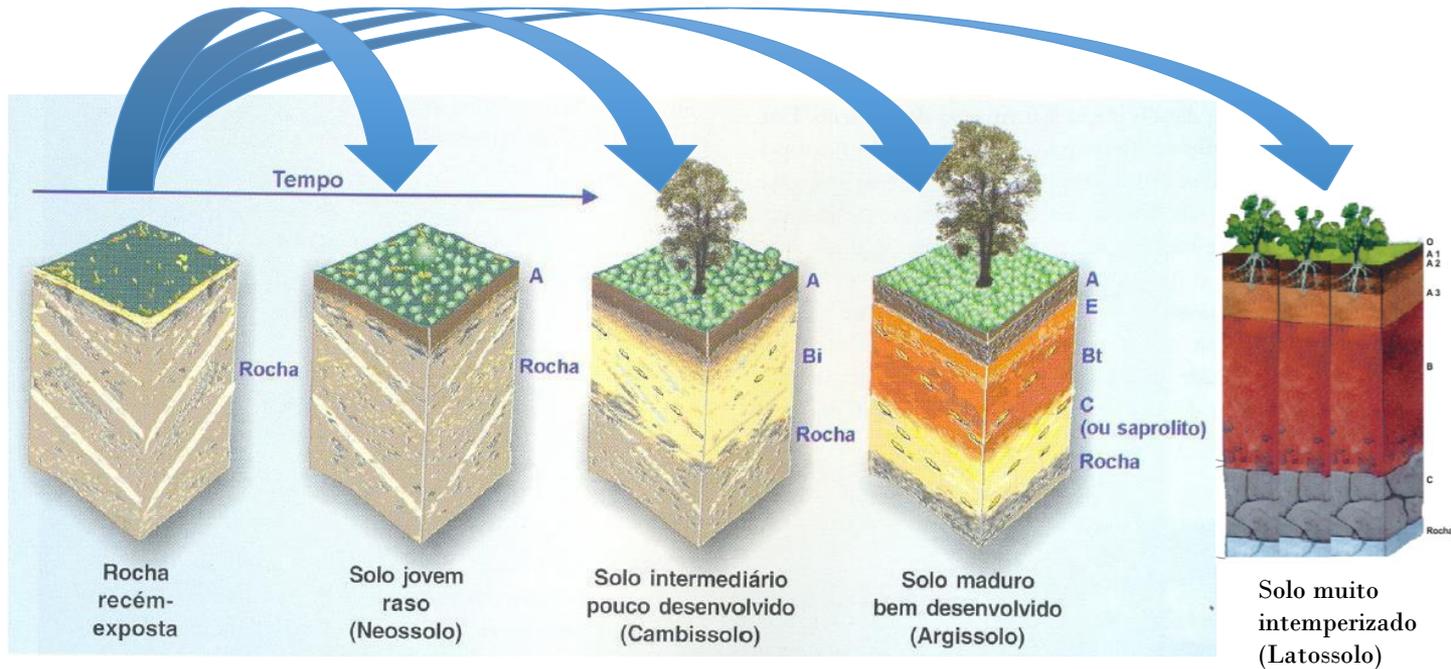
Todo material de origem mineral que tenha sofrido apenas redução e classificação de tamanho por processos mecânicos e que altere os índices de fertilidade do solo por meio da adição de macro e micronutrientes para as plantas, bem como promova a melhoria das propriedades físicas ou físico-químicas ou da atividade biológica do solo.



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



Remineralizador de Solo

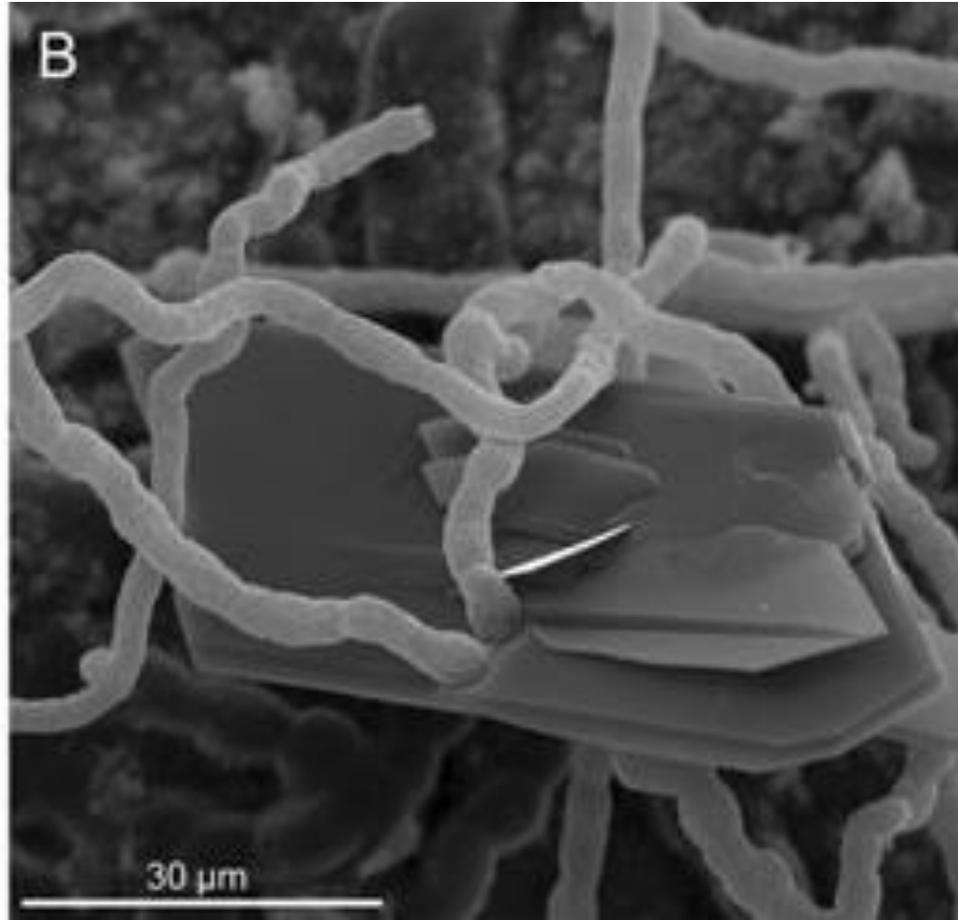


Biointemperismo



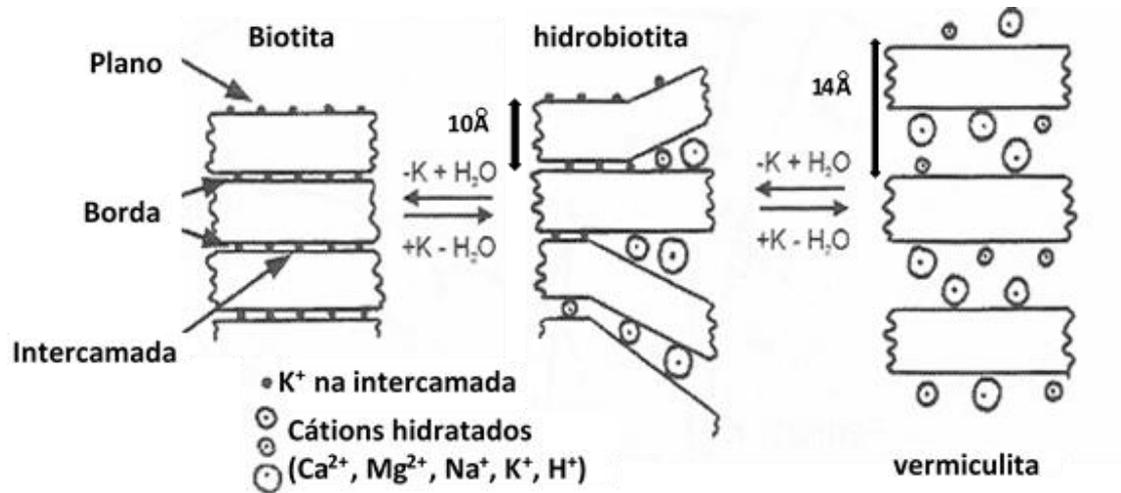
Biointemperismo

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



Biointemperismo

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



Fonte: Van Straaten (2007)

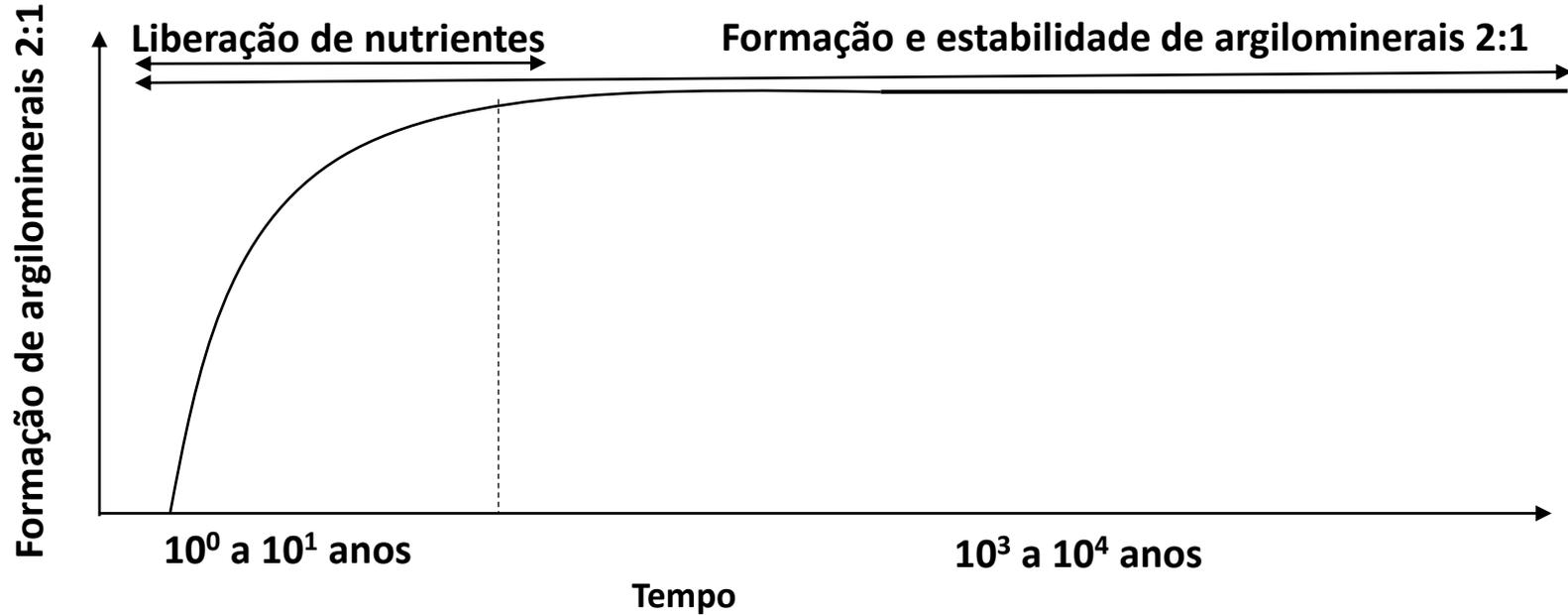
Geração de CTC por biointemperismo

Biotita
fase sólida



Vermiculita
fase sólida (CTC)

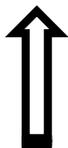
+ K +Si +Mg +Fe
em solução (nutrientes)



Geração de CTC por biointemperismo

Biointemperismo de mica xisto

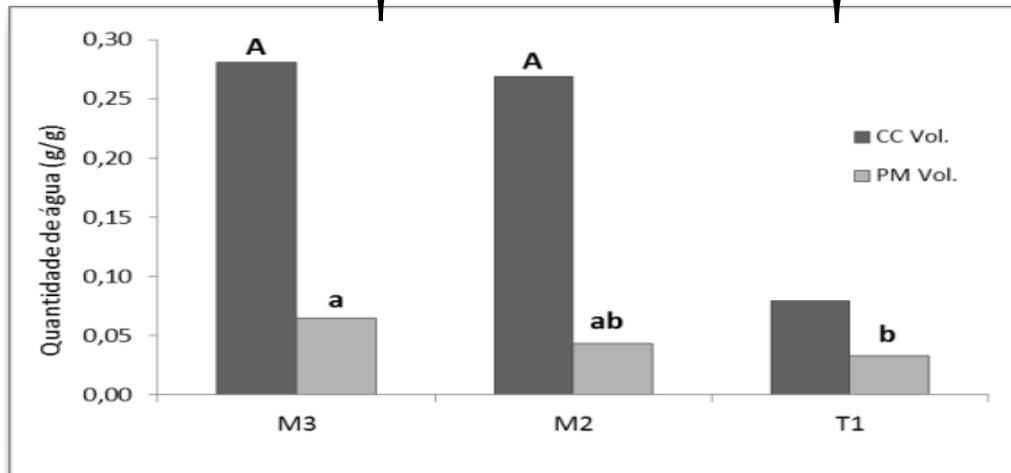
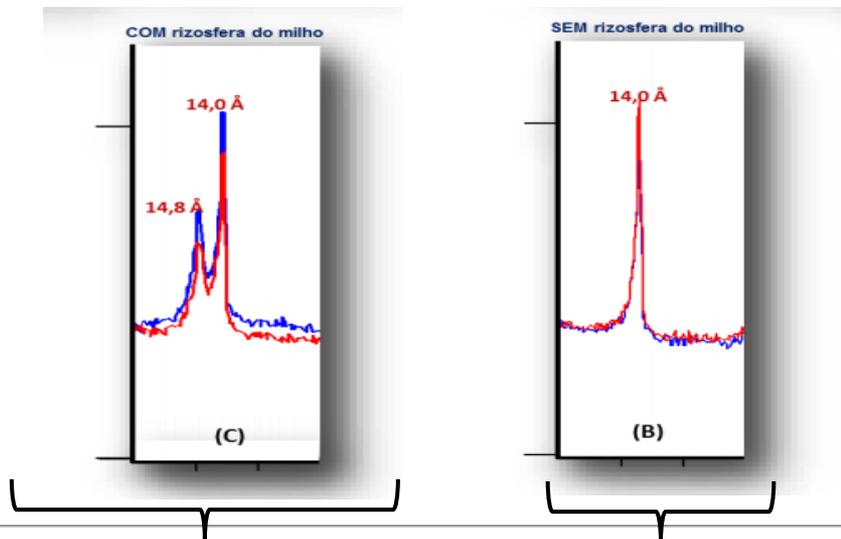
Vermiculita



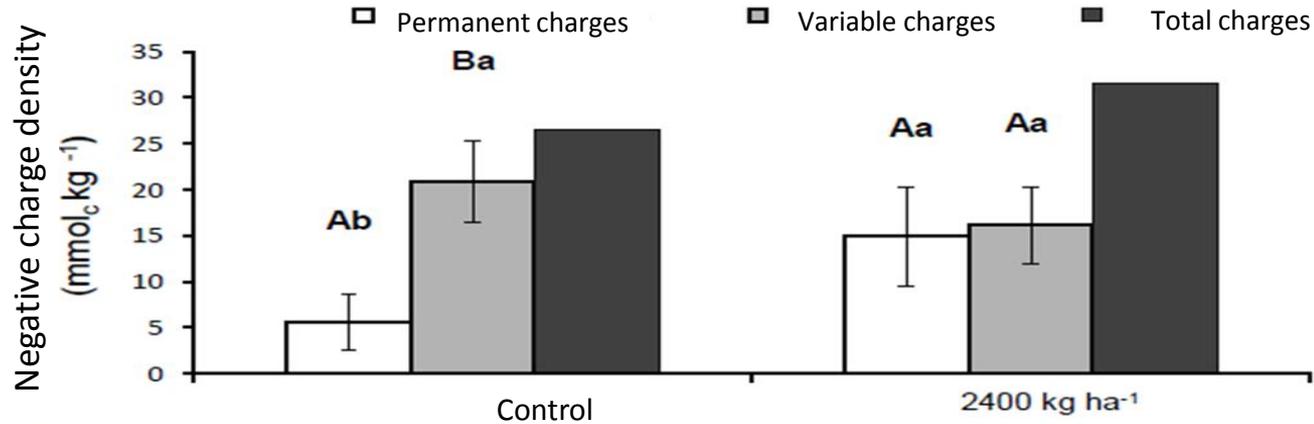
Hidrobiotita



Biotita

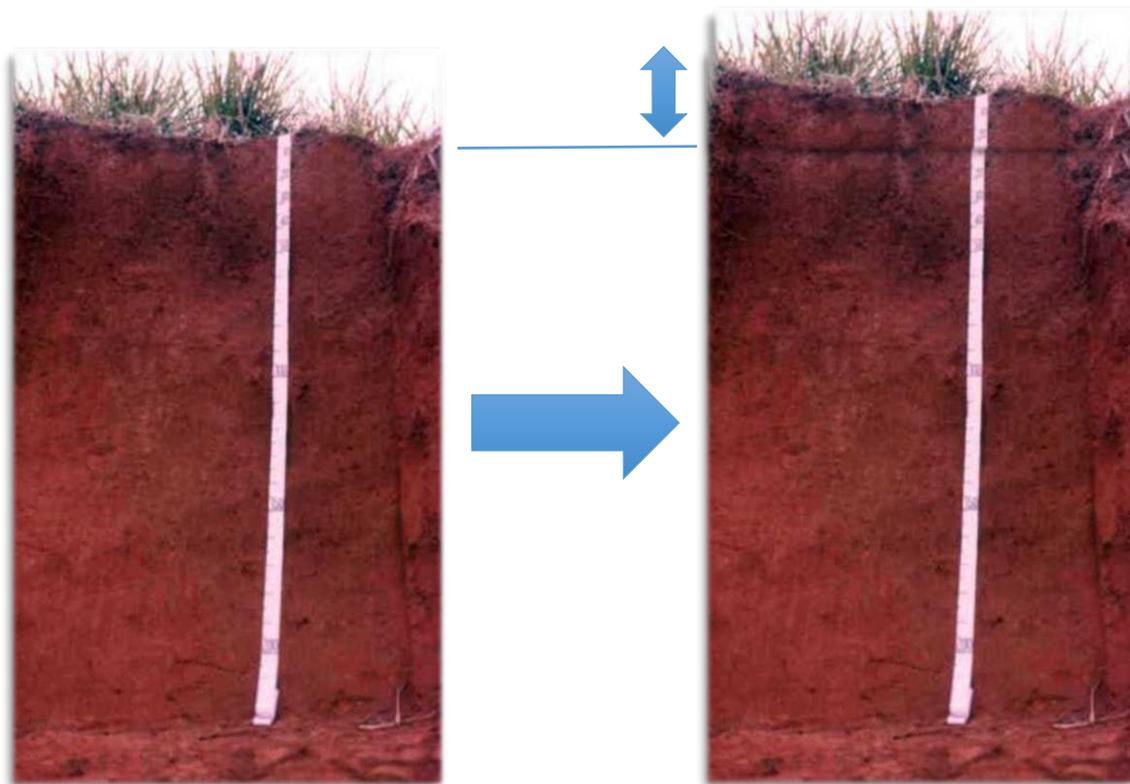


Formação de carga superficial



SANTOS, L.F.; RODRIGUES, L.M.; MACHADO, L.L.; MOL, A.R.; SODRÉ, F.F.; BUSATO, J.G. CUNHA, J.C.; RUIZ, H.A.; FREIRE, M.B.G.; ALVAREZ, V.H.; FERNANDEZ, R.B. (2015) Cargas elétricas e liberação de nutrientes num Latossolo sob adição de sienito finamente moído. XXXV CBCS, Natal-RN, Resumos. Disponível: <http://www.cbcs2015.com.br/anais/index.php#menuanais>

Formação de solo



1 cm a cada 50 ou 100 anos
(1 a 2 toneladas por ano)

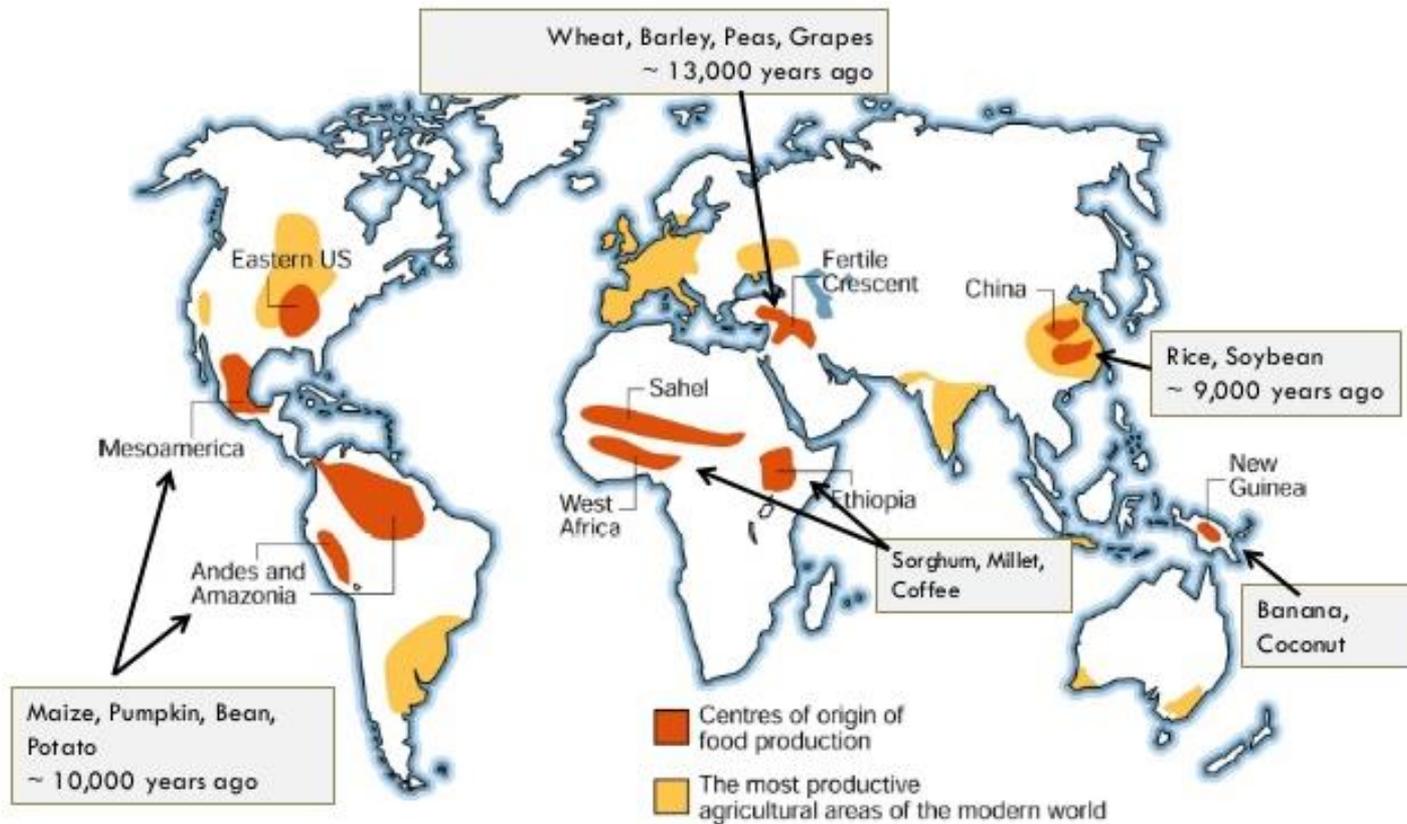
Processo natural:
1 cm a cada 1.000 anos

Biointemperismo



Fonte: Embrapa Cerrados 2017

Biointemperismo



Fonte: Guissen (2013) A coalition of plant and crop societies across the Globe

Variáveis Agrogeológicas

Agrominerais regionais

- Composição química
- Composição mineralógica
- Granulometria...

Solo

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

Sistema de cultivos

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

Clima

- Precipitação
- Temperatura
- Edafoclima...

Papel duplo dos remineralizadores de solos

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...



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



Instruções Normativas do MAPA

REMINEALIZADOR DE SOLO

IN 05 e IN 06/2016 publicado em 14/03/2016 altera
a Instrução Normativa Nº 14, de 15 de dezembro
de 2004 de substratos e inclui os remineralizadores

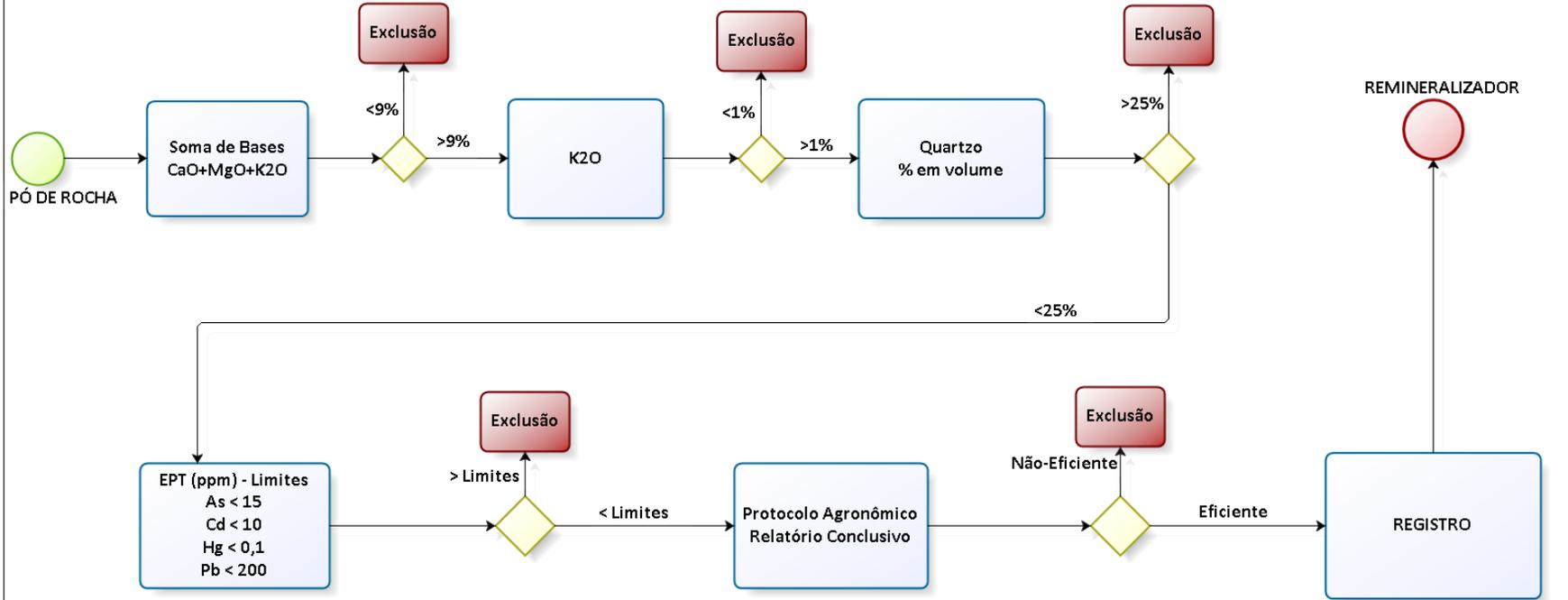


MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



Critérios para Registro no MAPA

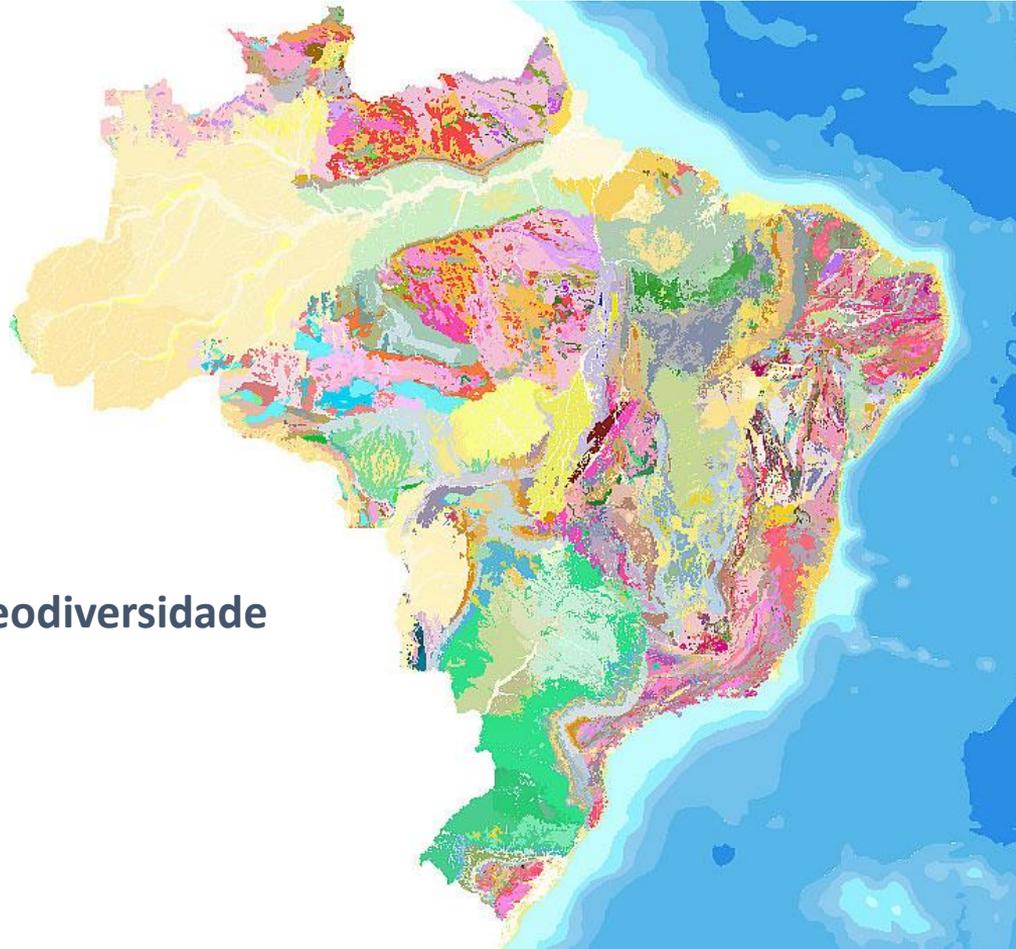
CRITÉRIOS DE NORMALIZAÇÃO



FLUXOGRAMA – Etapas de avaliação para registro

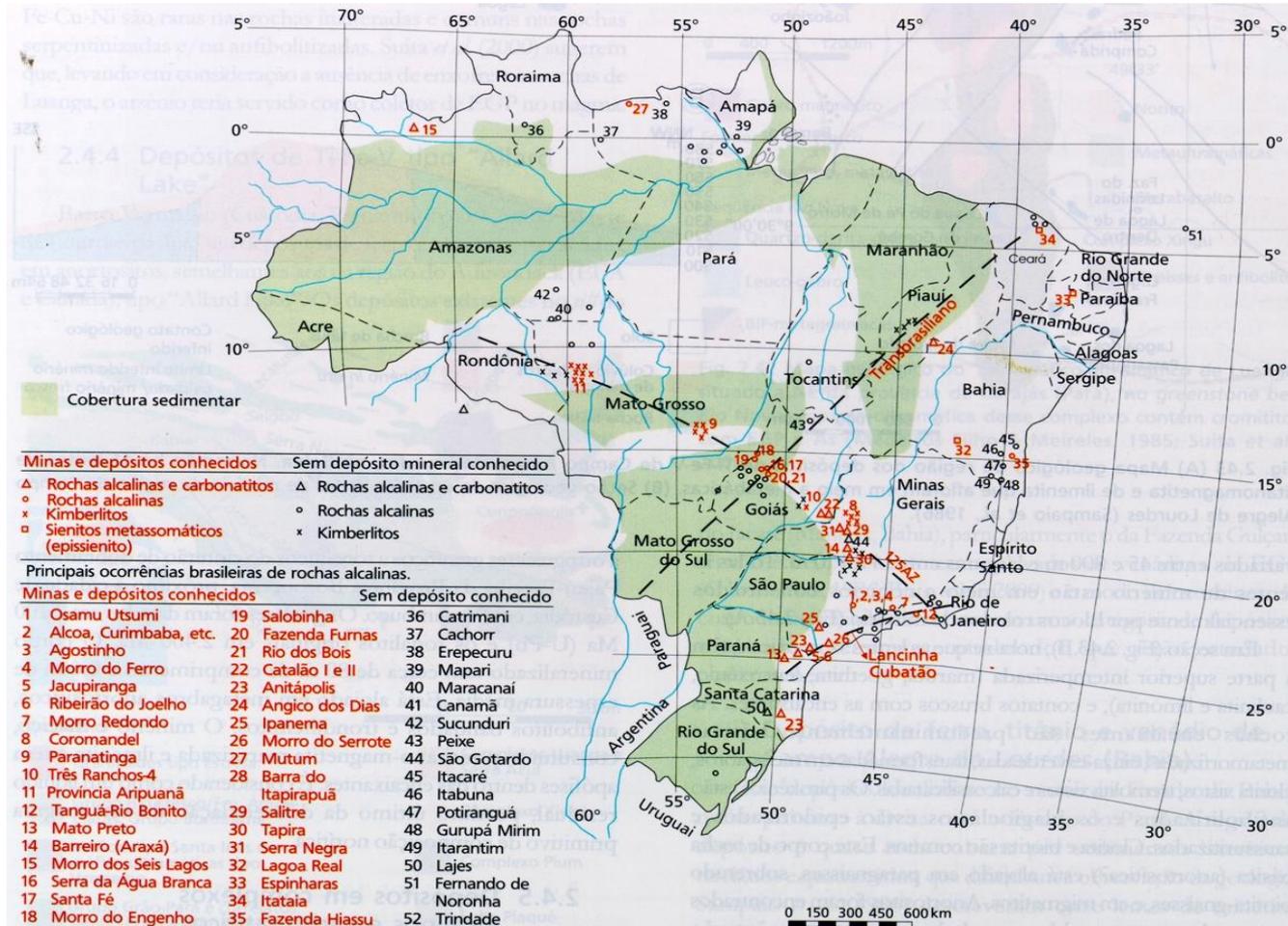
1. Soma de bases – mínimo 9%
2. K_2O – mínimo 1%
3. Quartzo – máximo 25%
4. Limites máximos de EPT em ppm (As<15, Cd<10, Hg<0,1, Pb<200)
5. Granulometria – farelado, pó ou filler; 6. pH de abrasão
7. Protocolo agrônomo (avaliação da eficiência agrônomo)

Potencial

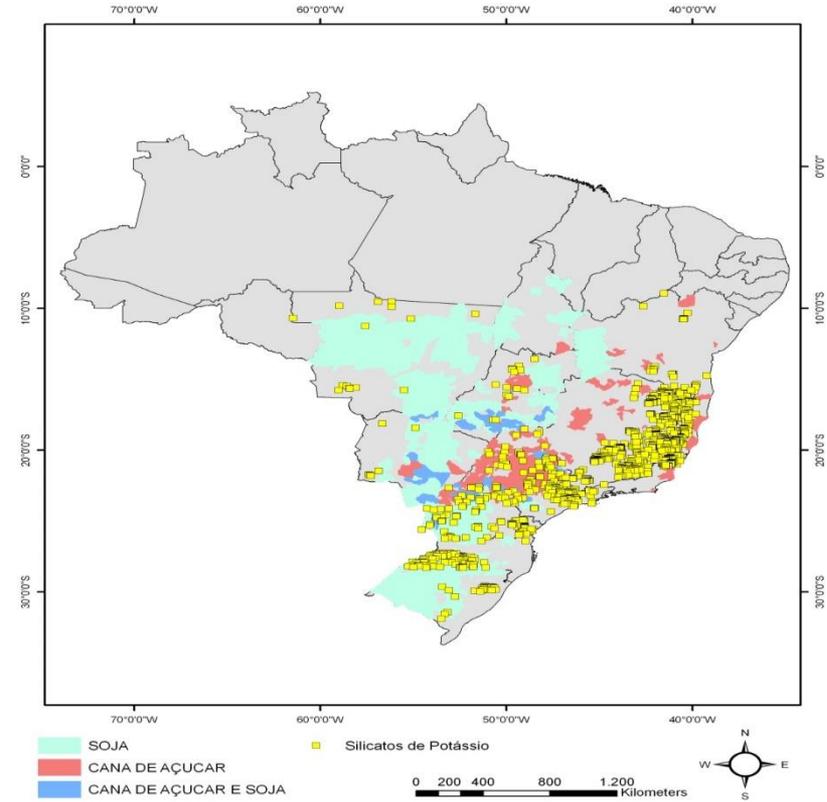
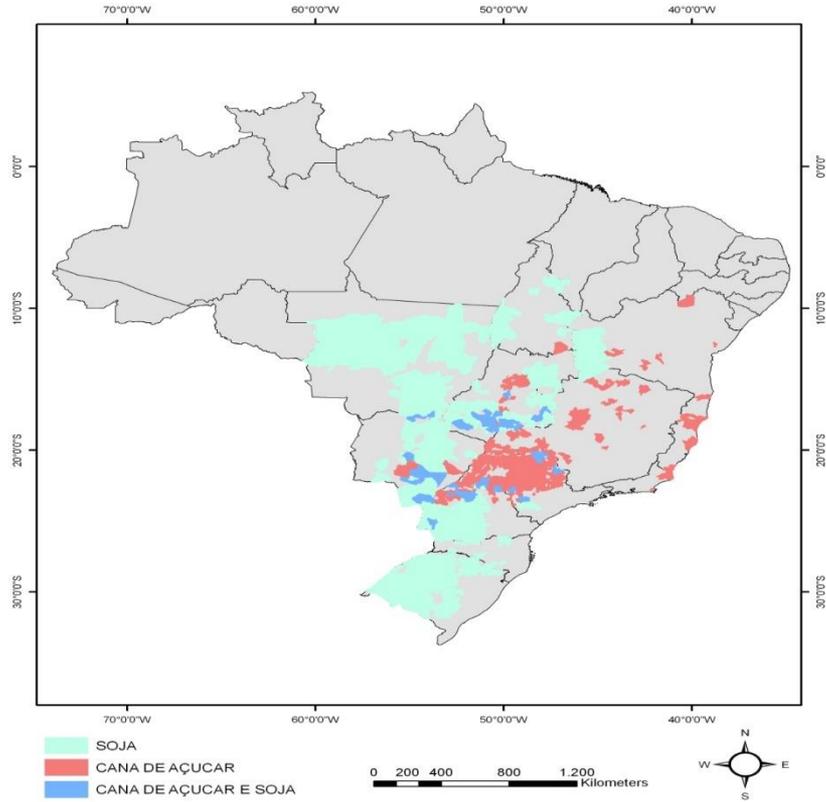


Megageodiversidade

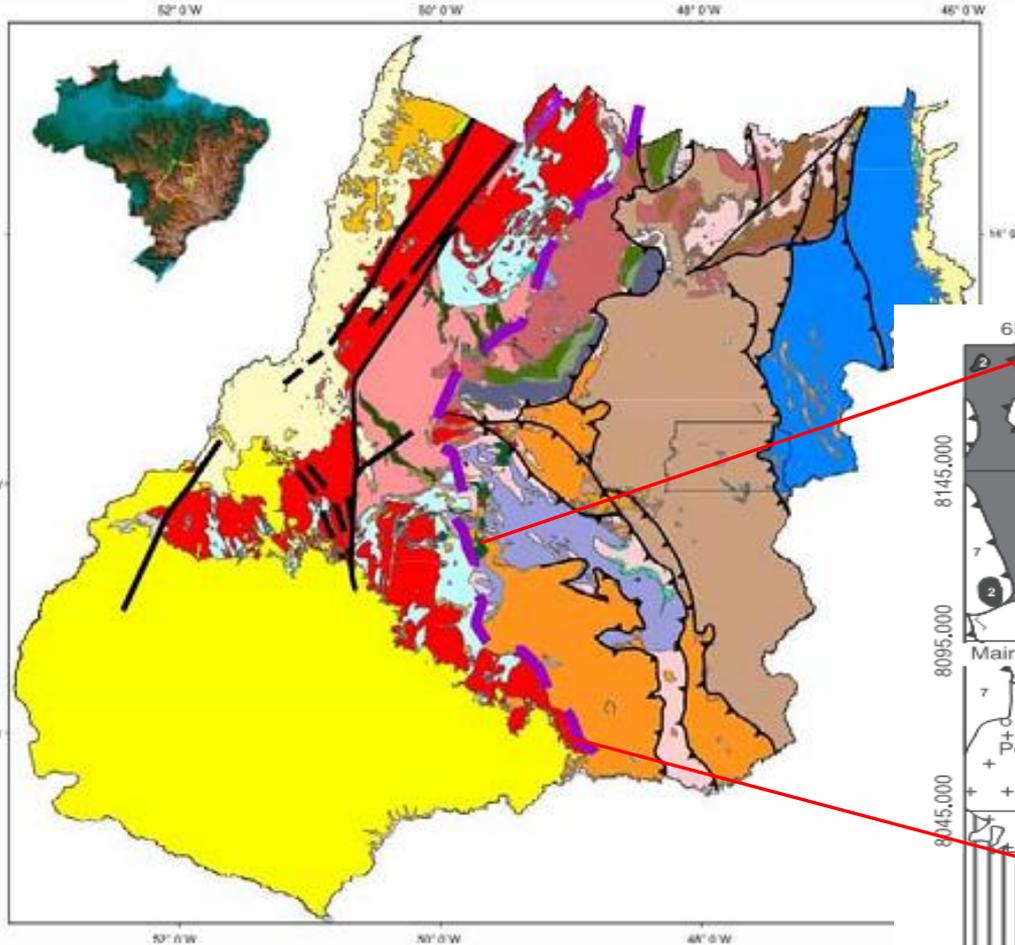
Potencial



Potencial

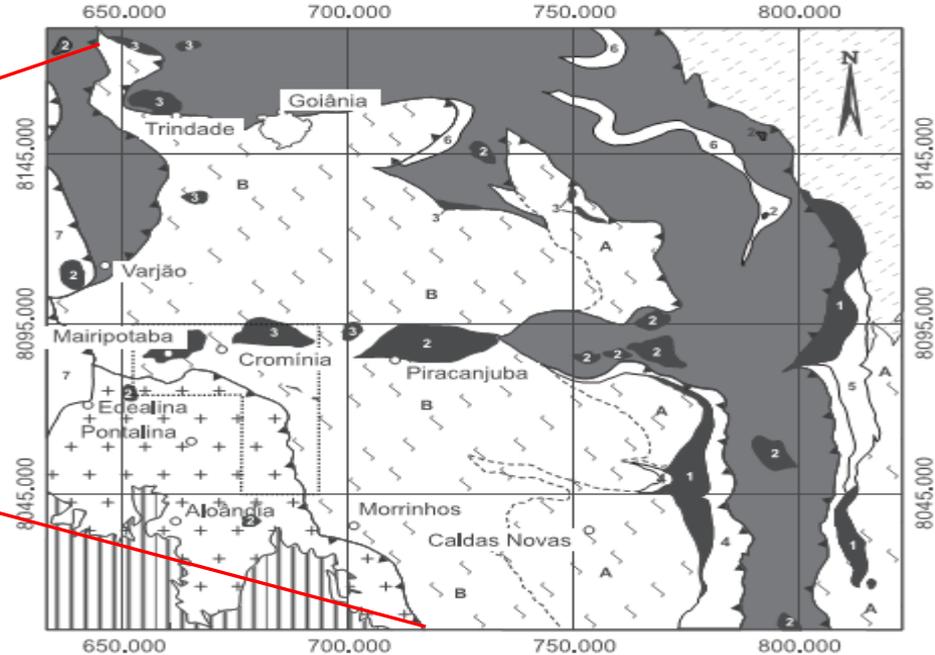


Zoneamento Agrogeológico

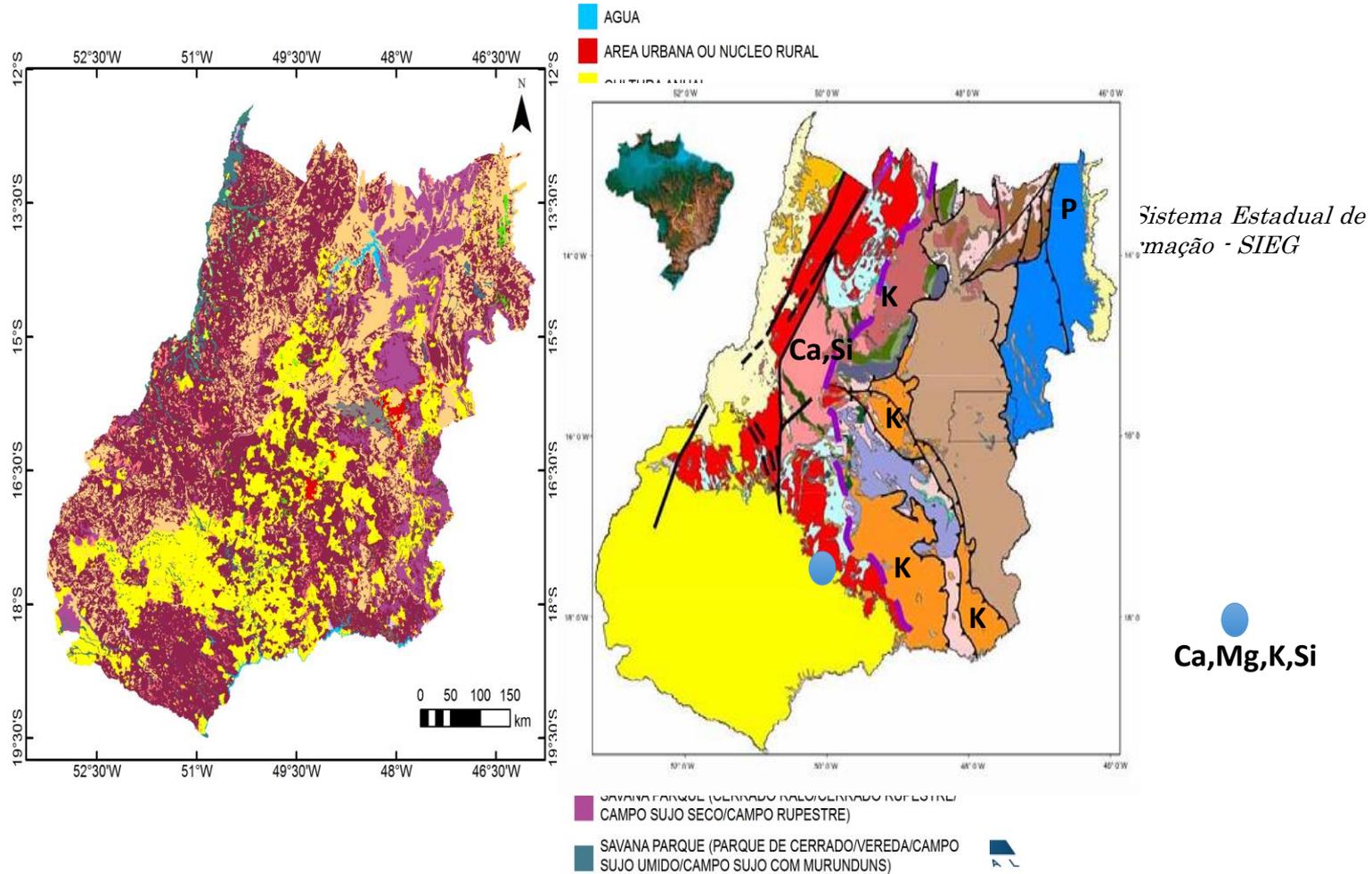


Fonte: Sistema Estadual de Geoinformação - SIEG

Fonte: Navarro et al. (2013)



Zoneamento Agrogeológico



Premissas de Usos de Agrominerais Regionais

Zoneamento Agrogeológico e Manejo

- Prospecção e caracterização de agrominerais regionais
- Rede de Experimentos Agronômicos em ambientes agrícolas representativos
- Avaliação das interações com outras fontes de nutrientes e formas de manejo



Flogopita xisto

Garimpo de esmeralda da região de Carnaíba, Ba



Fonte: Embrapa 2006



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO





Resíduos ricos em biotita e pirita Mineração Maracá, Chapada GO



Fonte: Embrapa 2006



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO





Cachoeiro do Itapemirim

Rocha ornamental



Fonte: Google 2013



Congonhas, MG

Esteatito



Fonte: WordPress, 2013

Grupo Araxá, Unidade B



Vista geral da Mineração Araguaia, mostrando frente de lavra (I), processo de britagem e moagem (II), bacias de decantação (III), pilha de finos (IV). (Fonte: MapLink, 2013).

Grupo Araxá, Unidade B

Elementos maiores presentes nas amostras. Análises realizadas pelo Laboratório ACME.

Oxidos (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	PF	Total
FMX	57,9	17,4	8,6	3,2	2,3	4,6	1,8	0,08	0,2	0,9	0,022	2,5	99,4

*PF – perda ao fogo

Estimativas da composição mineralógica do FMX a partir do MoDan.

Minerais (%)	Albita	Biotita	Muscovita	Clorita	Quartzo	Granada	Ilmenita	Total
FMX	26,2	21,4	9,7	15,8	19,7	5,7	1,1	99,6

2/3 do K₂O está na forma de biotita = 2,1%

1/3 do K₂O está na forma de muscovita = 1,1%

Grupo Araxá, Unidade B

Elementos maiores presentes nas amostras. Análises realizadas pelo Laboratório ACME.

Oxidos (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	PF	Total
FMX	57,9	17,4	8,6	3,2	2,3	4,6	1,8	0,08	0,2	0,9	0,022	2,5	99,4

*PF – perda ao fogo

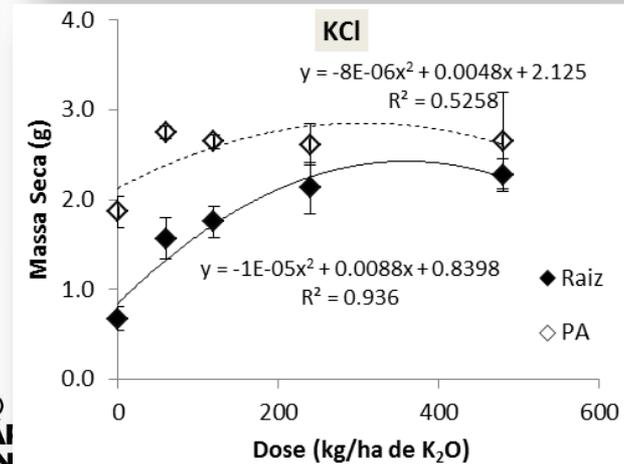
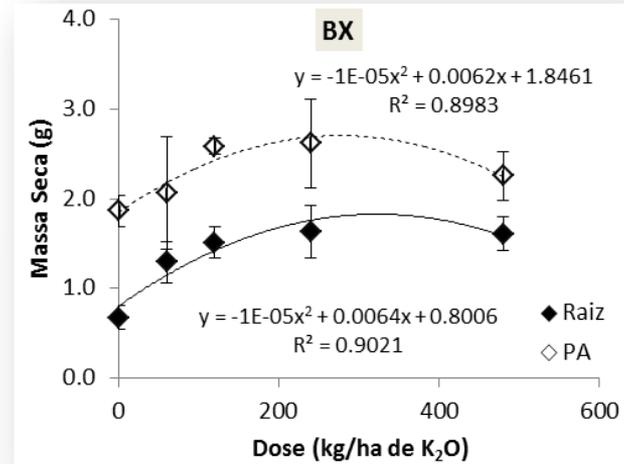
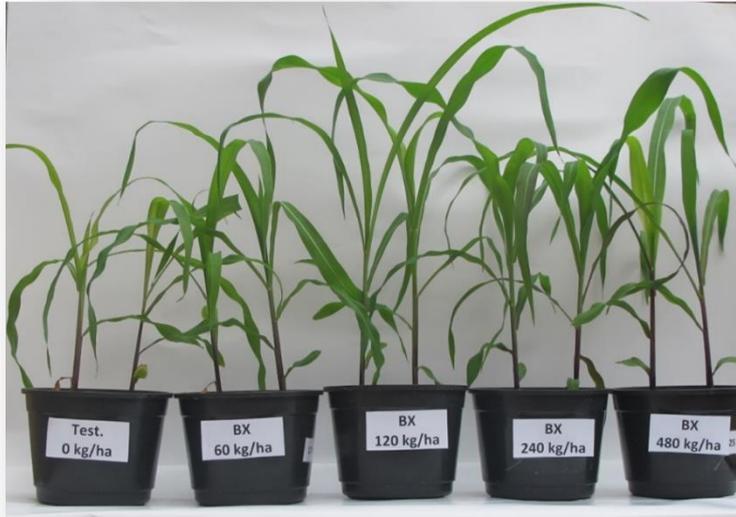
Micronutrientes presentes nas amostras. Análises realizadas pelo Laboratório ACME.

Micronutrientes	Fe ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	Co (ppm)	Ni (ppm)	Cu (ppm)	Mo (ppm)	Se (ppm)	Zn (ppm)	B (ppm)
FMX	8,97	0,06	28,5	87	66,6	1,5	0,6	142	37

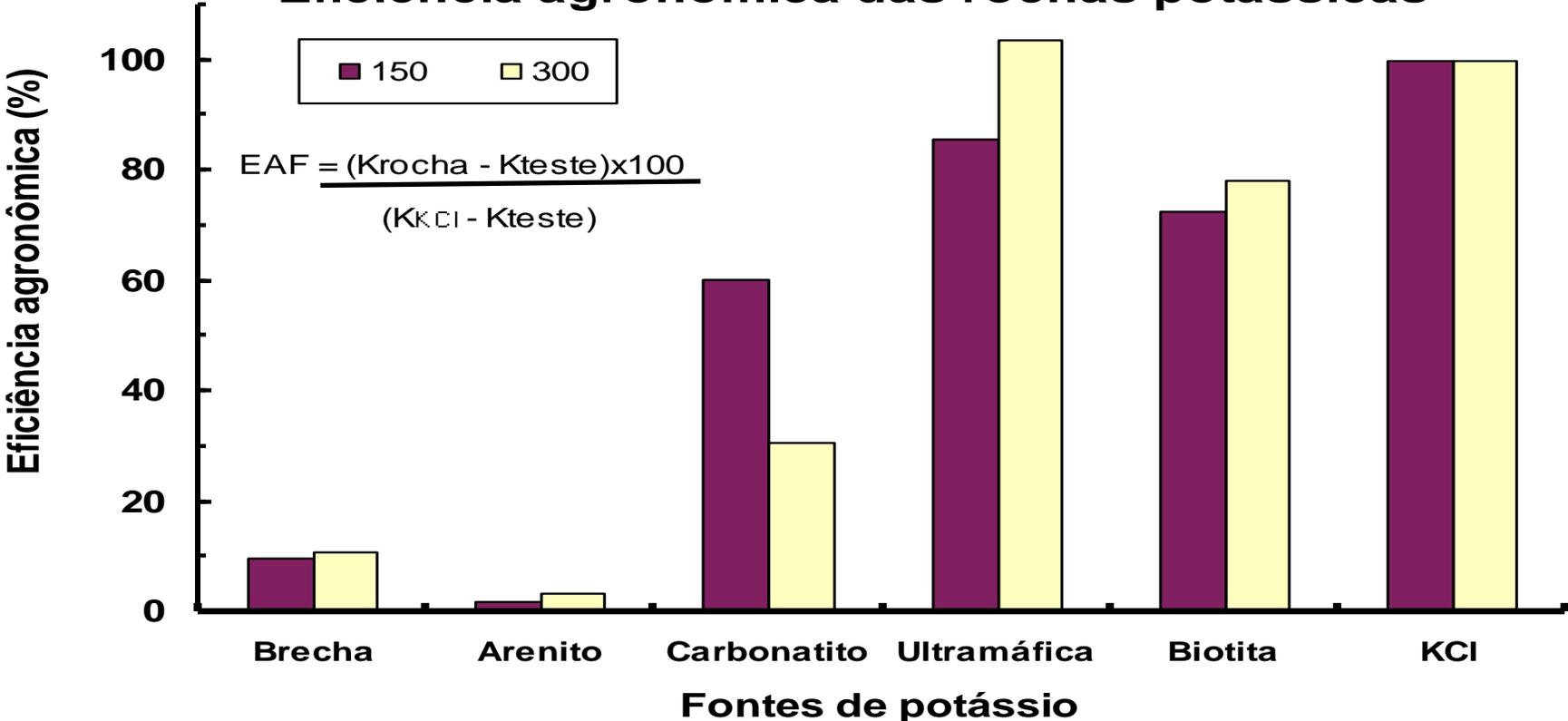
Elementos potencialmente tóxicos (EPT) presentes nas amostras. Análises realizadas pelo Laboratório ACME (dissolução total).

EPT (ppm)	Th	U	As	Bi	Cd	Hg	Pb	Sb	Tl	Cr	Ni
FMX	9,9	3,7	3,6	<0.1	0,1	<0.01	5,2	<0.1	0,6	164	87

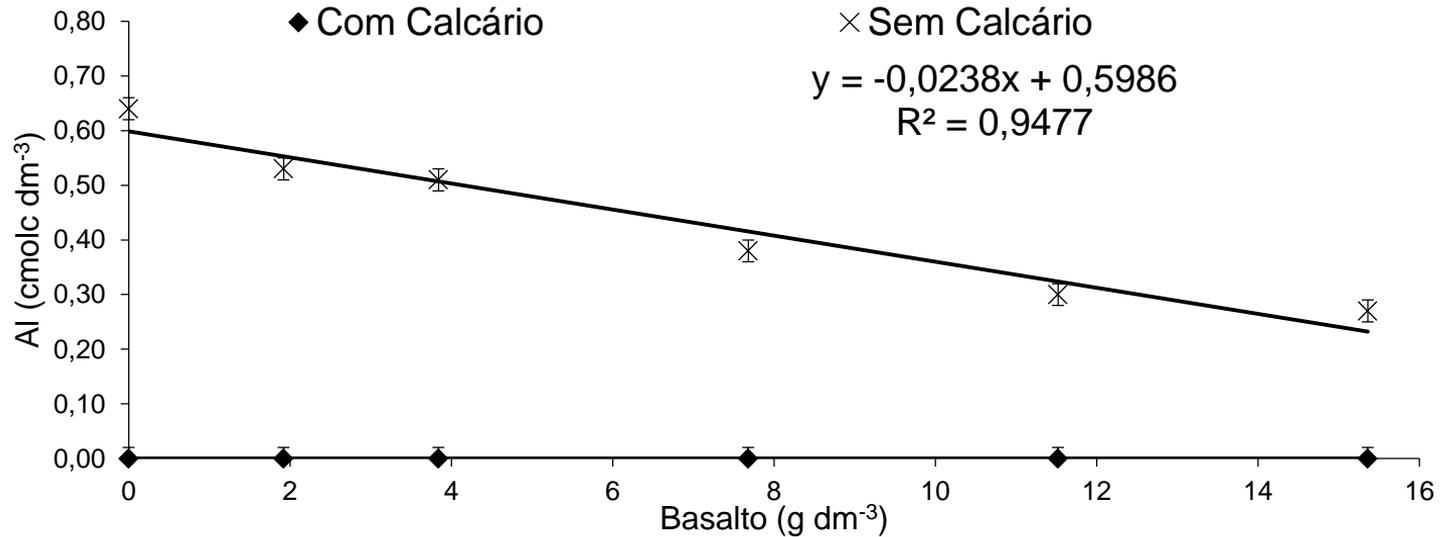
Avaliação do biotita xisto como fertilizante potássico



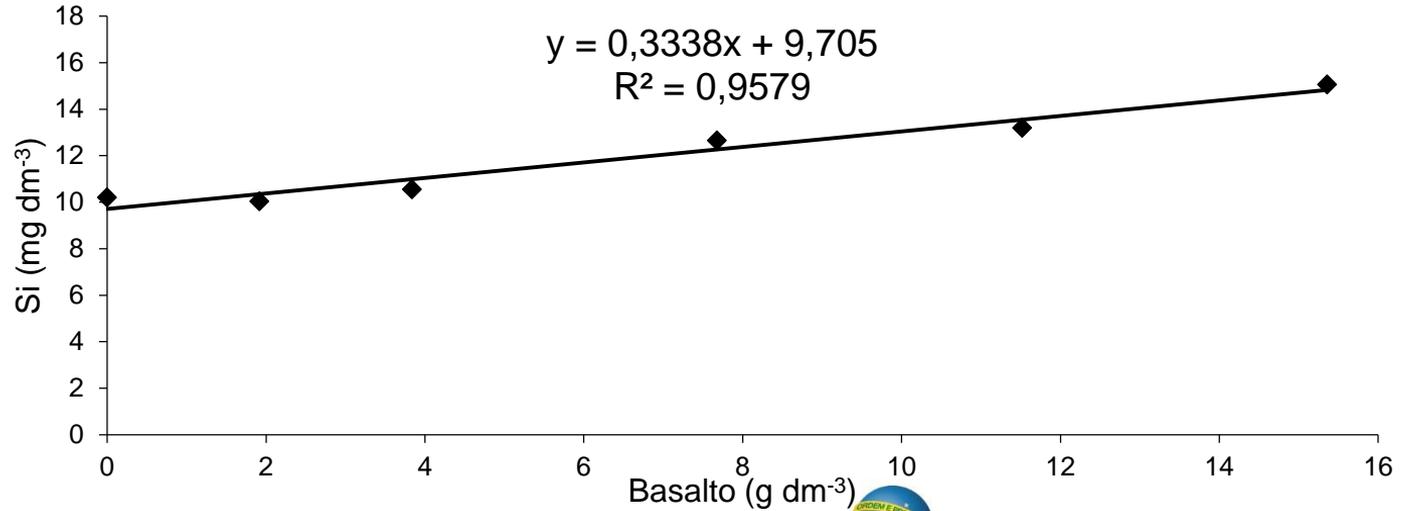
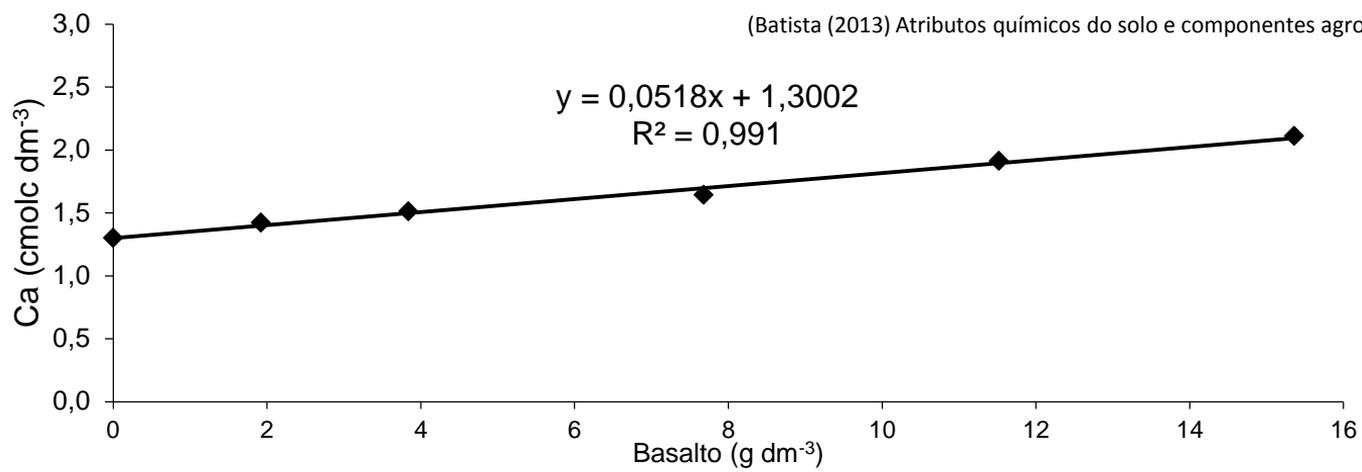
Eficiência agrônômica das rochas potássicas

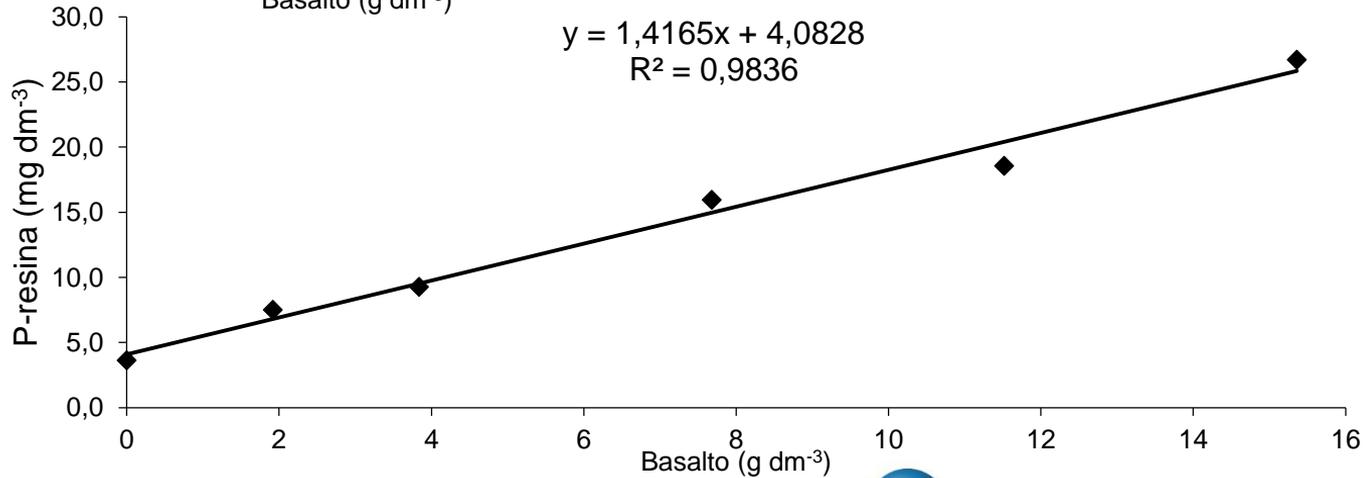
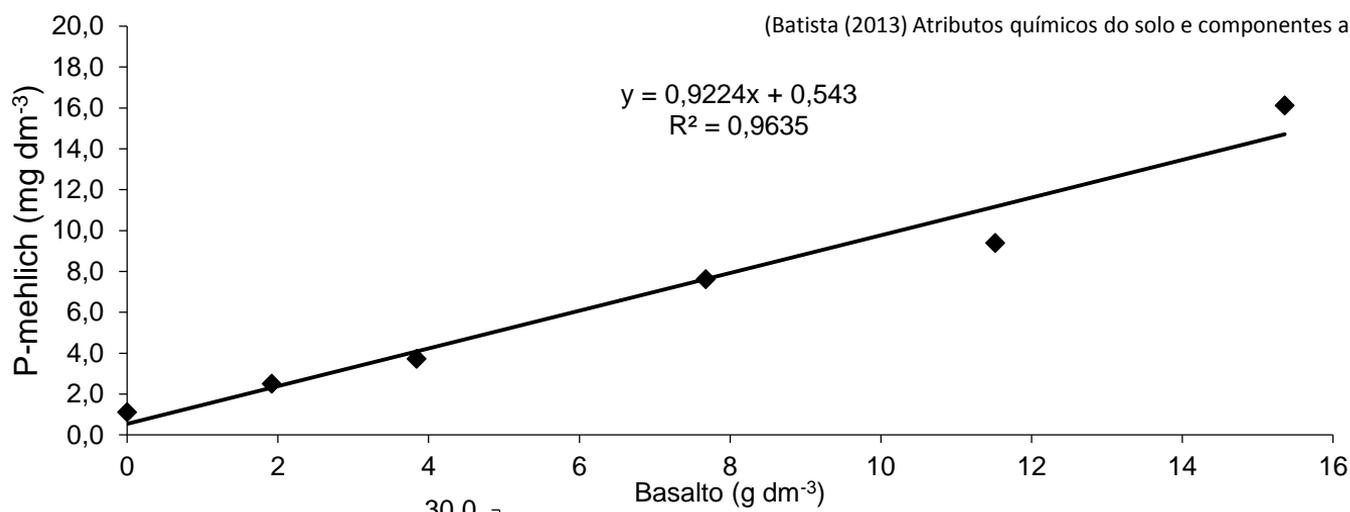


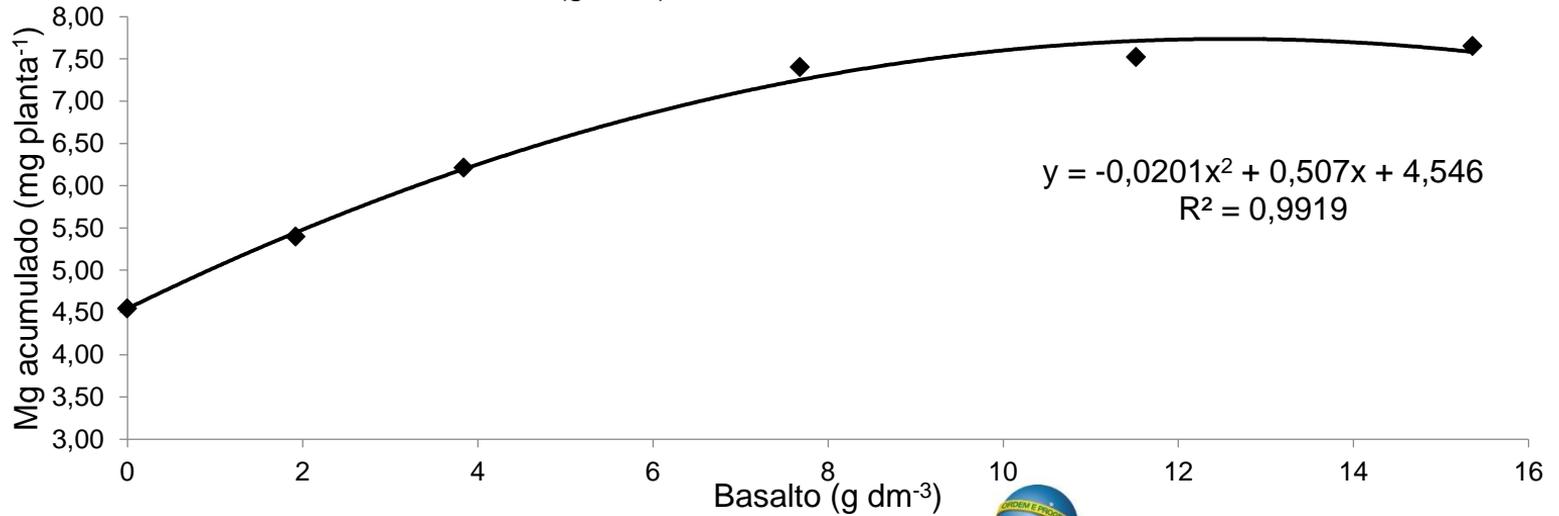
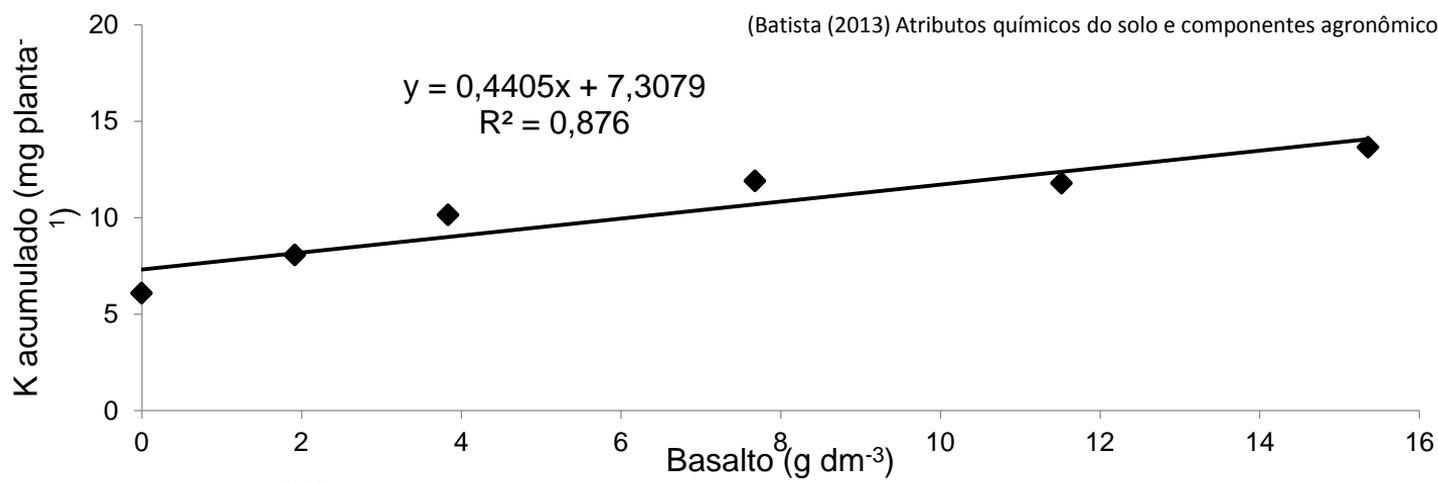
Basalto

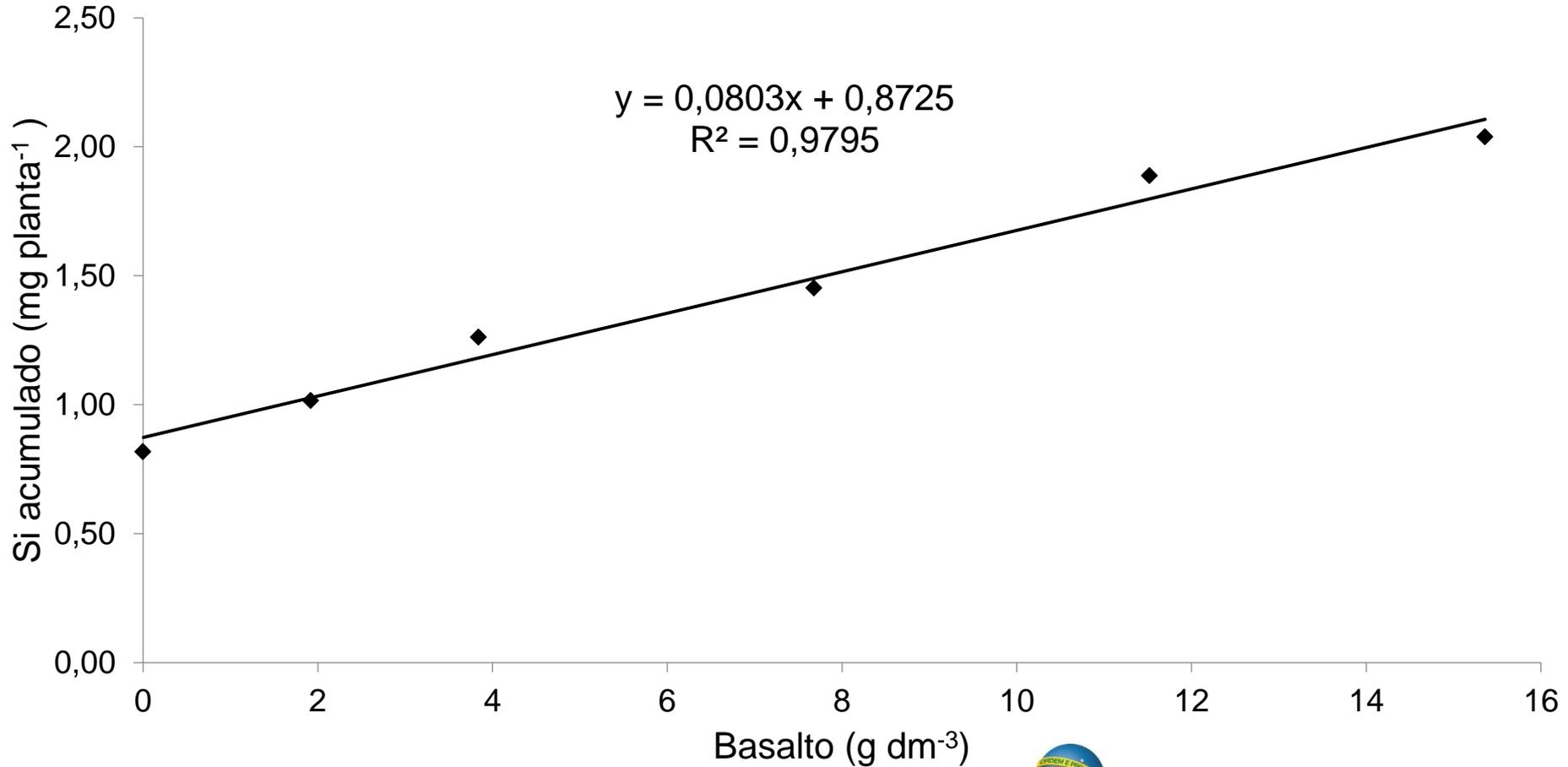


(Batista (2013) Atributos químicos do solo e componentes agrônômicos na cultura da soja pelo uso da rochagem)









Análise de Risco

Tabela 8 – Cálculos de número de aplicações necessárias de 20 toneladas por hectare para alcançar os valores de referência para solos brasileiros

Amostra	Co	Ni	Cu	Pb	Zn	Cd
Valor de referência¹	8	17	25	20	30	0,8
1% RT	0,2	0,08	0,5	0,4	1	0,006
Número de aplicações equivalente do solo	40	212	50	50	30	133

¹ Valores de referência para solos brasileiros de Fadigas et al. (2006)

Processo da Agrogeologia

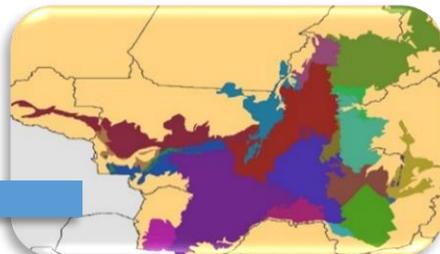
- 1. Agrogeologia:** *Estudo dos solos agrícolas e das fontes de nutrientes e condicionadores regionais;*
- 2. Seleção de resíduos:** *Seleção de resíduos em função da disponibilidade, composição química e mineralógica;*
- 3. Produção de rochas moídas:** *Definição da tecnologia e do grau de moagem em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



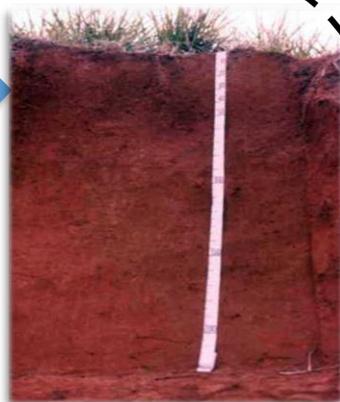
3. Produção de agrominerais



2. Seleção de resíduos

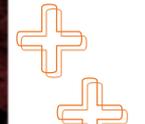


1. Agrogeologia



4. Manejo

Produção de solo



Produção de solo: *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...

GRATO!



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO

