



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO - UERJ
FACULDADE DE ENGENHARIA - FEN
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E DO MEIO AMBIENTE



Avanços e **(limitações)** desafios do uso da
fitorremediação na recuperação de áreas
contaminadas

Prof. Assoc. Marcia Marques

Laboratório de Biorremediação e Fitotecnologias-LABIFI



XXXIV
CONGRESSO BRASILEIRO
DE CIÊNCIA DO SOLO

28 de julho a 2 de agosto de 2013
Costão do Santinho Resort | Florianópolis | SC

Marco Legal no Brasil

- **Lei No 6.938 31/08/1981**...impõe ao poluidor e degradador a obrigação de recuperar e/ou indenizar danos causados;
- **Resolução CONAMA No 420 de 28/12/2009** – Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo (e água subterrânea) quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental...

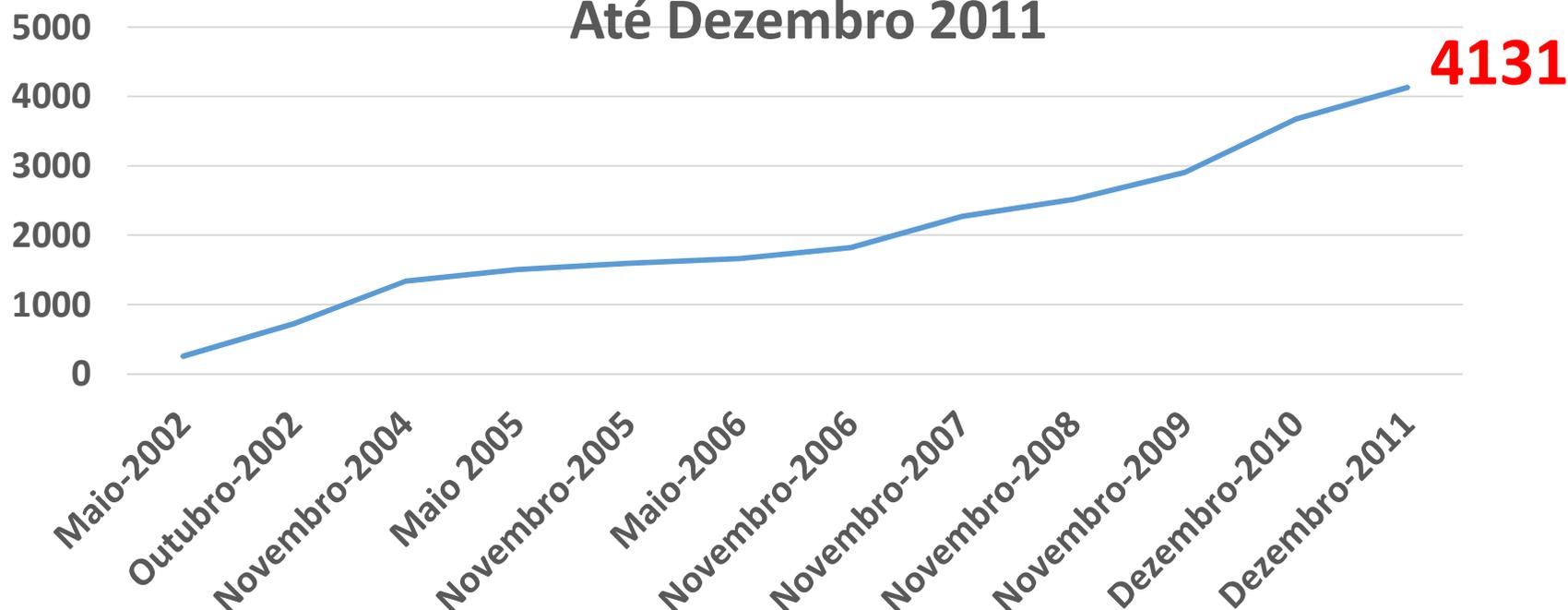
VRQs, VP, VI

- Art. 8º VRQs (*concentrações naturais* do solo para substâncias químicas naturalmente presentes) serão estabelecidos pelos órgãos ambientais dos estados e DF em até 04 anos após a publicação (Metodol. Anexo I) (**deadline: 27/12/2013**).
- **RELASC** – *Rede Latino-Americana de Prevenção e Gestão de Sítios Contaminados*

Dimensão do problema

- Comunidade Européia: 52 milhões ha (16% área total) com algum nível de contaminação (EEA, 2003).
- Austrália: Porto de Sydney (dioxina): USD 2 bilhões.
- Suécia: 78.000 sítios, USD 143 milhões/sítio, 52 anos para remediar 2% (Swedish EPA, 2005).
- Brazil: **????**
- Rio de Janeiro (INEA, 2013)
 - 141 áreas confirmadas (Baía de Sepetiba R\$ 185 milhões - Usiminas)
 - 600 áreas com suspeitas, a serem confirmadas

São Paulo: Áreas Contaminadas Cadastradas Até Dezembro 2011



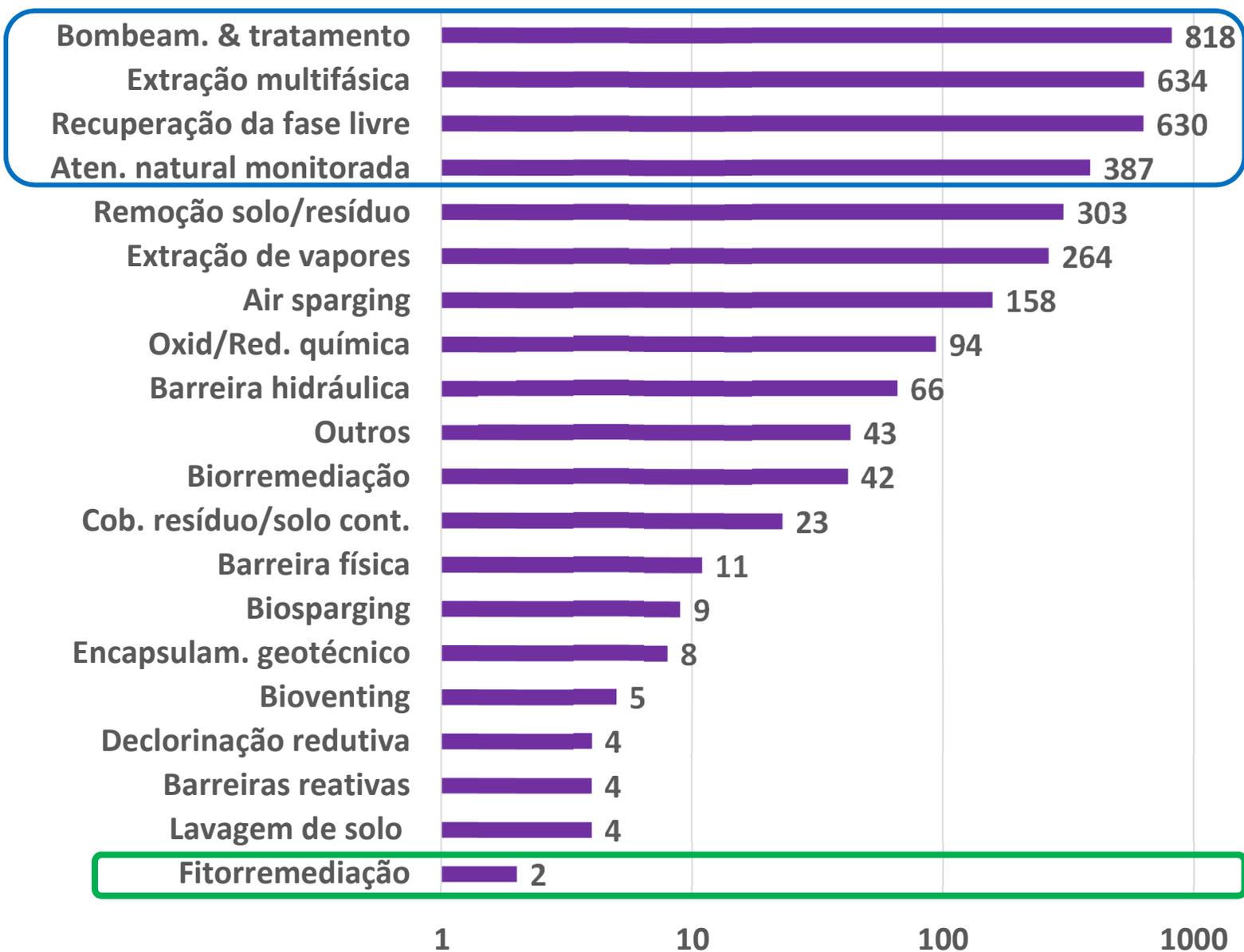
Áreas Contaminadas no Estado de São Paulo - dezembro de 2011

Região	Atividade					Total
	Comercial	Industrial	Resíduos	Postos de combustíveis	Acidentes/ Desconhecida/ Agricultura	
São Paulo	52	146	30	1.093	8	1.329
RMSP - outros	35	148	23	492	10	708
Interior	68	192	43	1.231	15	1.549
Litoral	20	43	24	226	3	316
Vale do Paraíba	4	48	1	175	1	229
<i>Total</i>	179	577	121	3.217	37	4.131

79%

0,9%

Técnicas de Remediação Aplicadas 3.509 vezes ao todo (CETESB, Dez/2011)



**Água
Subter-
rânea**

Técnicas físico-químicas de remediação

- Lavagem de solo, dessorção térmica, oxidação avançada (ex: Fenton), escavação e disposição final, etc.
- **Rápidas, apropriadas para contaminações altas;**
- **Destroem propriedades do solo;**
- **Causam poluição 2ária do ar, da água;**
- **Custos muito mais altos;**
- **Disposição em aterro/incineração: USD 200-1500/ton**
- **Risorremediação: USD 10-50/ton**

Fitotecnologias > *Fitorremediação*

- “Aplicação da ciência e da engenharia para estudar problemas e fornecer soluções envolvendo plantas (**UNEP, 2003**)”
- **Telhados verdes, barreiras verdes, campinas pantanosas (bioswales):** *Uso de plantas para o controle de enchentes, conforto térmico, ruído, ou simplesmente função paisagística.*

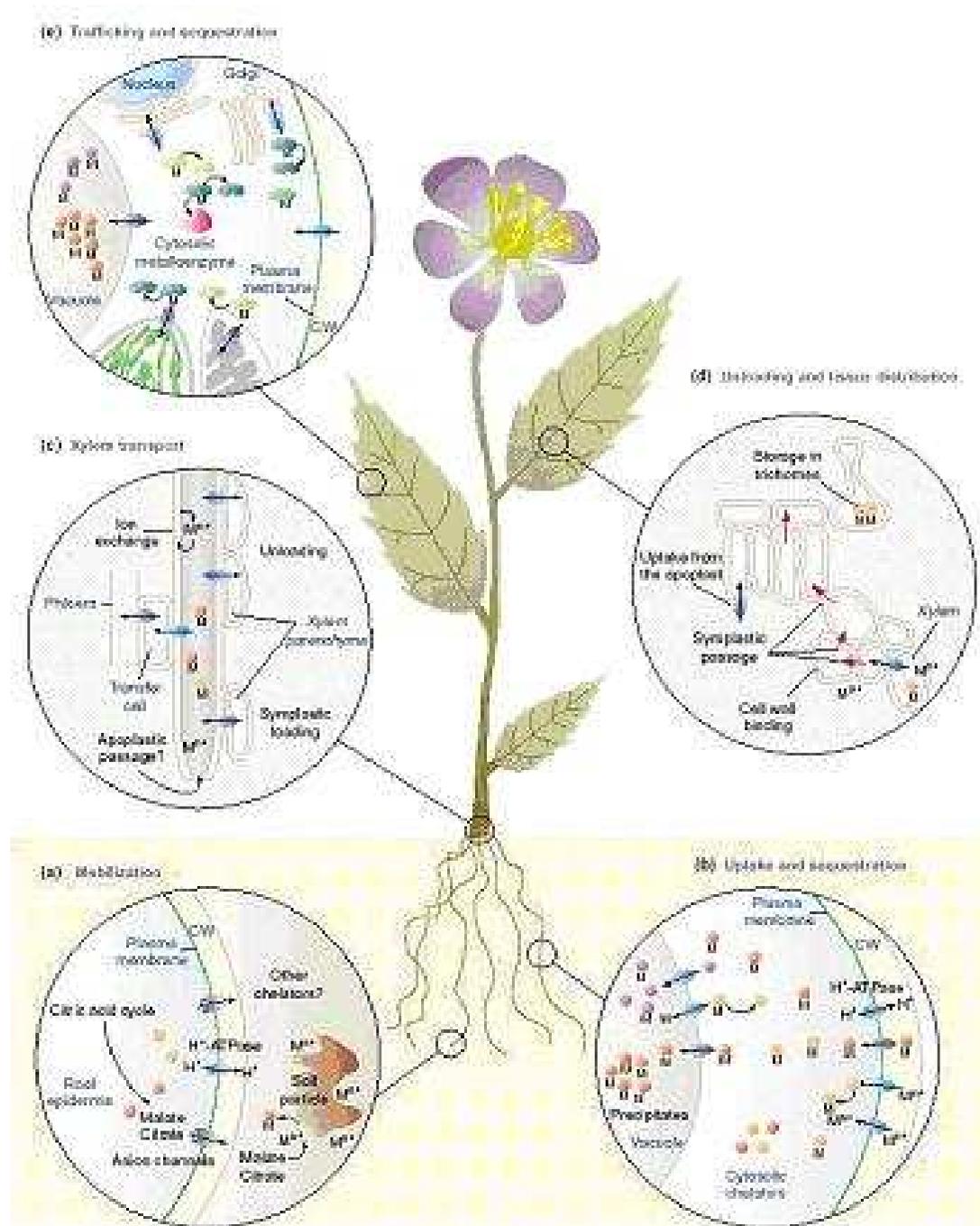


Fitorremediação (a partir anos 80-90)

Uso de plantas e microbiota associada à rizosfera para o tratamento

in situ

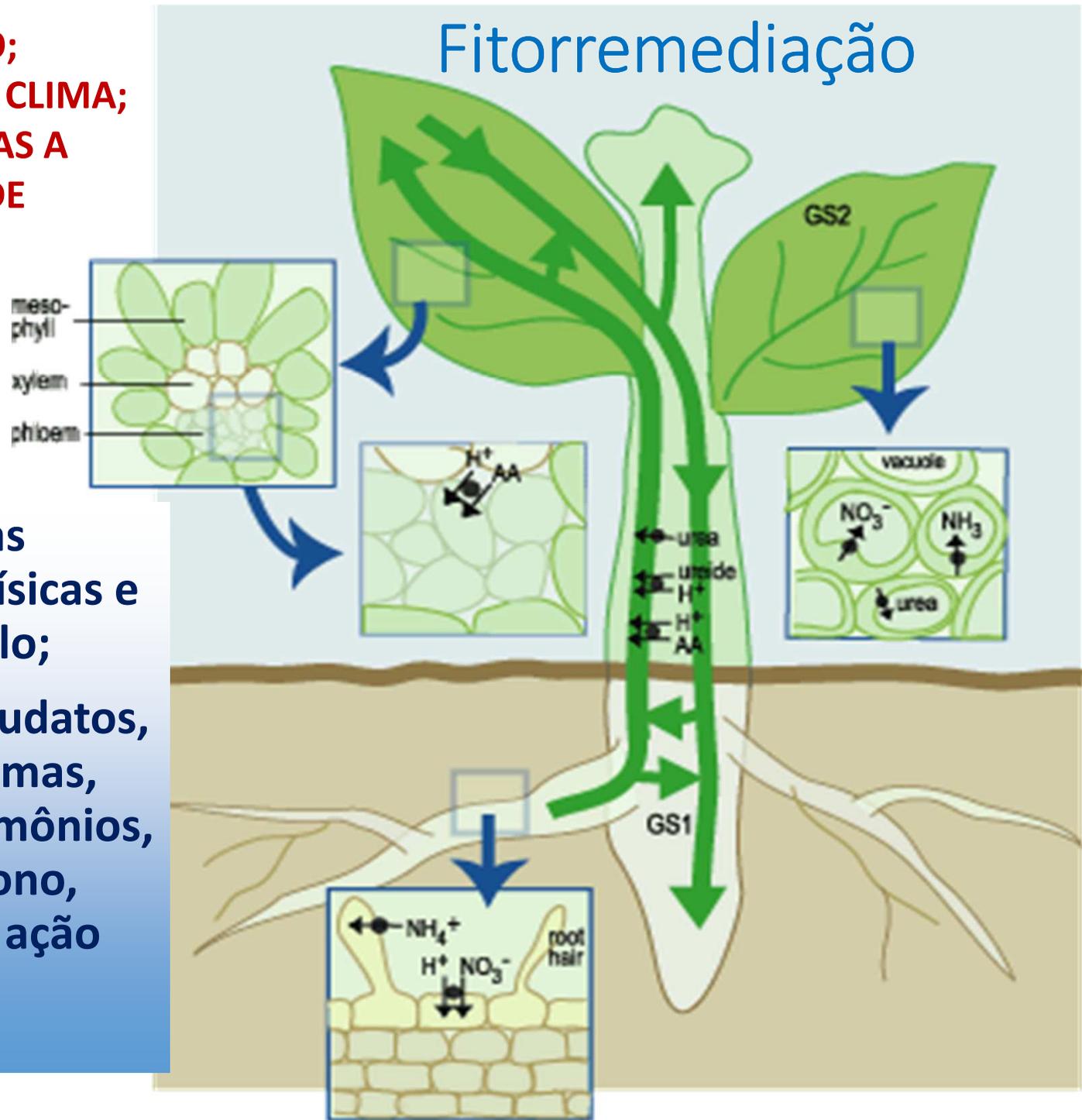
de solo, sedimentos, água subterrânea, superficial e ar contaminados.



FONTE: CLEMENS et al (2002)

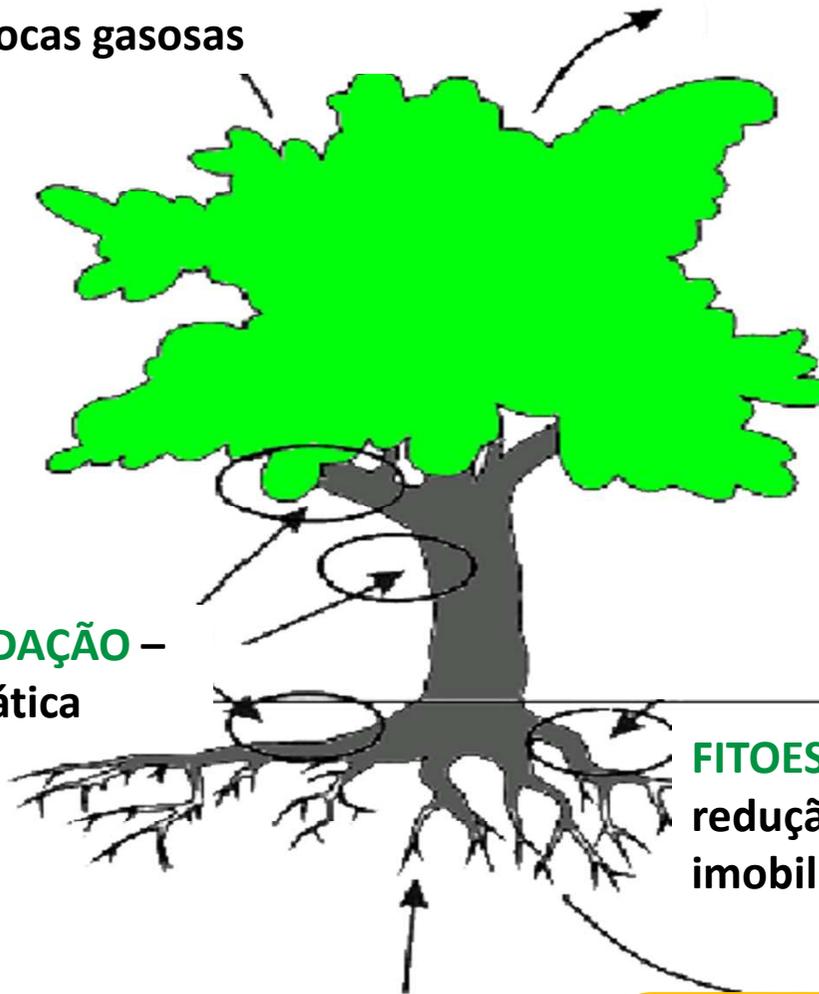
- 1) PROCESSO LENTO;
- 2) DEPENDENTE DO CLIMA;
- 3) APLICÁVEL APENAS A BAIOS TEORES DE CONTAMINANTE;

- 1) Preservação das propriedades físicas e químicas do solo;
- 2) Secreção de exudatos, tais como: enzimas, vitaminas, hormônios, fontes de carbono, que auxiliam a ação microbiana.



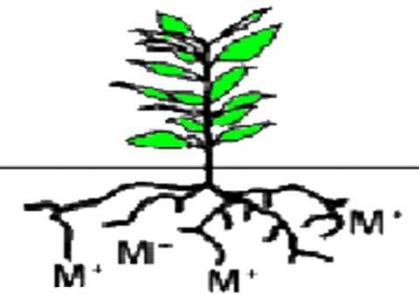
FITOVOLATILIZAÇÃO – Compostos de baixo P.M. volatilizados através dos estomas - trocas gasosas

EVAPOTRANSPIRAÇÃO
H₂O + VOC



FITODEGRADAÇÃO –
Ação enzimática

FITOACUMULAÇÃO -
Extração e acumulação
na biomassa



FITOESTABILIZAÇÃO
redução solubilidade e
imobilização- adsorção

FITOEXTRAÇÃO – Contaminantes
penetram no interior da planta

RIZODEGRADAÇÃO (RIZORREMEDIAÇÃO)

Raízes, exudatos, solo e microbiota da rizosfera: degradação de compostos tóxicos

Macrófitas flutuantes



Eichhornia crassipes (aguapé)



Célio Maeda

Macrófitas Semi-submersas



Lotus nymphaeae

Espécies aquáticas na fitorremediação



Echinodorus grandiflorus
Chapéu de couro

Macrófitas submersas



Elodea canadensis



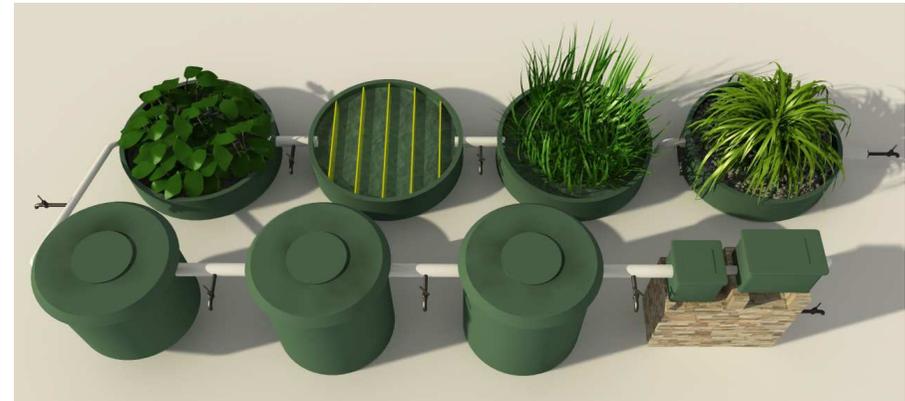
Isoetes lacustres



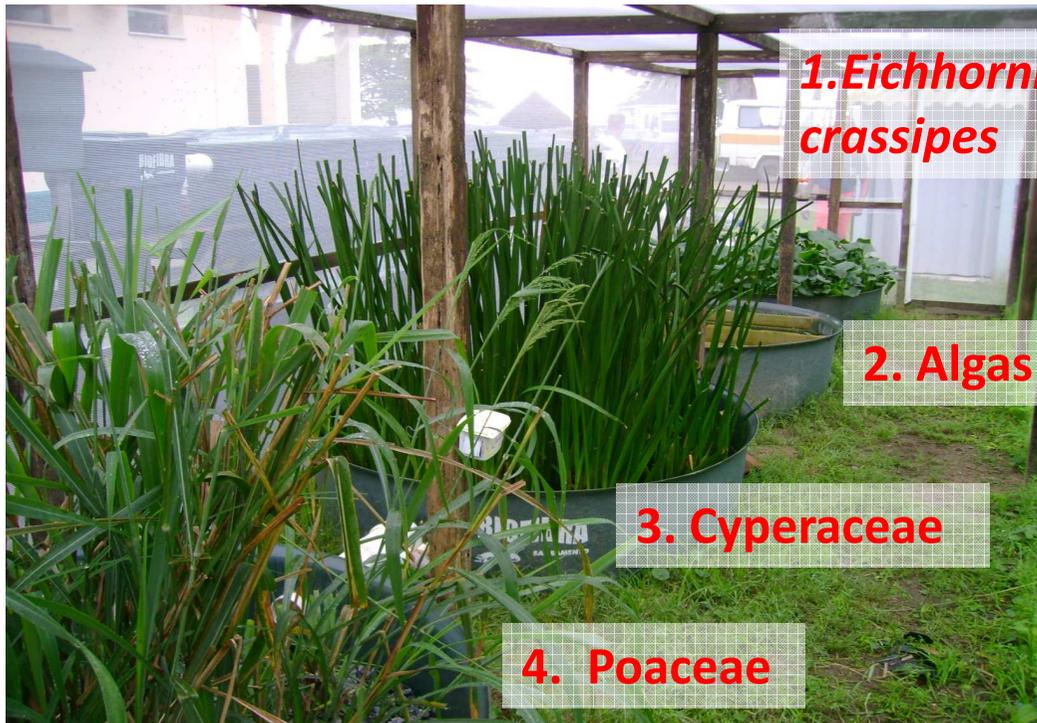
Typhia latifolia
cattail

Ecosistema Engenheirado - Ilha Grande, RJ

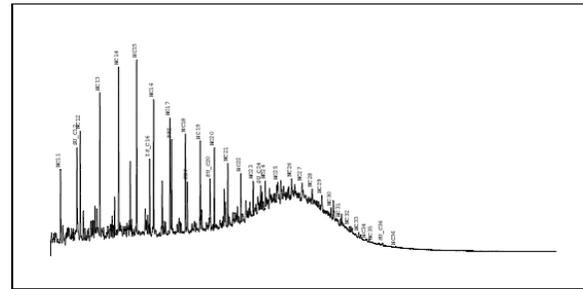
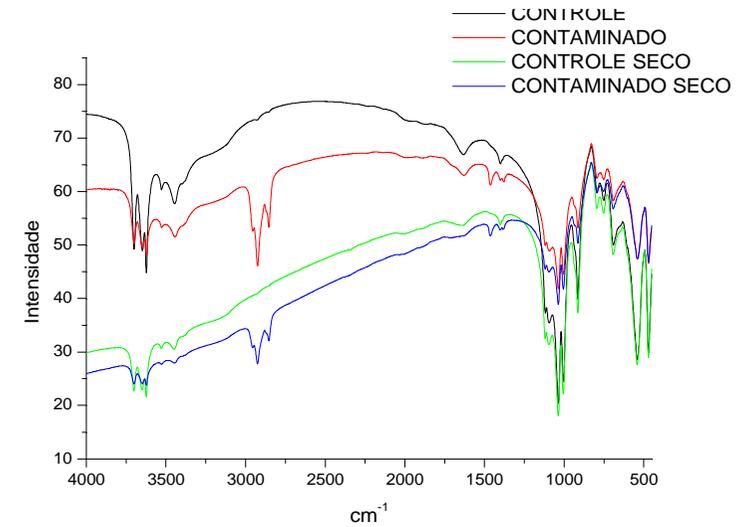
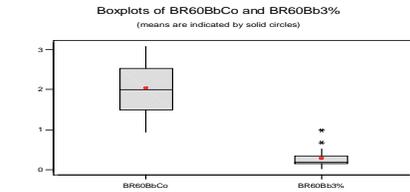
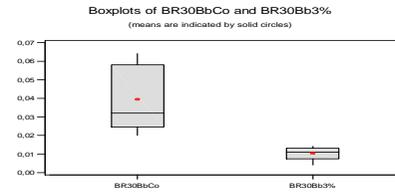
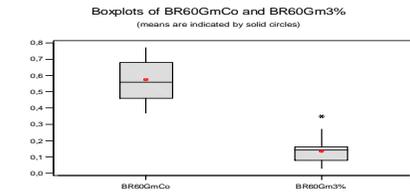
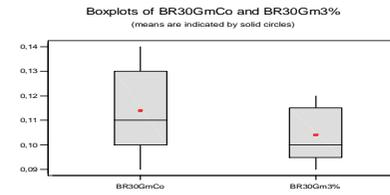
Tratamento esgotos- pequenos geradores



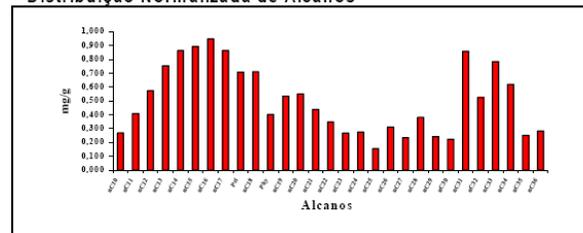
•Vazão de 52 L/h → TRH 4,56 dias (109 h), capacidade de tratamento = 1050 L/dia.



Estratégias e Desafios da Fitorremediação de Solos



Distribuição Normalizada de Alcanos



AGREGAR VALOR: BIOMASSA COM USO ENERGÉTICO



Helianthus sp
Asteraceae (Compositae)



Glycine max
Soja



Nabo forrageiro
Raphanus sativus



Ricinus communis
(Euphorbiaceae)
mamona



Tibuchina sp.
Melastomataceae



B. brizantha
Braquiária



Ruta graveolens (arruda)



Avaliar Tolerância



Screening: Germinador X Estate de Crescimento X Telado





Avaliação Comparativa

PROCESSOS ABIÓTICOS (NaN_3)

ATENUAÇÃO NATURAL

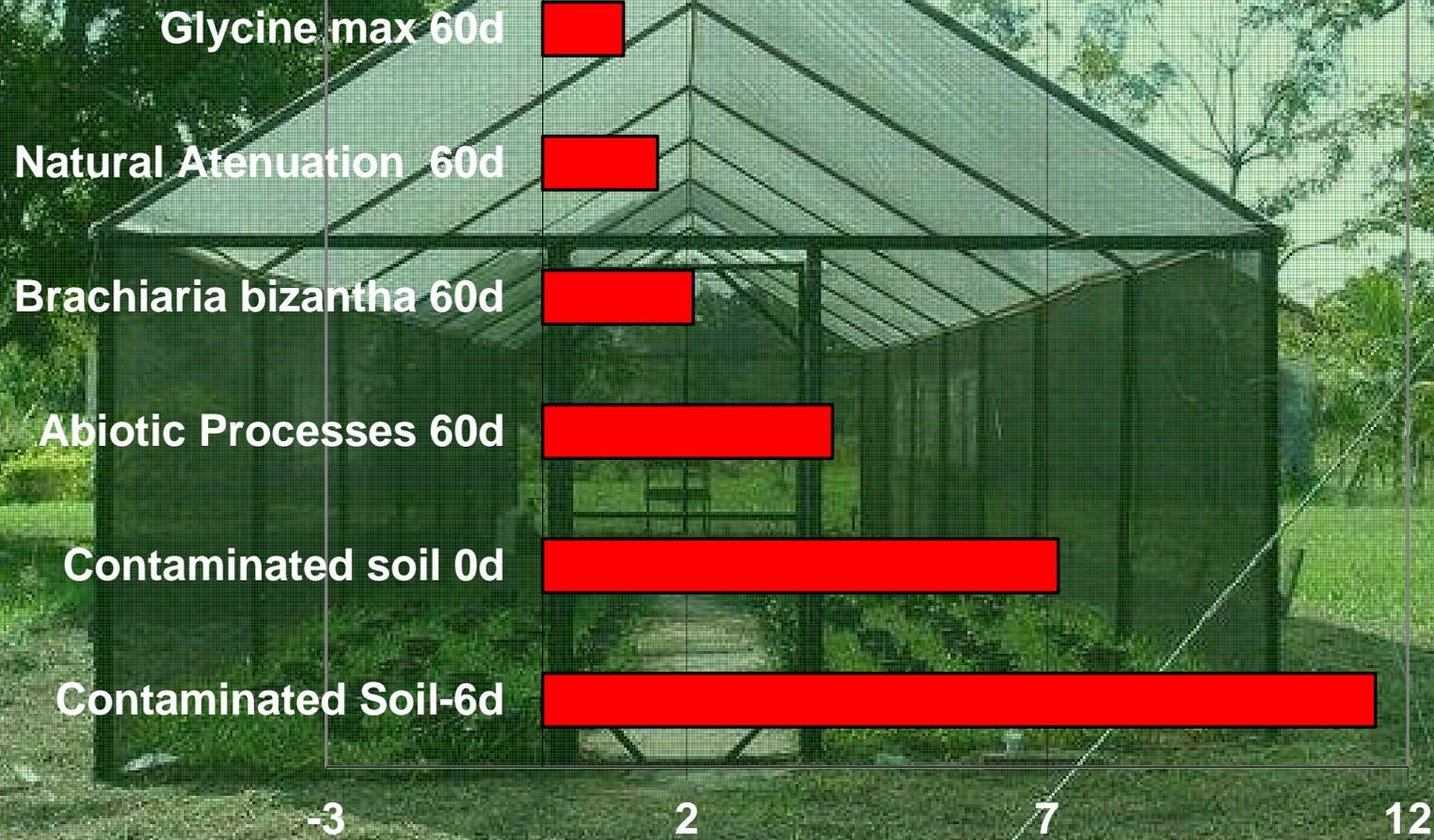
BIOESTÍMULO

FITORREMEDIAÇÃO

(Glycine max e Brachiaria brizantha)



Total PAHs (mg kg⁻¹ DM)



TREATMENT	Soil -6d	Soil 0d	AP 30d	NA 30d	Gm 30d	Bb 30d	PA 60d	AN 60d	Gm 60d	Bb 60d
REDUCTION %	-62	0	-154	24	8	23	44	78	84	71

Fito-extração de metais

ESTRATÉGIAS:

- 1) Fenótipos vegetais que acumulam grandes conc. de metais nas partes aéreas (fator de bioacumulação BCF: mg metal/kg biomassa);
- 2) Uso de fenótipos com capac. acumuladora mediana mas alta produção de biomassa aérea;

DESAFIOS: Transferir para o campo o sucesso de c.v.

3) Melhor dos mundos: tolerantes, **crescimento rápido** (*muitos fatores genéticos e não-genéticos envolvidos*) e **hiperacumuladoras** (*poucos loci genéticos, mais fácil de manipular-transgênicos*).

DESAFIOS: Barreiras regulatórias e aceitação

Fito-extração de metais

ESTRATÉGIA:

4) Tratamento químico com agentes quelantes ou surfactantes para aumento da mobilidade dos metais e melhor remoção pela planta (ácido cítrico, **EDTA**, **CDTA**, **DTPA**, **EGTA**, **EDDHA** e **NTA**, TWEEN 80, biocarvão)

5) Inoculação de micorrizas na rizosfera de algumas espécies aumenta a fitoextração de metais

DESAFIO:

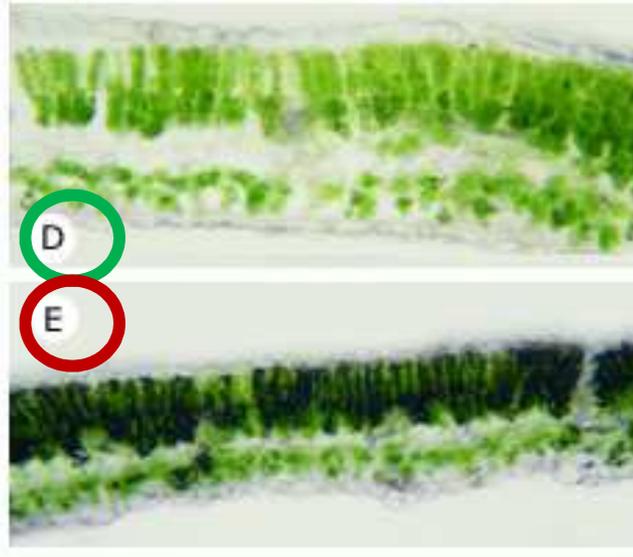
- **Aumento da mobilidade dos metais no solo também aumenta os riscos de contaminação da água subterrânea.**



(A)SOJA 30 DIAS
Controle e
Contam óleo cru

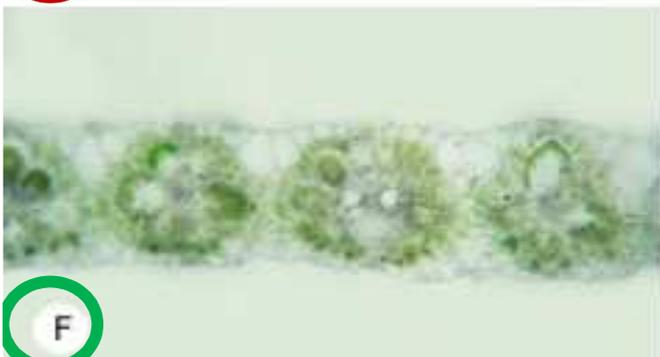
Seccão transv. folha
nervura

(B)Soja - Controle
(C)Soja - Contam



Seccão transv. folha
limbo

(D)Soja – Controle
(E)Soja – Contam



BRAQUIARIA
Seccão transv. folha
limbo

(F)Braquiária Controle
(G)Braquiária Contam

Reduzir o stress que limita cresc. de biomassa

ESTRATÉGIA:

1. Rizobactérias Promotoras do Crescimento Vegetal (PGPR) que expressam

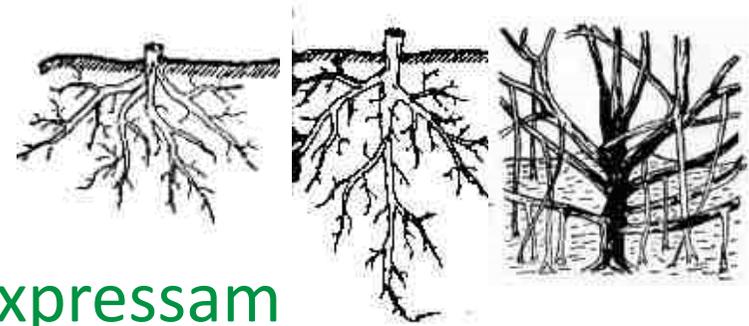
ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico deaminase

(quebra o precursor do etileno - resposta ao stress, reduzindo p crescimento radicular).

PGPR tb aumentam a absorção de nutrientes (Ex: *Festuca arundinacea* Huang et al, 2004 (Env. Pollut. 130:465-476).

2. Bactérias endofíticas (naturais ou geneticamente modif.)

DESAFIO: Transferir para o campo o sucesso em c.v.

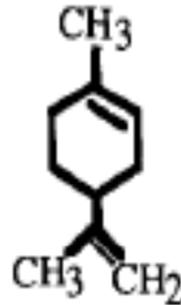


Rizodegradação: Análogos naturais para aumentar a microbiota biodegradadora

Analog

Pollutant

Plant-derived hydrocarbons:



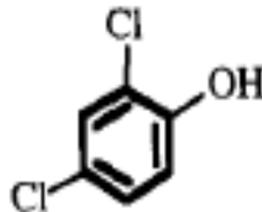
limonene



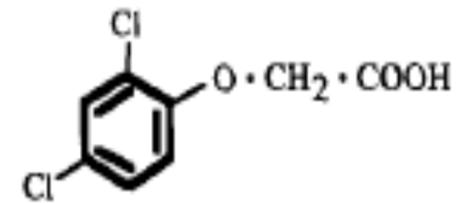
p-xylene

TERPENO associado a *Pinus ponderosa*

Chlorinated organics:



2,4-dichlorophenol



2,4-dichlorophenoxyacetic acid
(2,4-D)

DESAFIO: ANÁLOGO PODE ATUAR COMO PREFERENCIAL

Multi-plantio

ESTRATÉGIA:

- **MULTI-PLANTIO:** Elevação e diversificação da biomassa microbiana do solo e, conseqüentemente, das enzimas degradadoras.
 - *Medicago sativa* (alfafa),
 - *Brassica campestris* (colza) e
 - *Trifolium repens* (trevo branco)
- (Wei & Pan, 2010)

DESAFIO: Levar para o campo o sucesso em c.v.

Multi-processos

ESTRATÉGIA:

- Biorremediação (landfarming no passado) + Inoculação com microbiota biodegradadora
- +
- Fitorremediação (+Inoculação PGPR plant growth promoting rizobacteria)

DESAFIO:

- Elevação dos custos da fitorremediação, por outro lado, aumento da eficiência e redução considerável do tempo requerido...

Melhorar métodos e análises

ESTRATÉGIA: Melhorar distinção entre compostos orgânicos derivados biologicamente (mascaram eficiência da remoção) e contaminantes orgânicos.

Ex:

$$\text{Carbon Preference Index} = \frac{\text{Odd n-alkanes (biol)}}{\text{Even n-alkanes (petro)}}$$

- Fingerprinting químico (Ex: para distinguir HP petrogênicos dos que ocorrem naturalmente);
- **Picos n-alcenos ímpares** (C_{25} - C_{31}) indica cera epicuticular de cutícula foliar, enquanto
- Picos n-alcenos pares: principalmente origem petrogênica
- **DESAFIO:** Custos-mão de obra, GC/MS; implementação de vários protocolos laboratoriais, etc

Reduzir risco ecológico das não-nativas (incluindo transgênicos)

ESTRATÉGIA:

1. Usar espécies nativas (plantas e microrganismos);

DESAFIO: Mais Agronomia na Fitorremediação

2. Minimizar risco de não-nativas: **Sistema de Contenção Biológica** (Ex: prevenir propagação ou fluxo genético - genes mitigadores como aumento da citoquinina oxidase)

DESAFIO: Barreiras regulatórias, opinião pública

Desafios a serem vencidos

- FATORES DE ESTRESS NO CAMPO AUSENTES NO LAB e C.V.;
- TRANSIÇÃO C.V. → CAMPO → COMERCIALIZAÇÃO
- MÉTODOS + ADEQUADOS DE AVALIAÇÃO (demonstrar que os contaminantes estão decrescendo);
- OTIMIZAR E COMBINAR PROCESSOS (MULTI-PROCESSO E/OU MULTI-PLANTIO);
- MAIS AGRONOMIA NA FITORREMEDIAÇÃO;
- REMOVER BARREIRAS REGULATÓRIAS E MELHORAR PERCEPÇÃO.
(Marques et al. R. Bras. Ci. Solo, 35:1-11, 2011)



XXXIV
CONGRESSO BRASILEIRO
DE CIÊNCIA DO SOLO
28 de julho a 2 de agosto de 2013
Costão do Santinho Resort | Florianópolis | SC



Swedish Foundation of Research and
High Education-STINT

KK-stiftelsen ><



Shell AB