



Física do Solo
CCR/UFSM

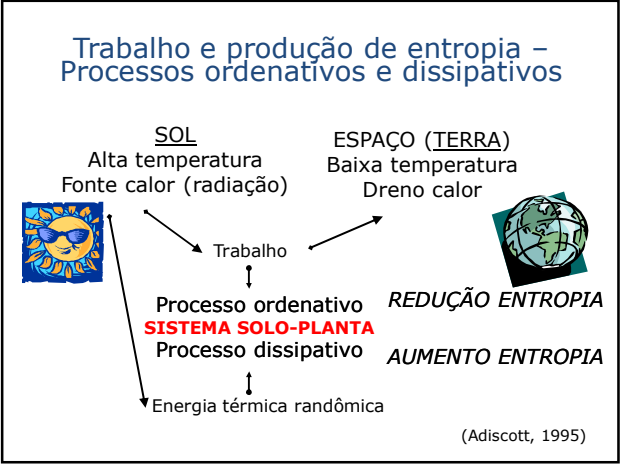
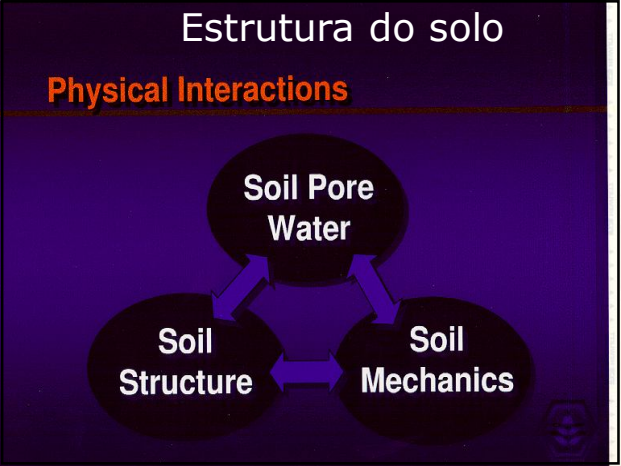
Estrutura (agregação) do solo

J. Miguel Reichert, PhD

(prof. R. Horn-Kiel Univ.; prof. M.K. Shukla-Arizona St. Univ.; prof. Sivakugan; prof. J. Han- Univ. of Kansas)

Quantos kg de conservação (ou física) do solo são necessários para aumentar o rendimento de milho em 1 kg ha⁻¹?

(Prof. Sérgio Wolkweiss, UFRGS. *In memorium*)



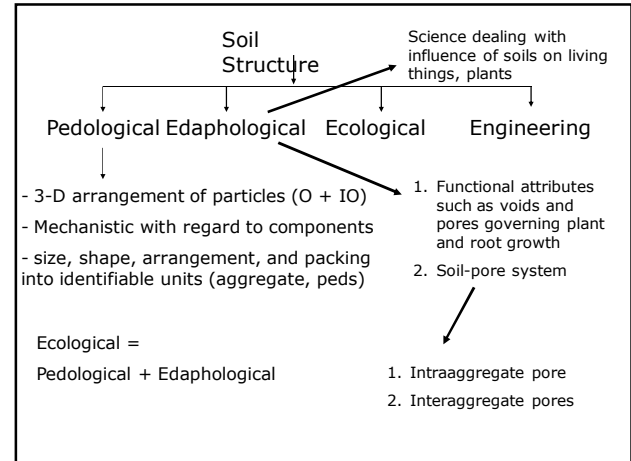
Processos no sistema solo-planta	
Processos ordenativos Redução de entropia	Processos dissipativos Aumento de entropia
Biológico Fotossíntese Crescimento Formação MOS	Respiração Senescência Decomposição MOS (gases)
Físico Água (formação de solo) Floculação Agregação do solo Formação da estrutura	Água (erosão, lixiviação) Dispersão Desagregação Degradação da estrutura
Unidades maiores Menos unidades Maior ordenação	Unidades menores Mais unidades Menor ordenação

(Adiscott, 1995)

Soil Structure

Jacks (1963) "Union of mineral and organic matter to form organomineral complexes is a synthesis as vital to the continuance of life as, and less understood than, photosynthesis"

- Arrangement of soil particles
- Dynamic varies spatially temporarily
- At multiple scales
- Complex and is not completely understood
- Most important soil physical properties
- Often called surrogate property

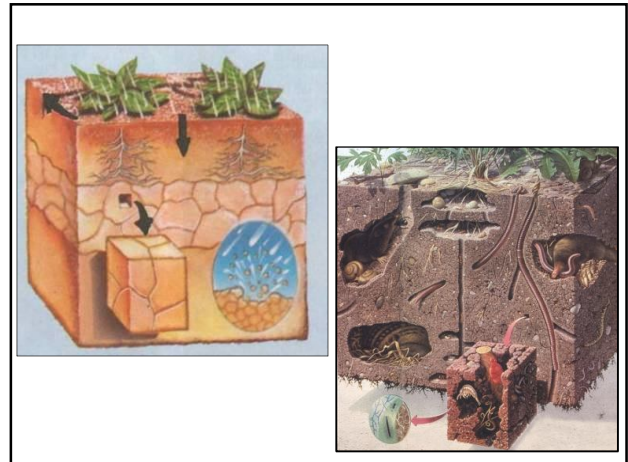


Estrutura do solo

Arranjo de partículas de areia, silte e argila em **AGREGADOS** separados de agregados adjacentes por planos de fratura

Agregado = f{floculação e agregantes}

Estrutura = Conjunto de agregados + Poros



SOLO FISICAMENTE IDEAL

É aquele que apresenta:

- Boa aeração e retenção de água;
- Bom armazenamento de calor;
- Pouca resistência mecânica ao crescimento radicular.



Portanto,

um solo com melhor estrutura suporta melhor a precipitação e a ação de máquinas e implementos agrícolas e também permite uma melhor produção das culturas.

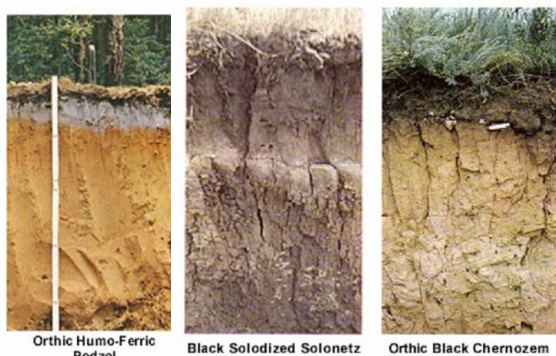
A estrutura do solo relaciona-se com:

- Aeração
- Densidade do solo
- Resistência mecânica à penetração
- Infiltração de água
- Selamento superficial
- ...

Types of soil structure

- Single grained (coarse grained soils)
- Massive (tight cohesive blocks, dried clay)
- **Aggregated** (aggregates or peds)

Soil Profile
Soil Structure

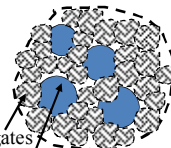
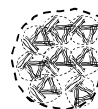


Aggregates

Micro-aggregates
clusters of flocs

Flocs
clusters of clay particles

Aggregate
Macro-aggregates
Clusters of micro-aggregates
+ sand (primary particles)



Micro-aggregates
Sand engulfed by micro-aggregates

COMO SE FORMAM OS AGREGADOS ?

1º) Aproximação entre as partículas:

- flocculação da argila
- desidratação do solo: aproxima partículas
- raízes: desidratação e pressão sobre as partículas
- organismos: minhocas (coprólitos)

COMO SE FORMAM OS AGREGADOS ?

2º) Estabilização: agentes cimentantes

- quantidade de argila e de cátions
- forças eletrostáticas (Van der Waals)
- MOS, polissacarídeos, ácidos húmicos
- microrganismos: ação mecânica (hifas de fungos) e produção de compostos orgânicos
- vegetação: ação mecânica das raízes e fonte de material orgânico na superfície

Mechanisms of Aggregation

- Russell's theory of crumb formation
- Calcium linkage theory
- Clay water structure
- Edge-surface proximity concept
- Emerson's model
- Organic bond theory
- Clay domain theory
- Quasi crystal theory
- Microaggregate theory
- Aggregate hierarchy model
- POM nucleus model

Russell's (1934) Theory of Crumb Formation (Clay particles bound together through ionic bond)

- Clay particles have charge when hydrated
- Charged particles are surrounded by electric double layer
- Every clay particle is surrounded by an envelop of water
- As moisture content decreases, thickness of water envelop decreases
- Each ion shares it's envelop with two clay particles thus holding it tight

Criteria for Crumb Formation

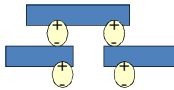
- Particles must have high CEC and SSA
- Smaller than a particular size (sand and silt not essential)
- Liquid must have a dipole (property of water) moment
- Presence of polyvalent cations

Calcium Linkage Theory (Williams, 1935; Peterson, 1947)

- Negatively charged organic materials e.g., polysaccharides (long chains of monosaccharide units bonded together; e.g., glycogen, starch, and cellulose) are absorbed on clay by polyvalent cations

Clay - Mg - OH, Clay - Be - OH

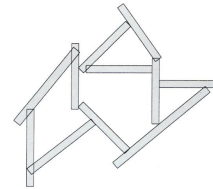
Clay - Ca - OOC - R - Ca - OOC - R - Ca - Clay



Clay- Water Structure (Rosenquist, 1959)

Adhesion (molecular attraction exerted between bodies in contact) between clay particles is a function of the difference between the surface energy of the adsorbed and pore water

Edge-Surface Proximity Concept (Schofield and Samson, 1954; Trollope and Chan, 1959)



- A card house structure based on establishment of equilibrium between adjacent particles due to edge-surface proximity
- Flocculation occurs due to electrostatic attraction
- Much more stable than caused by lowering of zeta potential

Emerson's model (1959)

- Extension of Russell's model
- Positive edge and negative face
- Both clay and quartz (sand, silt)
- Structure disappears as soil dries if no polyvalent cation present

Following four types of bond were proposed

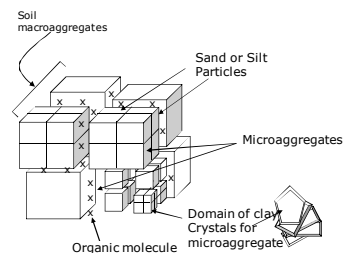
- Hydrogen bonding between carboxyl group and clay
- Ionic bonding between carboxyl group and clay
- Interaction of electric double layers leading to formation of domains

- Bonding between organic and inorganic colloids

Organic Bond Theory (Greenland, 1965)

Soil organic matter forms ionic bonds

Clay Domain Theory (Williams et al., 1967)



- Exist in domains up to about 5 μm in diameter

- Clusters of domains are called microaggregates (5-1000 μm)

- Clusters of microaggregates are macroaggregates (1-5 mm)

Quasi Crystals Theory (Aylmore and Quirk, 1971)

- Modified Williams et al. 1967 theory
- Parallel clay crystals (5 μm in diameter) forms quasi crystals (0.01-1.3 μm)
- Quasi crystals are stable packets (Oades and Waters, 1991)
- the 3 stages of binding of clay particles are:
 - into stable packets of < 20 μm
 - into microaggregates of 20-250 μm
 - stable macroaggregates >250 μm

Microaggregate Theory (Edwards and Bremner, 1967)

- soil consists of microaggregates (< 250 μm) bound on macroaggregates (> 250 μm)
- bonds are stronger in micro than macroaggregates
- Microaggregate = $[(\text{Cl} - \text{P} - \text{OM})_x]_y$
- Cl is clay, P- polyvalent cation, OM is organometallic complex)

Stages of Aggregation (Tisdall and Oades, 1982)



< 0.2 μm $\longrightarrow$ 0.2 $\longrightarrow$ 2 $\longrightarrow$ 20 $\longrightarrow$ 250 $\longrightarrow$ 2000 μm

Aggregate Hierarchy Model (Oades and Waters, 1991)

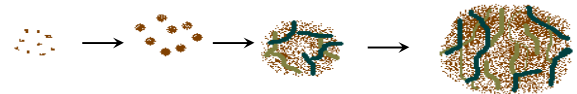
- For aggregates stabilized by organic materials- stages are:

< 0.2 μm $\longrightarrow$ 20- 90 $\longrightarrow$ 90-250 $\longrightarrow$ >250 μm

POM Nucleus Model

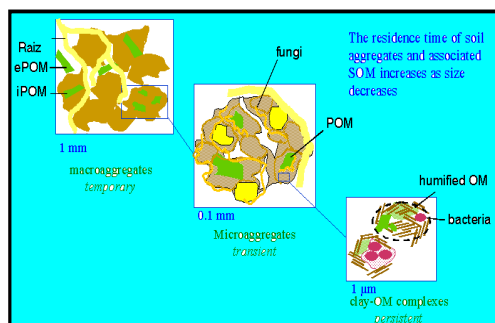
Particulate organic matter form a nucleus – around clay to form microaggregate and around microaggregates to form macroaggregate

COMO SE FORMAM OS AGREGADOS ?



Aglomerados de partículas de argila interagindo com óxidos de Fe ou Al e polímeros orgânicos na menor escala	Submicroagregado constituído por partículas de silte cobertas com matéria orgânica e pequenos pedaços de plantas e microorganismos, cobertos com arranjos menores de argila, húmus e óxidos de Fe ou Al	Microagregado consistindo principalmente de partículas de areia fina e pequenos aglomerados de silte, argila e substâncias orgânicas unidas por pêlos radiculares, hifas de fungos e substâncias produzidas por microorganismos	Macroagregado composto por muitos microagregados, unidos principalmente por uma rede de hifas de fungos e raízes
---	--	--	---

Hierarquia e persistência da agregação do solo



Factors Affecting Aggregation

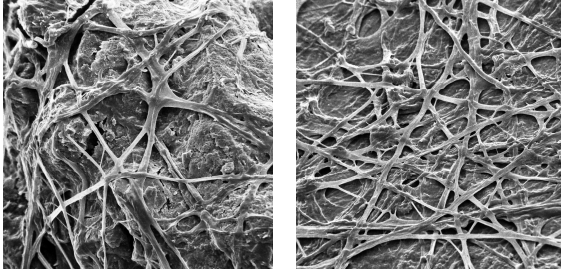
- Drying and Wetting
- Freezing and Thawing
- Biotic Factors
- Soil Tillage
- Soil Amedments

SEM

SEM

Beispiele

Pilze stabilisieren das Aggregatgefüge

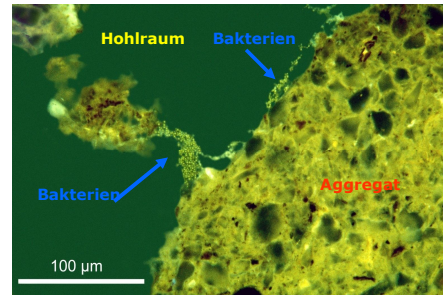


Präparation- und Beleuchtungsmethoden

Fluoreszenz

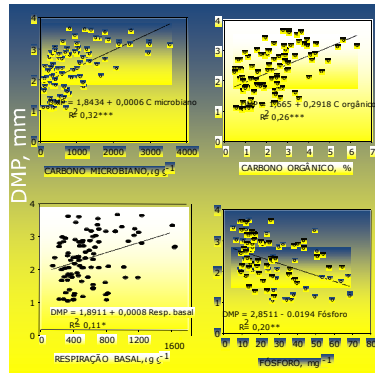
Beispiele

Bakterien als strukturstabilisierendes Coating und Brückenglied



Nach Tippkötter 2004

Agregação e microbiologia



WDX

SEM

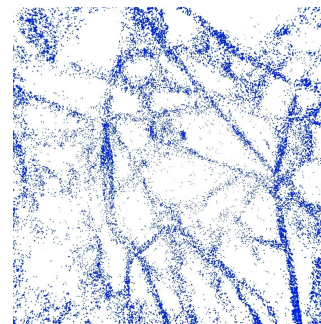
Beispiele

Pilzhyphen

SEM

SEM + WDX
(Carbon)

WDX
(Carbon)

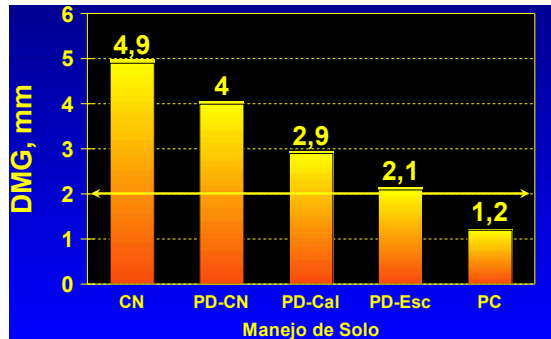


Estabilidade de agregados

ESTABILIDADE DE AGREGADOS

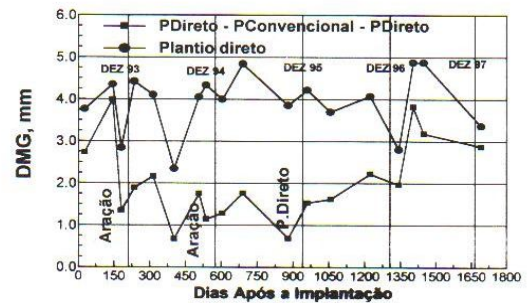
Resistência à desagregação que os agregados apresentam quando submetidos a **forças externas** (ação implementos agrícolas e impacto gota chuva) ou **forças internas** (compressão de ar, expansão/contração) que tendem a rompê-los.

Uso e agregação do solo



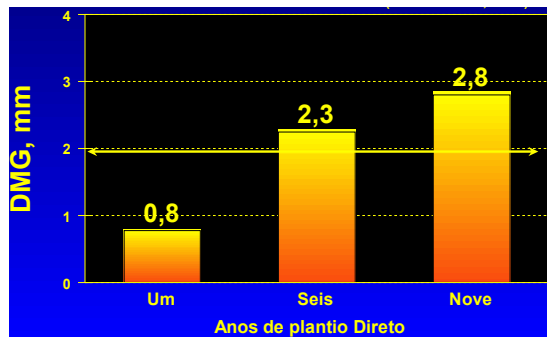
(Da Ros et al., 1996)

Variação temporal da agregação do solo



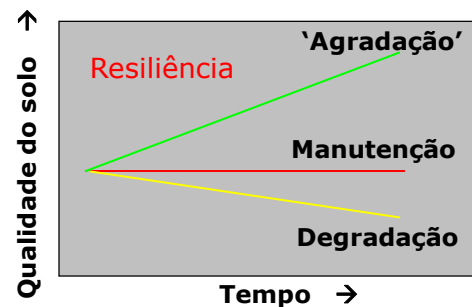
(Reinert)

Recuperação da agregação do solo



(Da Ros et al., 1996)

Variação temporal da qualidade do solo – Estado constante dinâmico e perturbações



Taxas de aumento da agregação

Textura do solo
Sistema de manejo
Sistema de cultura

Degradação estrutural

Melhoria estrutural

Recuperação da estabilidade estrutural

Pelo menos 2x mais rápida em solos arenosos do que argilosos

Densidade, porosidade e resistência do solo

Densidade e porosidades do solo

- > não são as propriedades que recebem o maior impacto com a modificação da estrutura do solo;
- > têm sido largamente usadas pela facilidade de determinação;
- > recebem pequena influência do teor de água no momento da coleta de amostras de solo.

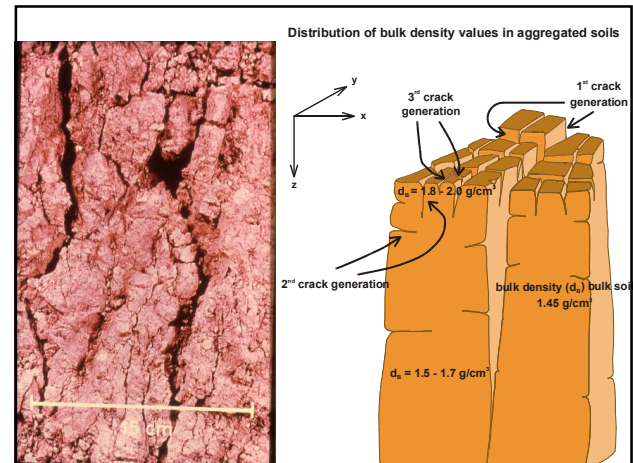


Resistência mecânica à penetração

- > alterada pelo sistema de manejo;
- > está estreitamente associada à densidade do solo e teor de água;
- > bom indicador da compactação quando corretamente utilizado.



Densidade do solo



DENSIDADE DO SOLO (D_s)

Relação com

TEXTURA

Solos arenosos: $\Delta d_s = 1,2 \text{ a } 1,8 \text{ g cm}^{-3}$

Solos argilosos: $\Delta d_s = 1,0 \text{ a } 1,6 \text{ g cm}^{-3}$

PROFUNDIDADE: $d_s \uparrow$ com a profundidade

$\downarrow$ MO, $\downarrow$ PT, $\uparrow$ compactação natural, diferentes formas de agregados, maiores pressões, argila iluvial (ocupa espaços).

MAU MANEJO DO SOLO: $\uparrow$ compactação $\uparrow d_s$

Porosidade do solo

POROSIDADE DO SOLO

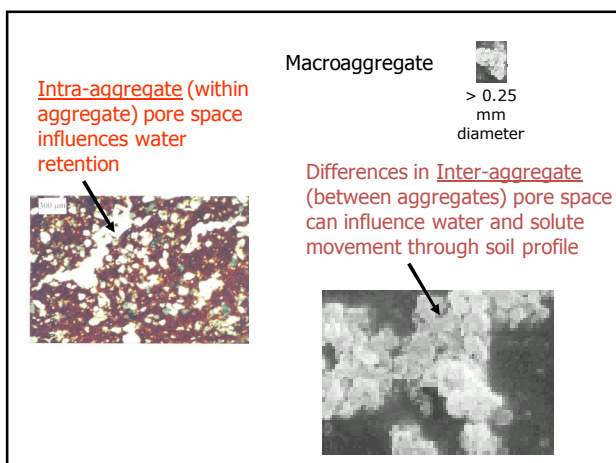
➤ **POROSIDADE TOTAL** – proporção percentual de poros em relação ao volume de solo.

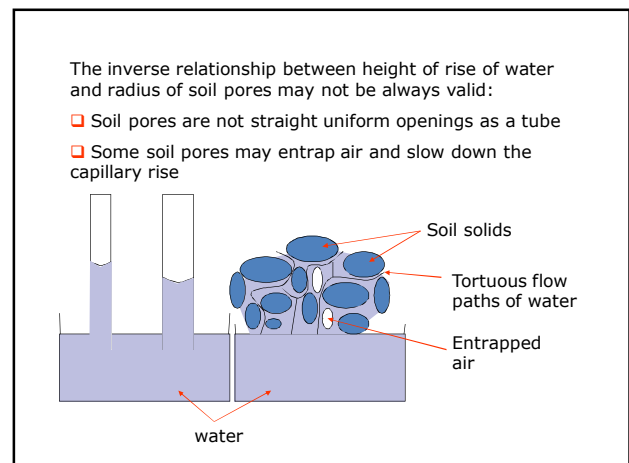
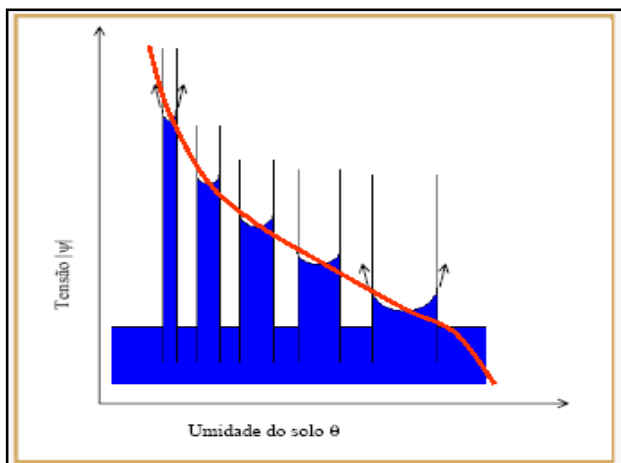
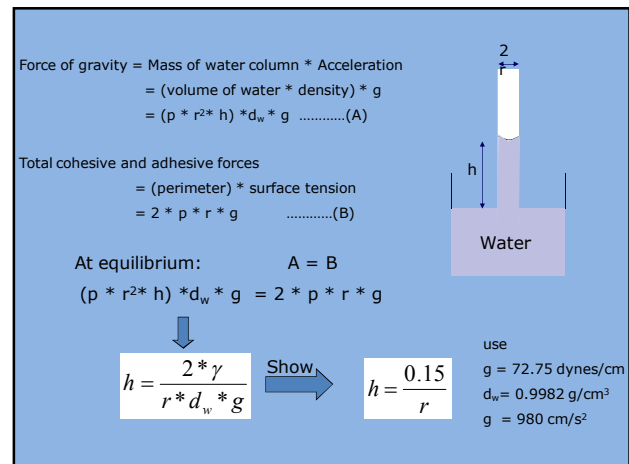
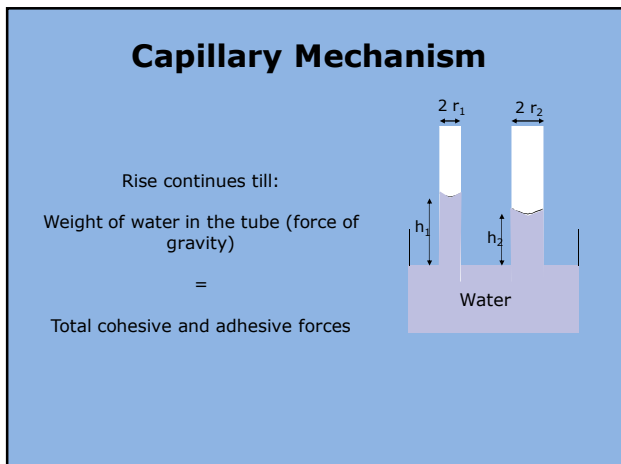
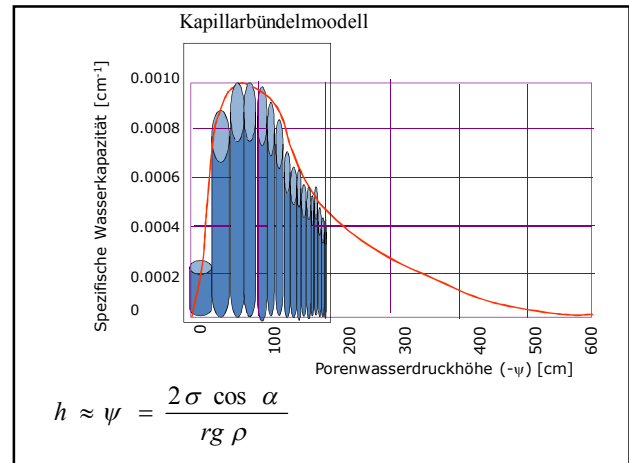
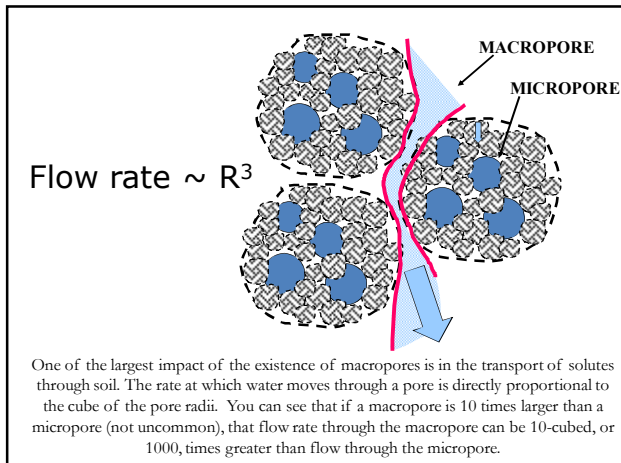
Porosidade textural: predominante em solos arenosos (pouco estruturados).

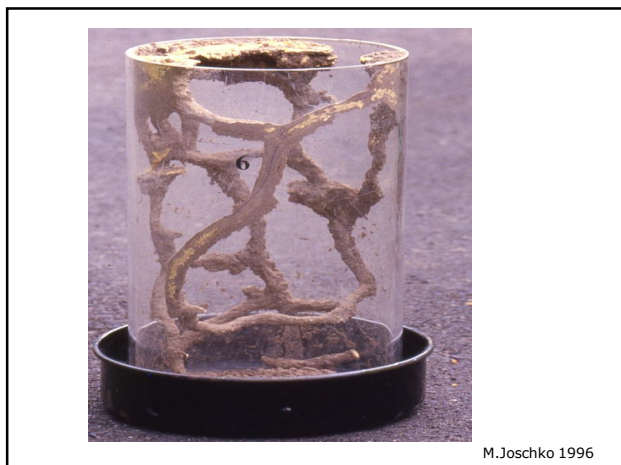
Porosidade estrutural: predominante em solos argilosos (boa agregação).

➤ **Macroporosidade** → movimento d'água, aeração.

➤ **Microporosidade** → retenção de água.

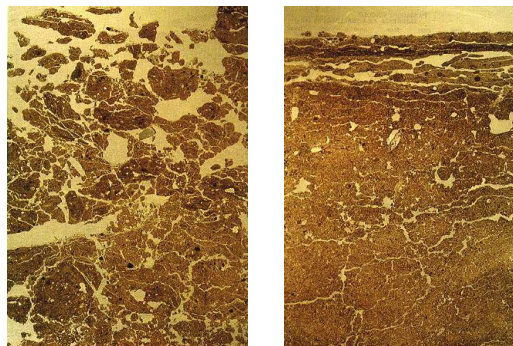






M.Joschko 1996

Dünnschliffphotographien aus dem Oberboden (0-5cm) eines Lehmbo- dens, links unbelastet, rechts verdichtet, Länge 3cm



Pagliai und Bazoffi 2002

E.c.d.* (μm)	Manegold quoted by Scheidegger (1957)	Jongerius (1957)	Brewer (1964)	IUPAC (1972)	McIntyre (1974)	Smart (1975)	Greenland** (1977)
5000			Coarse macrovoids		Super- pores		Fissures
500	Voids	Macro- pores	Macro-voids			Mini- pores	
100							
75					Macro- pores		Transmission pores
50	Capillaries	Meso-pores	Meso-voids			Macro- pores	
30							
5			Micro-voids		Mini-pores		
2	Forcespaces			Macro- pores		Micro- pores	Storage pores
0.5			Ultra-micro- voids				
0.1		Micro- pores					
0.05			Crypto-voids	Meso- pores			
0.02							Residual pores
0.005					Micro- pores		

FATORES QUE AFETAM A POROSIDADE

- **Agregação:** granulares x blocos
- **Textura** - Arenosos: $\downarrow$ PT
- Argilosos: $\uparrow$ PT
- **Profundidade:** $\uparrow$ profundidade $\downarrow$ PT

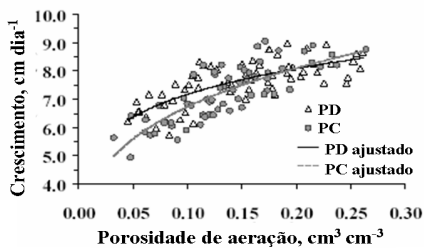
Espaço aéreo: pressão = 60 cm H_2O (-0,06 atm)
Mínimo 10%

IDEAL

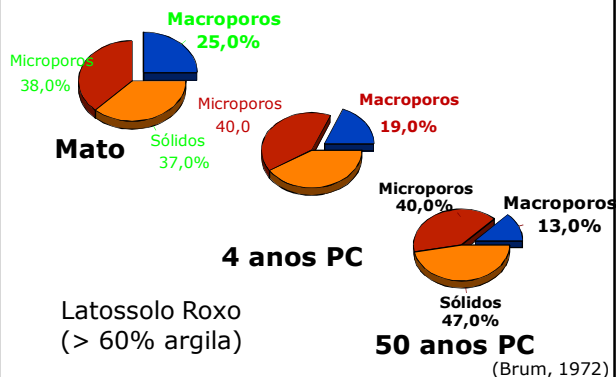
- Macroporosidade = 1/3 do volume dos poros
- Microporosidade = 2/3 do volume dos poros

POROSIDADE DO SOLO

➤ Relações da porosidade de aeração apresentadas por Silva et al. (2004) demonstram que os valores críticos ou restritivos não funcionam de maneira abrupta cessando o crescimento, porém indicam que os valores críticos de espaço aéreo largamente usados como referência não estão

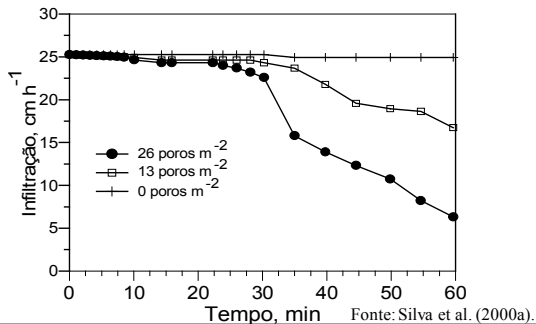


POROSIDADE DO SOLO



A presença de poros construídos, semelhantes aos originados por corós (*Dilobderus abderus*), em caixas com solo, aumentou enormemente a infiltração de água quando uma chuva artificial de 250 mm h⁻¹ foi aplicada.

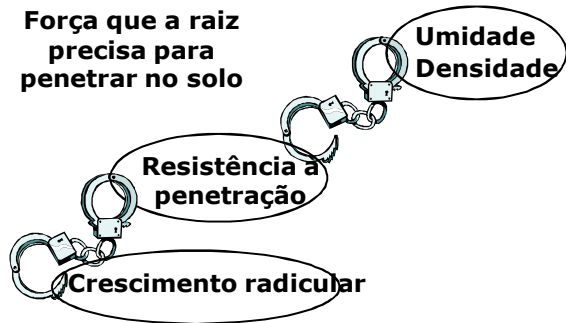
A ocupação de menos de 1% da superfície com poros grandes e contínuos (11 mm de diâmetro e 230 mm de comprimento) foi a principal responsável pela infiltração sob condições de chuva simulada de alta intensidade.



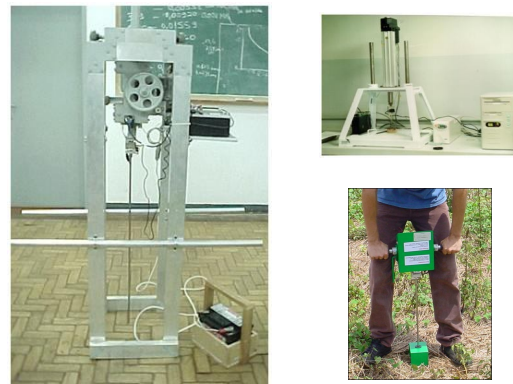
Resistência à penetração

Resistência à penetração

Força que a raiz precisa para penetrar no solo

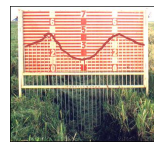


Resistência à penetração

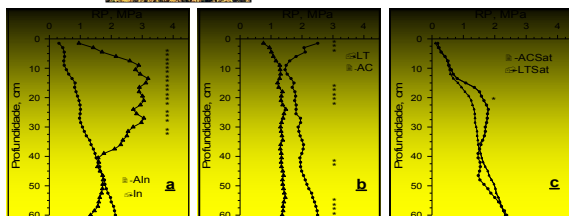


Degradação estrutural em arroz sob inundação

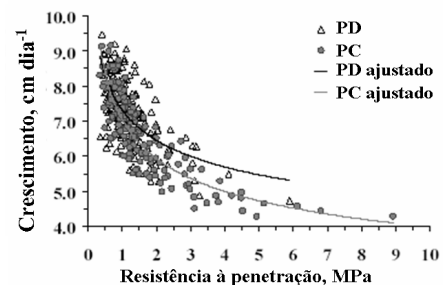
Antes da colheita



Depois da colheita

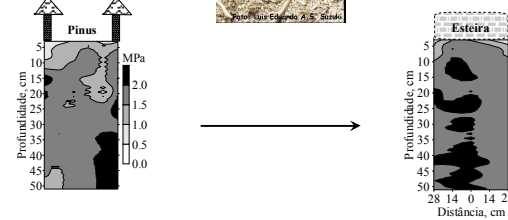
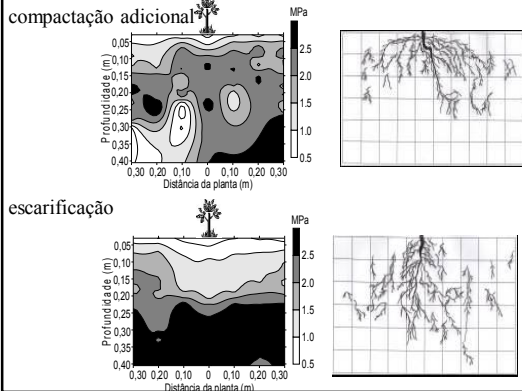


Resistência à penetração

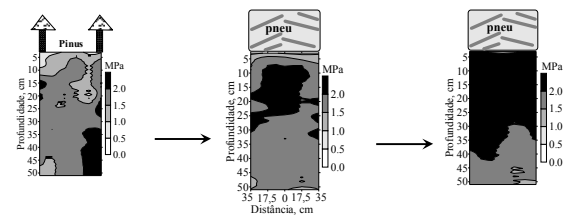


O valor crítico ou restritivo não funciona de maneira abrupta cessando o crescimento, porém indica que os valores críticos de resistência do solo largamente usados como referência não estão muito distantes (Silva et al., 2004).

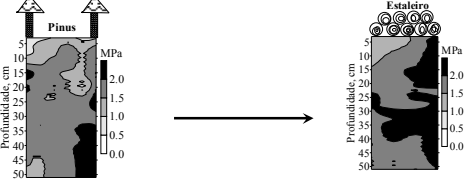
Argissolo Vermelho distrófico arenico com a cultura da soja.



Resistência à penetração de uma área de pinus sem o tráfego de máquinas (esquerda) após o corte do pinus (direita). Fonte: Cechin et al., 2006



Resistência à penetração de uma área de pinus sem o tráfego de máquinas (esquerda), após uma passada do Skidder (meio) e após várias passadas do Skidder (direita). Fonte: Cechin et al., 2006



Resistência à penetração de uma área de pinus sem o tráfego de máquinas (esquerda) e no estaleiro (direita). Fonte: Cechin et al., 2006

SOLO BEM ESTRUTURADO

Permite:

- a) Poros adequados para a entrada de ar e água no solo;
- b) Porosidade adequada para que a água se movimente através do solo sendo disponível para as culturas, assim como permita uma boa drenagem do solo;
- c) Porosidade adequada para o crescimento das culturas após a germinação das sementes, permitindo que as raízes explorem um maior volume de solo em busca de ar, umidade e nutrientes.

SOLO FISICAMENTE IDEAL

É aquele que apresenta:

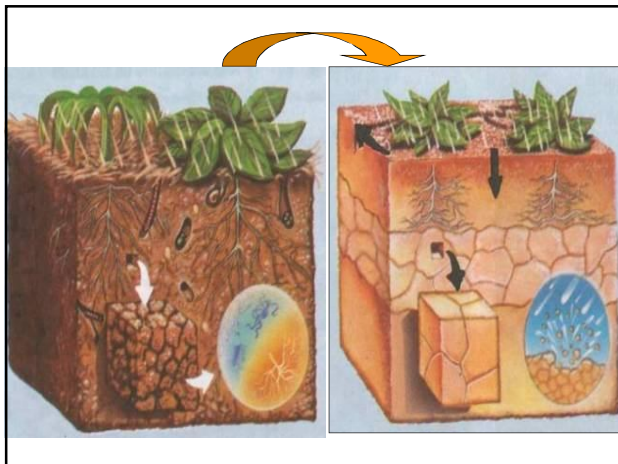
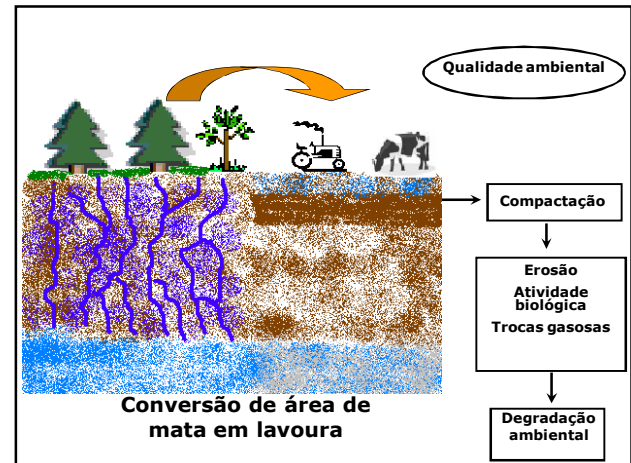
- Boa aeração e retenção de água;
- Bom armazenamento de calor;
- Pouca resistência mecânica ao crescimento radicular.



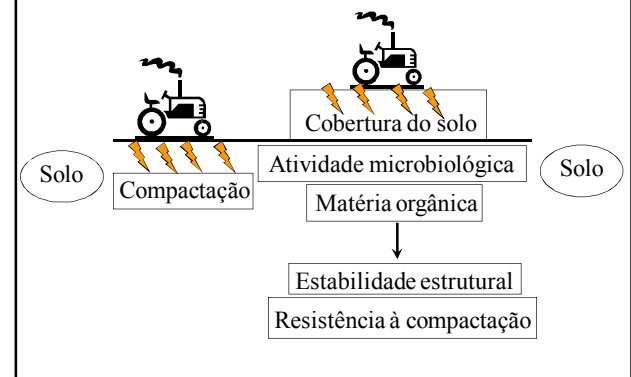
DEGRADAÇÃO DA ESTRUTURA

CAUSAS

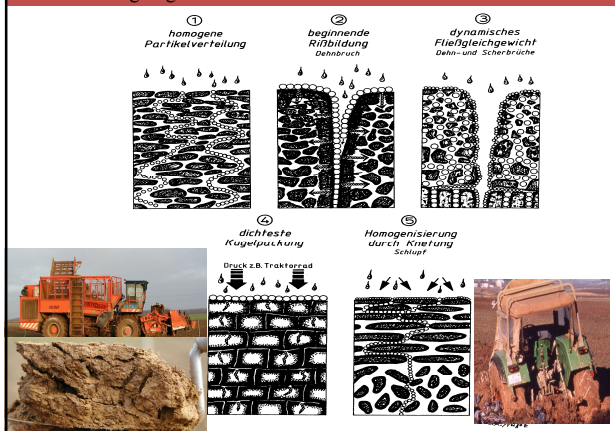
- preparo intensivo e queima dos resíduos
- tráfego intenso de máquinas com umidade inadequada
- impacto da gota de chuva
- dispersão química dos colóides
- inaptidão agrícola



Evitar a degradação do solo !!!



Welche Bodengefügeformen und Funktionen sind im Freiland zu sehen ?



DEGRADAÇÃO DA ESTRUTURA

CONSEQUÊNCIAS

- propriedades físicas afetadas - densidade e porosidade do solo, estabilidade dos agregados, retenção e infiltração água ...
- camadas compactadas subsuperficiais
- maior resistência do solo à penetração
- erosão - sulcos ou entressulcos
- crosta e selo superficiais

Degradação da estrutura = impacto ambiental

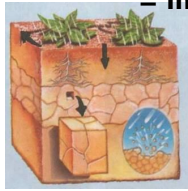


Foto: Martin M. Cubilla



Foto: Martin M. Cubilla

Avaliação *in situ*

Indicador	Época de avaliação	Qualidade estrutural		
	Pobre	Média	Boa	
Indicadores físicos				
1. Capacidade de infiltração	Bom	Alguns rios e riachos com infiltração	Alguns rios e riachos com infiltração	Bom
2. Boa estrutura	Bom	Alguns rios e riachos com infiltração	Alguns rios e riachos com infiltração	Bom
3. Aspecto	Bom	Alguns rios e riachos com infiltração	Alguns rios e riachos com infiltração	Bom
4. Profundidade	Bom	Alguns rios e riachos com infiltração	Alguns rios e riachos com infiltração	Bom
5. Infiltração	Bom	Alguns rios e riachos com infiltração	Alguns rios e riachos com infiltração	Bom
6. Drenagem	Bom	Alguns rios e riachos com infiltração	Alguns rios e riachos com infiltração	Bom
7. Retenção de água	Bom	Alguns rios e riachos com infiltração	Alguns rios e riachos com infiltração	Bom
8. Cobertura superficial	Bom	Alguns rios e riachos com infiltração	Alguns rios e riachos com infiltração	Bom

Avaliação *in situ*

Época de avaliação		Qualidade estrutural		
Indicador	Pobre		Média	Boa
Indicadores biológicos (planta)				
1. Capacidade de infiltração	Difícil na superfície	Sem sinais	Mostra buracos de 1-4 cm	Mostrando > 10 cm
2. Raízes	Fraqueza	Concentrada na superfície	Alargada e aprofundada	Raízes profundas sem sinais de necrose
3. Resistência à seca	Saca	Plantas não se recuperam	Sofrem	Suportam
4. Aparência da cultura	Folha	Folhas murchas e descoloridas	Desenvolvimento médio e manchado	Raízes, verde e alta
5. Produção	Colheita	Abaixo da média	Média local	Acima da média

Atributos físicos em índices de qualidade do solo

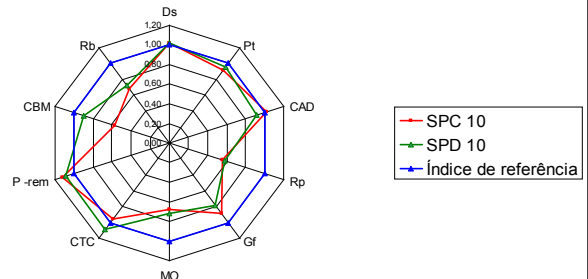
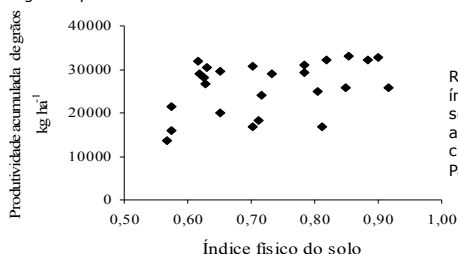


Diagrama comparativo de qualidade o solo em gráfico radial, após dez anos sob dois sistemas de manejo do solo: preparo convencional (SPC) e plantio direto (SPD), considerando-se a camada de 0 a 10 cm. Fonte: Costa et al., 2006

Aspectos técnicos, econômicos e ambientais do uso de fontes de nutrientes, associadas a sistemas de preparo do solo, foram estudados por Pandolfo (2005)

O aspecto técnico consistiu na utilização de três índices: de planta, químico e físico do solo

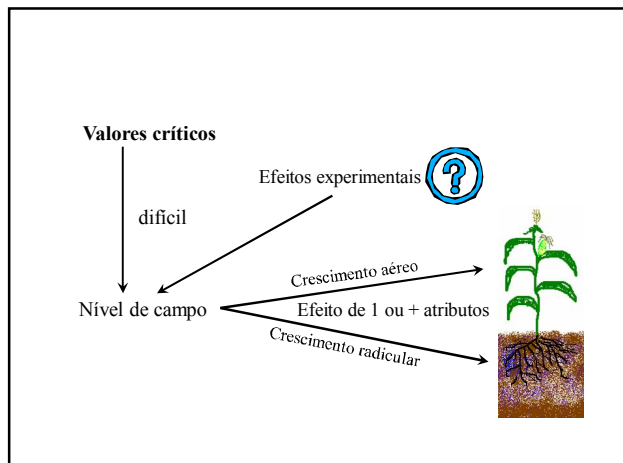
O índice físico do solo usou atributos relacionados à estrutura do solo, conferindo um peso de 40% para o índice de estabilidade de agregados e de 20% para a macroporosidade, densidade do solo e conteúdo de água disponível.



Relação entre o índice físico do solo e a produção acumulada de culturas. Fonte: Pandolfo, 2005.

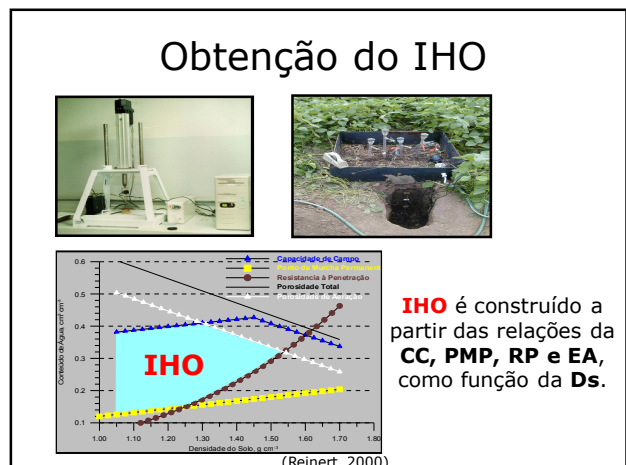
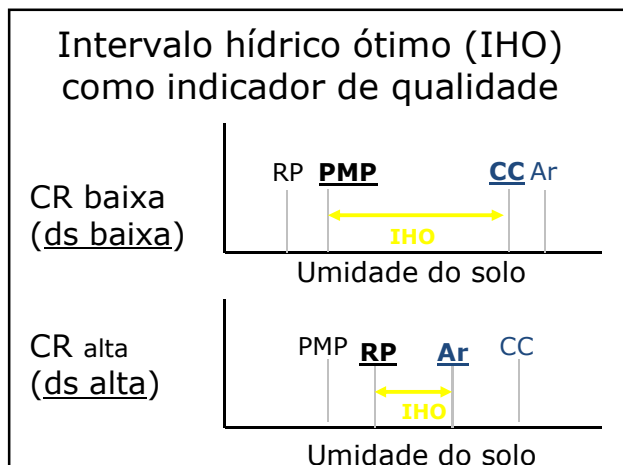
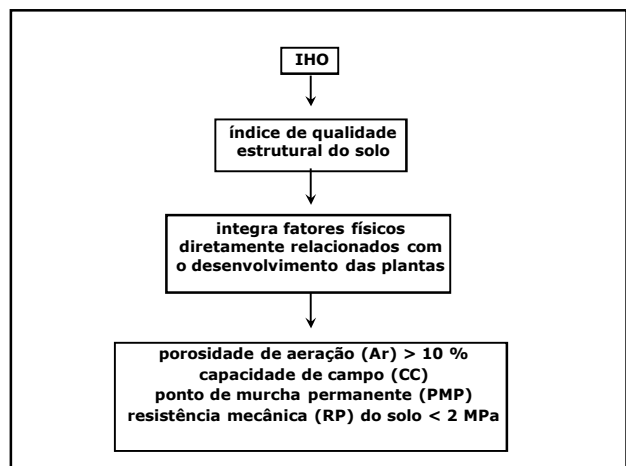
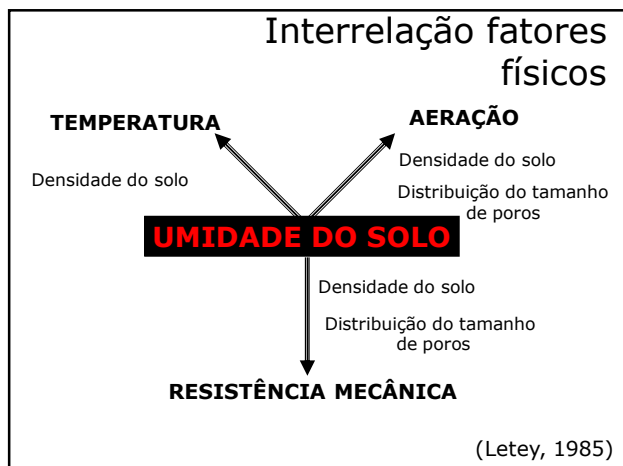
Funções principais e indicadores físicos e químicos para avaliar a qualidade de três classes de solos (Latossolo Amarelo, Argissolo Amarelo e Argissolo Acinzentado) de Tabuleiros Costeiros. Fonte: Souza et al. (2003).

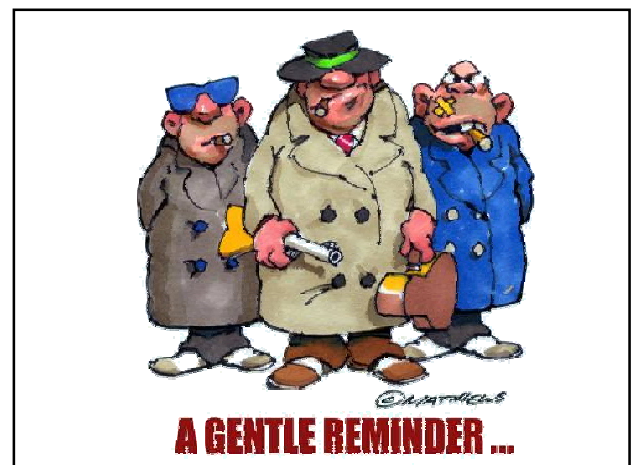
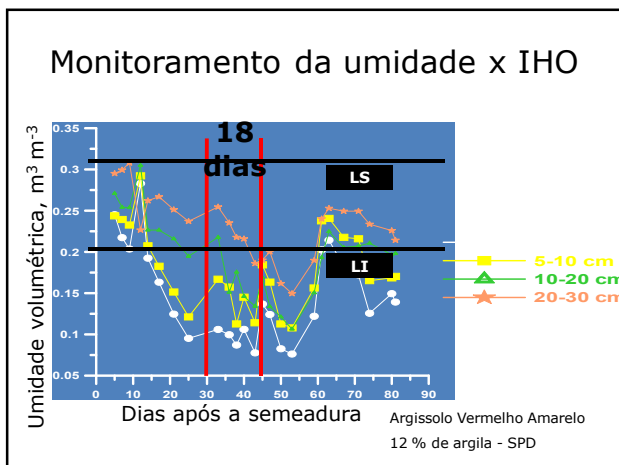
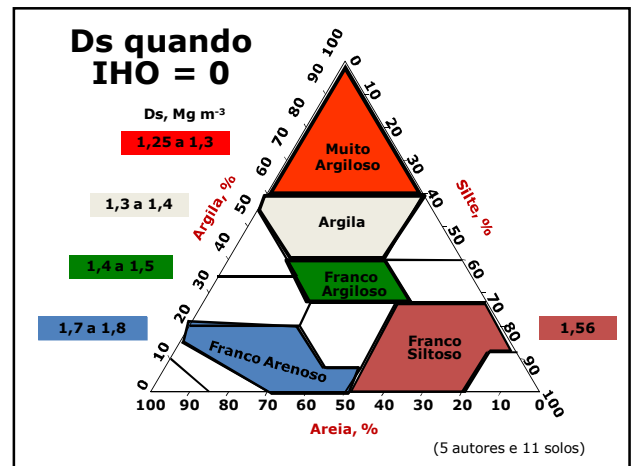
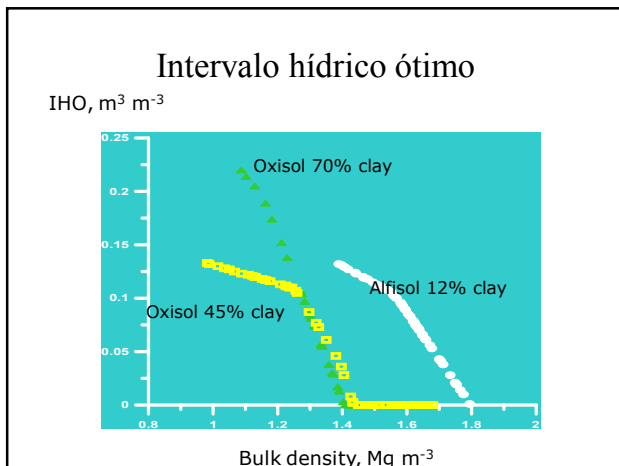
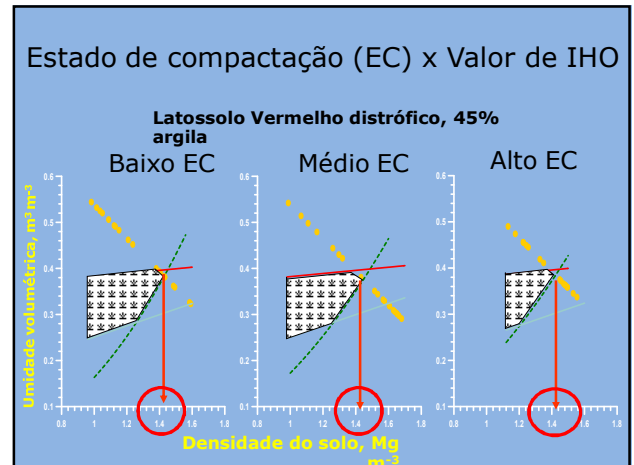
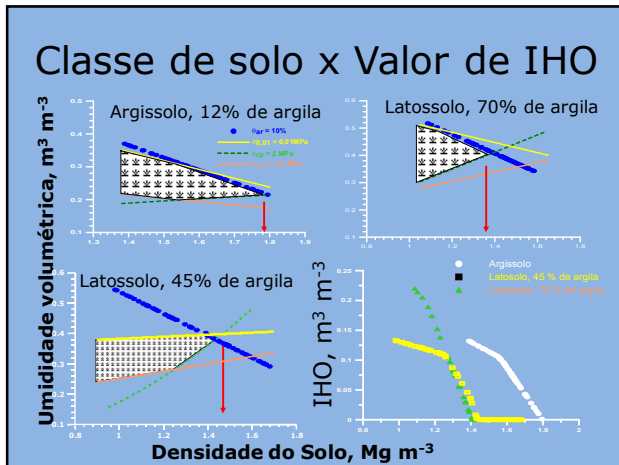
Funções principais	Ponderadores	Indicadores de qualidade ⁽¹⁾	Ponderadores	Limites críticos dos indicadores	
				Inferiores	Superiores
Crescimento radicular em profundidade (CRP)	0,40	RP _{100kPa}	0,40	2,0	-
		Mac	0,30	0,10	0,30
		Ds	0,10	1,52 e	-
		m	0,20	50	-
Condução e armazenamento de água (CAA)	0,40	K ₀	0,20	0,5	20
		Mac	0,20	0,10	0,30
		UV _{33kPa} /PT	0,30	0,55	-
Suprimento de nutrientes (SN)	0,20	AD/PT	0,30	0,125	-
		pH em água	0,10	5,0	9,0
		CTC	0,40	4,0	-
		V	0,20	50	-
		MO	0,30	15	-



Limites físicos às plantas

- **Densidade do solo crítica, D_{sc}** ($Mg\ m^{-3}$)
 - Jones (1983) Impedimento severo: 1,4-1,8 (função argila)
 - Veihmeier & Hendrickson (1948): 1,4-1,6 argiloso, 1,6-1,8 franco e arenoso
- **Resistência à penetração, RP**
 - RP = 2 Mpa
- **Porosidade de aeração, EA** (Cockroft & Olsson, 1997)
 - EA = 0,10 a 0,15 $m^3\ m^{-3}$
- **Água disponível às plantas, AD** (Cockroft & Olsson, 1997)
 - AD = 0,15 a 0,25 $m^3\ m^{-3}$
- **Aeração/ Porosidade** (Olness et al., 1988)
 - CC / Pt = 2/3 (0,66) ou
 - EA / Pt = 1/3 (0,34)





Próximo assunto:

Mecânica do solo