6
Discussão dos resultados

Muitos autores já sugeriram que as propriedades químicas, mineralógicas, e estruturais de um perfil de solo tropical vão variar com a sua profundidade, muito embora aspectos como cor e textura sejam muitas vezes aparentemente iguais (e.g. Camapum de Carvalho, 2004). Embora existam diversos trabalhos mencionando a existência do intemperismo biológico (e.g. Hall *et al.*, 2004), não se encontram dados na literatura que correlacionem a influência dos microrganismos do solo no seu grau de intemperismo.

Os resultados encontrados nas análises realizadas nesta dissertação sugerem, muitas vezes, que o grau de intemperismo do perfil estudado diminui com o aumento da profundidade. No entanto, a ocorrência de intemperismo diferencial foi confirmada em todas as análises, possivelmente como resultado das fraturas existentes na rocha que originou o perfil. Assim, inclusive concordando com observações táctil-visuais de campo, o grau de intemperismo do perfil estudado pode e deve variar tanto na vertical quanto na horizontal.

Devido à diversidade e quantidade de ensaios implementados na presente dissertação, não se procurou comparar de forma sistemática todos os dados obtidos, optando-se por efetuar comparações apenas entre aqueles que, se espera, propiciem melhores correlações.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410766/CA

6.1.
Relação entre propriedades físicas e propriedades químicas

A composição granulométrica dos solos estudados é bastante variável. O teor médio de argila das amostras é decrescente com a profundidade. O mesmo acontece com o teor de silte, menos para o solo Marrom, onde se observa uma queda na parcela desta fração. É possível perceber a partir dos resultados das curvas granulométricas que, à medida que a profundidade aumenta, os teores de pedregulho e areia também aumentam, enquanto os teores das frações mais finas, silte e argila, diminuem. Esta variação está possivelmente associada à ação do intemperismo uma vez que o fato dos teores da fração mais grossa (pedregulho+areia) se reduzirem em direção à superfície sugere que parte do

material granular teria sido intemperizada, aumentando a porcentagem de fração fina (argila+silte) nas camadas mais superficiais.

A Figura 6.1 mostra uma correlação polinomial existente entre as frações dos solos e o índice de intemperismo químico **ba_1**. Este gráfico sugere que à medida que o grau de intemperismo aumenta, aumenta também o teor da fração fina e diminui o da fração grossa, ambos de forma polinomial. O R^2 do gráfico representa o coeficiente de correlação da equação com os pontos encontrados e tem seu valor máximo igual a 1 para uma correlação perfeita.

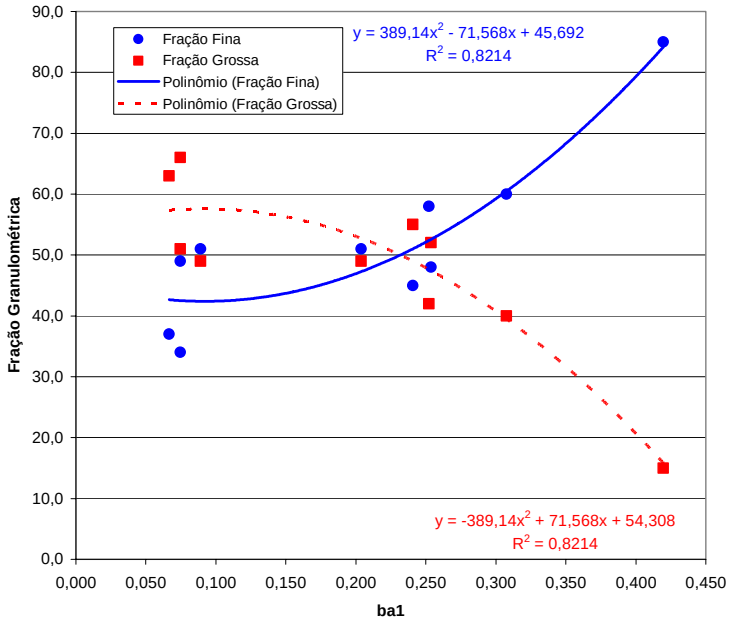

Figura 6.1 – Correlação polinomial entre as frações dos solos e o índice de intemperismo **ba_1**

O pH mede o índice de acidez do solo. Sabe-se que o perfil de solo estudado na presente dissertação é um perfil de solo ácido. Nesta faixa de pH o alumínio e o ferro são insolúveis, enquanto os elementos alcalinos e alcalinos terrosos (sódio, potássio, cálcio, magnésio etc.) são muitas vezes totalmente lixiviados.

O índice de intemperismo químico **ba_1** (Equação II) avalia a quantidade de potássio e sódio dividida pela quantidade de alumínio presente em cada solo. Dessa forma, procurou-se correlacionar estes dois parâmetros (pH x **ba_1**) esperando-se encontrar uma forma de avaliar como se dá a variação do pH em função do grau de intemperismo. A Figura 6.2 sugere uma correlação hiperbólica entre estes dois parâmetros com coeficiente de correlação R^2 igual a 0,832.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410766/CA

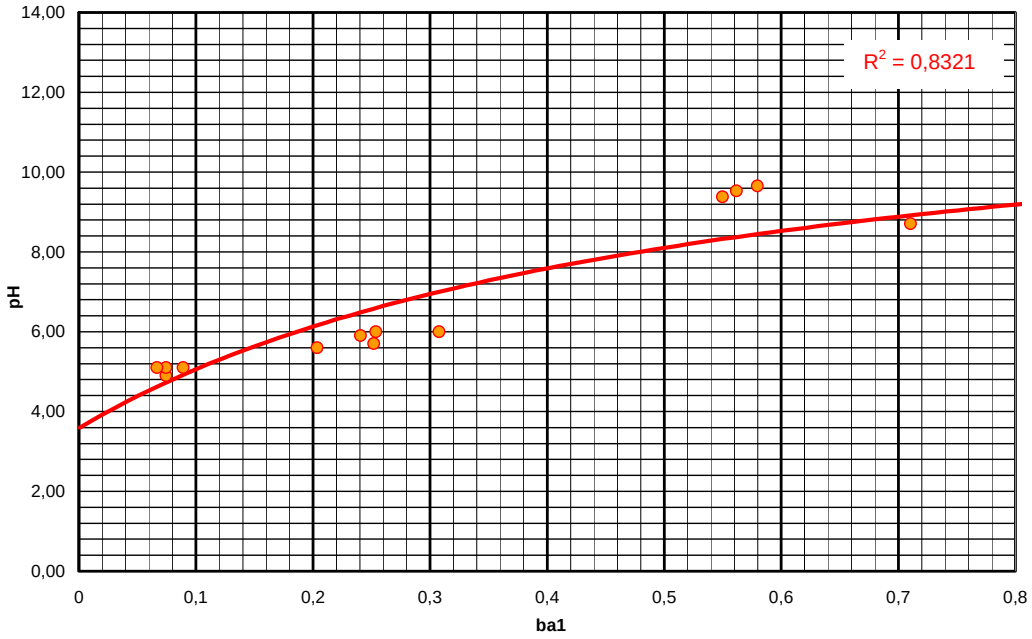

Figura 6.2 – Correlação hiperbólica entre o pH em água dos solos e rochas e o índice de intemperismo químico **ba_1**

O índice de perda ao fogo está diretamente relacionado ao grau de alteração dos minerais e à formação dos argilominerais e hidróxidos de ferro e alumínio. A variação ao longo da profundidade do índice de perda ao fogo (P.F.) mostra a evolução do intemperismo num dado perfil. Para o perfil estudado nesta dissertação, a variação deste índice indicou uma forte tendência de evolução do intemperismo com a diminuição da profundidade.

A variação do índice de intemperismo químico **ba_1** (Equação II), de uma forma geral, também apresentou esta tendência. Assim, estes dois parâmetros foram correlacionados resultando uma curva logarítmica de alto grau de correlação (R^2 = 0,986), como mostra a Figura 6.3.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410766/CA

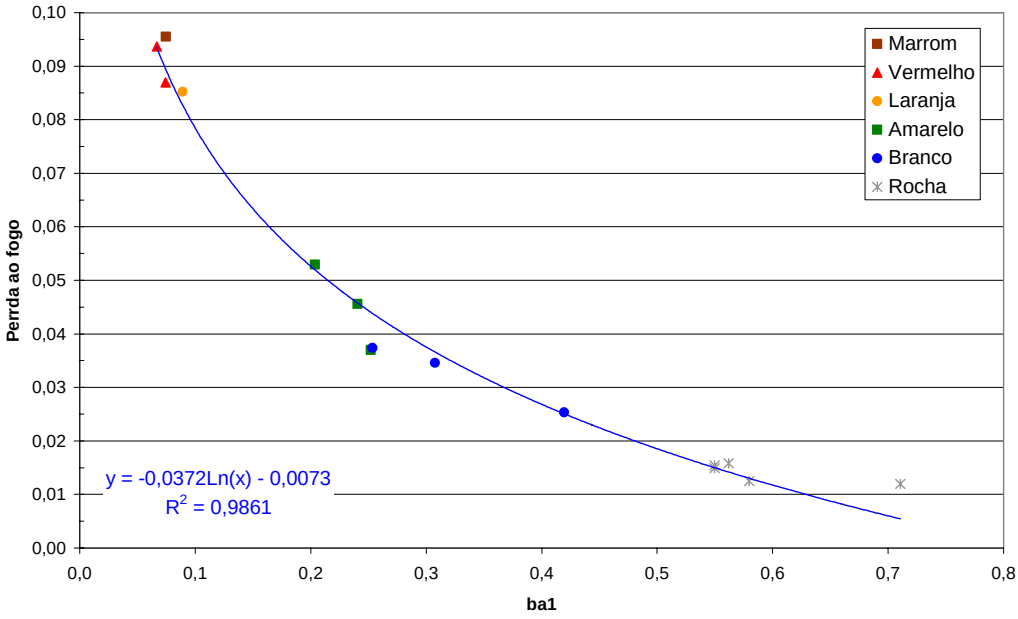

Figura 6.3 – Correlação logarítmica entre o índice de Perda ao fogo dos solos e rochas e o índice de intemperismo químico **ba_1**

Estas três correlações entre propriedades físicas e propriedades químicas do perfil foram propostas e apresentadas por apresentarem um elevado grau de correlação. No entanto, é possível que outras boas correlações possam também advir de posteriores análises dos dados obtidos.

A Tabela 6.1 mostra um resumo das equações que definem as correlações obtidas entre alguns índices físicos e o índice de intemperismo químico **ba_1**, bem como de seus respectivos coeficientes de correlação.

Tabela 6.1 – Correlações físico químicas propostas

Correlação	Equação	Coeficiente de correlação (R^2)
Fração fina x **ba_1**	$F.f. = 389{,}14 \times ba_1^{\,2} - 71{,}568 \times ba_1 + 45{,}692$	0,8214
Fração grossa x **ba_1**	$F.g. = -389{,}14 \times ba_1^{2} + 71{,}568 \times ba_1 + 54{,}308$	0,8214
pH x **ba_1**	$pH = 4{,}2725 + \left\{ \dfrac{ba_1 - 0{,}0425}{0{,}0666 + \left[0{,}1156 \times (ba_1 - 0{,}0425)\right]} \right\}$	0,8321
Perda ao fogo x **ba_1**	$P.F. = -0{,}0372 \times \ln(ba_1) - 0{,}0073$	0,9861

F.f. = Fração fina (argila + silte)
F.g. = Fração grossa (pedregulho + areia)
P.F. = Perda ao fogo

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410766/CA

6.2. Relação entre propriedades físicas, químicas, mineralógicas e micromorfológicas

Foi verificado a partir das curvas granulométricas dos solos que, os mais superficiais, Marrom e Vermelho, consistem em silte arenoso, enquanto os subsuperficiais, Laranja, Amarelo e Branco, são areias siltosas. O solo Marrom foi o único a apresentar quantidade significativa de argila.

Através das análises das lâminas delgadas foi possível confirmar que o solo Marrom apresenta quantidade mais significativa de plasma que os solos Amarelo e Branco. No entanto, quando comparado com o solo Laranja, o solo Marrom apresentou menor quantidade de plasma, não confirmando o que foi obtido com as curvas granulométricas. Isto vem demonstrar que, no estudo deste solo residual se faz necessária uma análise conjunta de fatores para melhor avaliação da distribuição granulométrica dos solos.

A Tabela 6.2 apresenta, além da freqüência de plasma observada nas lâminas e das médias das frações argila e argila+silte para cada solo, o índice de vazios médio de cada camada, índice também influenciado pela distribuição granulométrica.

Tabela 6.2 – Porcentagem de plasma observada na microscopia óptica, porcentagem de fração fina obtida nos ensaios granulométricos e índice de vazios médio dos solos

Solo	Freqüência de plasma (%)	Fração argila (%)	Fração fina (argila + silte) (%)	Índice de vazios médio
Marrom	40,89	23,0	66,0	0,88
Vermelho	-	8,0	57,0	1,30
Laranja	47,4	8,0	49,0	1,27
Amarelo	35,3	5,0	48,7	0,85
Branco	30,5	4,0	46,0	0,51

A partir destes dados observa-se que o comportamento do índice de vazios médio está em concordância com o comportamento da freqüência de plasma, como mostra o gráfico da Figura 6.4. O gráfico apresenta uma correlação linear entre estes dois parâmetros com coeficiente de correlação R^2 igual a 0,923.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410766/CA

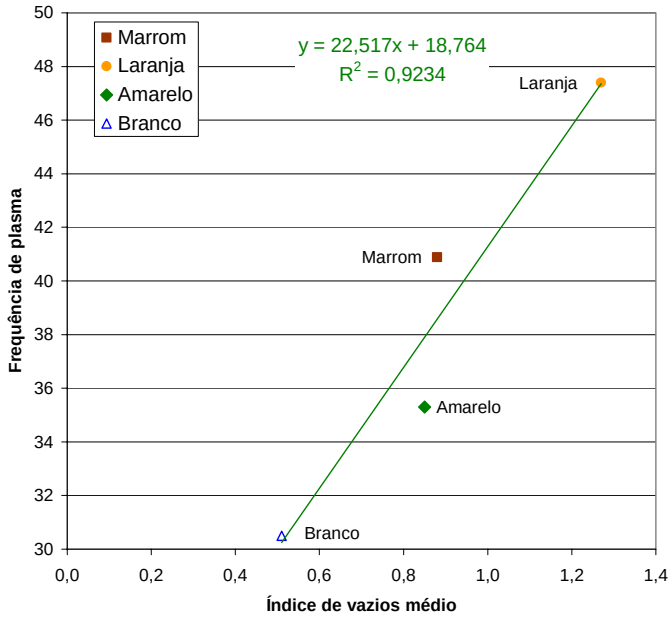

Figura 6.4 – Freqüência de plasma (%) x Índice de vazios médio

Através de análises químicas parciais, por meio de complexo sortivo, notou-se que os valores médios de capacidade de troca catiônica (Tabela 6.3), dos solos do perfil estudado, apresentam boa correlação polinomial com as frações argila e as frações argila+silte obtidas nos ensaios granulométricos. A Figura 6.5 mostra esta correlação.

Tabela 6.3 - Valores médios de capacidade de troca catiônica para cada solo

Solo	CTC
Marrom	6,39
Vermelho	3,91
Laranja	4,52
Amarelo	4,95
Branco	3,06

A Figura 6.5 mostra que a capacidade de troca de cátions é maior quanto maior a fração fina do solo, ou seja, ela aumenta juntamente com o grau de intemperismo do solo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410766/CA

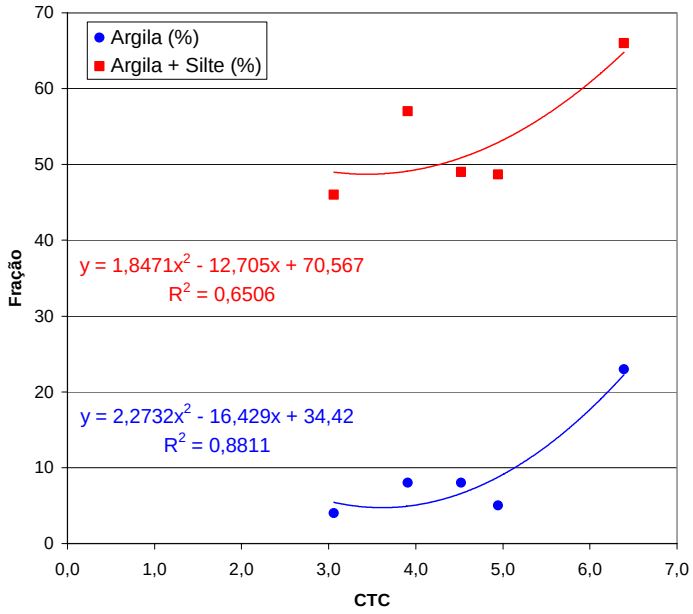

Figura 6.5 – Correlação polinomial entre as frações argila e argila+silte e a capacidade de troca catiônica dos solos

O solo Branco é o que apresenta a maior quantidade de areia e pedregulho. Além disso, apresenta também a menor porosidade média obtida por correlação a partir dos ensaios de caracterização física, a menor porosidade no ensaio de porosimetria de mercúrio e a menor quantidade de poros na contagem por pontos em lâminas delgadas.

A Tabela 6.4 apresenta uma comparação entre estes dados para os cinco solos do perfil estudado.

Tabela 6.4 – Porosidade dos solos obtida por diferentes métodos

Solo	Porosidade média (n) (%)	Porosidade total por Hg (%)	Freqüência de poros em lâmina delgada (%)
Marrom	46	30,17	40,89
Vermelho	56	42,07	-
Laranja	56	43,01	26,40
Amarelo	46	39,09	30,10
Branco	34	33,29	24,40

A Figura 6.6 compara os resultados obtidos pelos três diferentes métodos. Observa-se uma concordância entre os resultados de porosidade dos solos obtida a partir dos ensaios de caracterização física, porosimetria e microscopias ópticas para quantificação de poros.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410766/CA

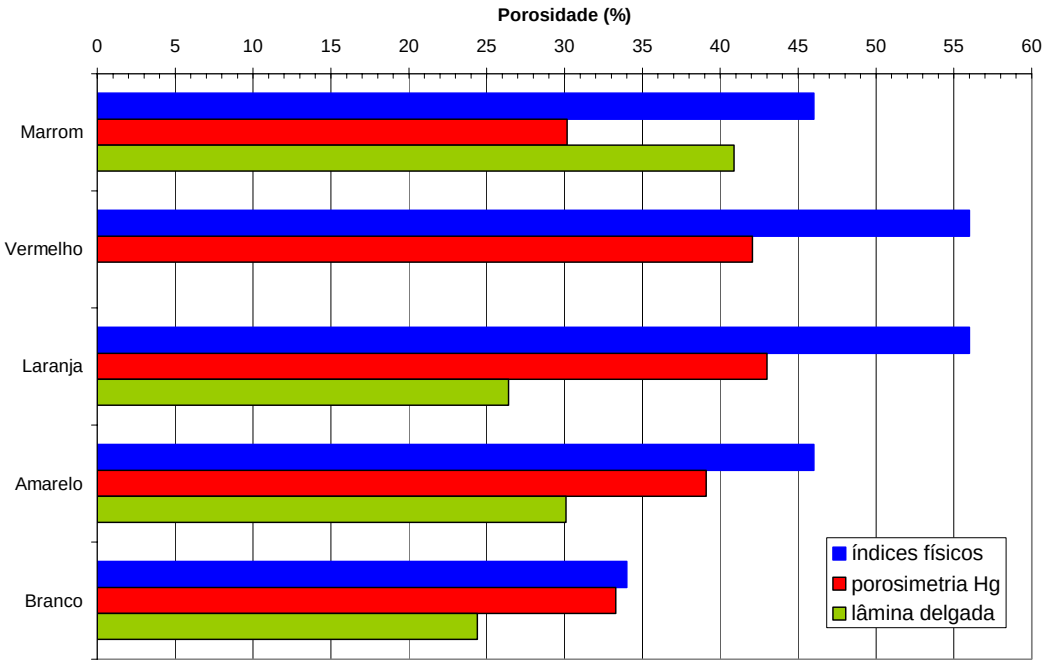

Figura 6.6 – Porosidade dos solos obtida por diferentes métodos

Embora o comportamento da variação da porosidade ao longo do perfil seja semelhante para as 3 metodologias, a porosidade obtida a partir dos ensaios de caracterização física se mostrou sempre superior às demais. Os dados obtidos a partir da contagem de pontos em lâminas delgadas foram os que se mostraram menores, possivelmente pela limitação que se tem nesta metodologia a partir da qual só é possível contabilizar poros com diâmetros maiores que 30μm. Cabe aqui ressaltar que os ensaios por injeção de mercúrio contabilizam apenas os poros interligados, pois o mercúrio não consegue penetrar no interior de poros isolados. Esta talvez seja uma das razões pelas quais os resultados obtidos por este ensaio são menores do que aqueles obtidos a partir dos ensaios de caracterização física. A vantagem da porosimetria de mercúrio consiste, principalmente, no fornecimento da curva de distribuição do diâmetro dos poros. No entanto, sua principal desvantagem está no custo elevado em relação aos demais.

6.3. Relação entre propriedade físicas, químicas, mineralógicas e micromorfológicas e a resistência ao cisalhamento

No Capitulo 5, os resultados dos ensaios de cisalhamento direto foram interpretados assumindo a existência de envoltórias lineares. Conforme indicado na Figura 7, envoltórias curvas, na forma potencial, se ajustam melhor aos

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410766/CA

pontos experimentais obtidos do que as envoltórias lineares propostas no Capítulo 5.

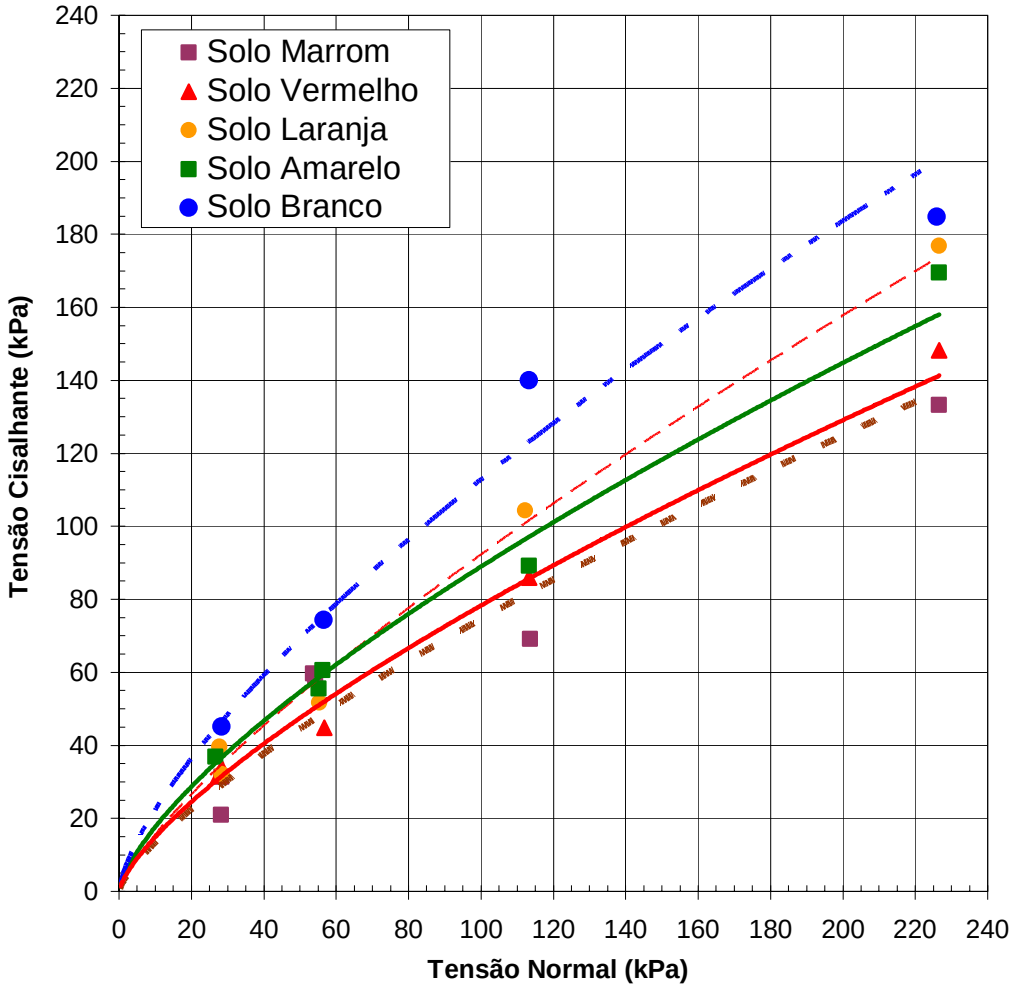

Figura 6.7 – Envoltórias de resistência na forma potencial

As equações propostas para estas envoltórias são da forma:

$$\tau = a \times \sigma^{b}$$

As equações para os cinco solos estudados, juntamente com os coeficientes de correlação destas envoltórias estão apresentados na Tabela 6.5.

Buscando-se uma correlação entre os parâmetros obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento direto e o grau de intemperismo dos solos, a seguir estes parâmetros são correlacionados com o índice de intemperismo químico **ba$_1$**, o índice de perda ao fogo, a fração fina e o índice de vazios médio dos solos do perfil.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410766/CA

Tabela 6.5 – Equações potenciais propostas para os ensaios de cisalhamento direto

Solo	Equação	Coeficiente de correlação (R^2)
Marrom	$\tau = 2{,}4267 \times \sigma^{0{,}7437}$	0,8825
Vermelho	$\tau = 2{,}8266 \times \sigma^{0{,}7212}$	0,9829
Laranja	$\tau = 2{,}6033 \times \sigma^{0{,}7746}$	0,9784
Amarelo	$\tau = 3{,}4983 \times \sigma^{0{,}7027}$	0,9861
Branco	$\tau = 4{,}4269 \times \sigma^{0{,}7031}$	0,9803

A Tabela 6.6 apresenta um resumo dos parâmetros obtidos tanto da envoltória linear (Mohr-Coulomb) quanto da envoltória na forma de potência.

Tabela 6.6 – Resumo dos parâmetros dos ensaios de cisalhamento direto

	Coesão (c')	Ângulo de atrito (ϕ')	Parâmetro a	Parâmetro b
Marrom	20,3	26,5	2,4267	0,7437
Vermelho	15,6	30,5	2,8266	0,7212
Laranja	16,0	35,8	2,6033	0,7746
Amarelo	19,9	33,2	3,4983	0,7027
Branco	37,0	34,9	4,4269	0,7031

A Figura 6.8 mostra que os parâmetros obtidos a partir das envoltórias lineares (c' e ϕ') não apresentam boa correlação com os índices propostos. Foram tentadas correlações de outras formas que não lineares. Algumas até se ajustaram bem aos pontos obtidos, no entanto não apresentavam nenhum sentido físico.

Já na Figura 6.9 observa-se que para os parâmetros a e b, das envoltórias não lineares, as correlações lineares são melhores. Isto vem demonstrar que, para o solo estudado, a envoltória de cisalhamento é não linear. A Tabela 6.7 compara os coeficientes de correlação lineares obtidos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410766/CA

Tabela 6.7 – Comparação entre os coeficientes de correlação (R^2)

Correlações	Coeficientes de correlação (R^2)	
	c' / ϕ'	a / b
Parâmetros de cisalhamento x **ba_1**	0,6367 / 0,2723	0,902 / 0,5281
Parâmetros de cisalhamento x P.F.	0,5502 / 0,3367	0,8881 / 0,5232
Parâmetros de cisalhamento x F.f.	0,1715 / 0,9245	0,5008 / 0,0745
Parâmetros de cisalhamento x e_m	0,8116 / 0,0045	0,601 / 0,384

ba_1 = parâmetro de intemperismo químico
P.F. = índice de perda ao fogo
F.f. = Fração fina do solo (argila + silte)
e_m = índice de vazios médio

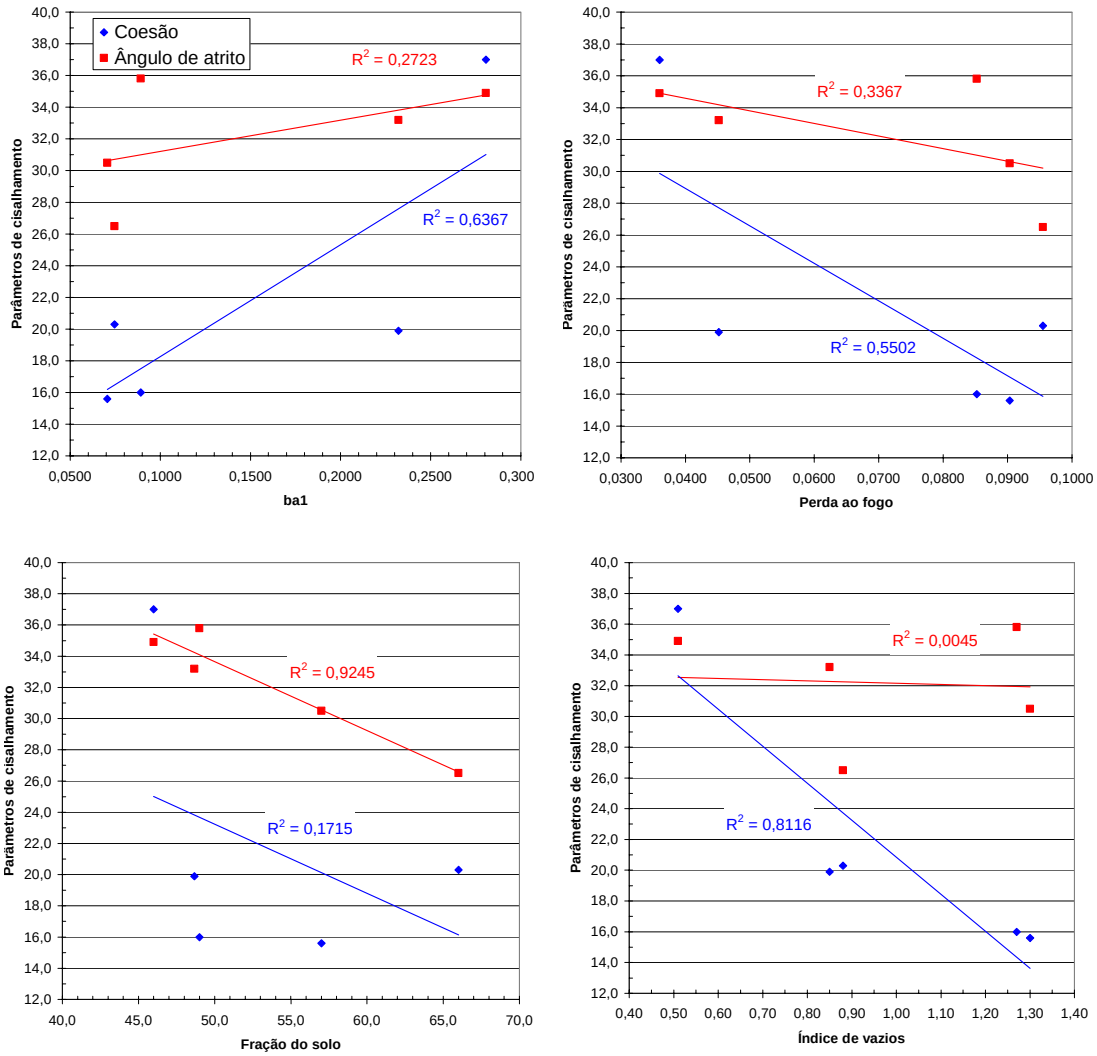

Figura 6.8 – Correlações lineares entre os parâmetros c' e ϕ' e alguns índices propostos de quantificação do intemperismo

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410766/CA

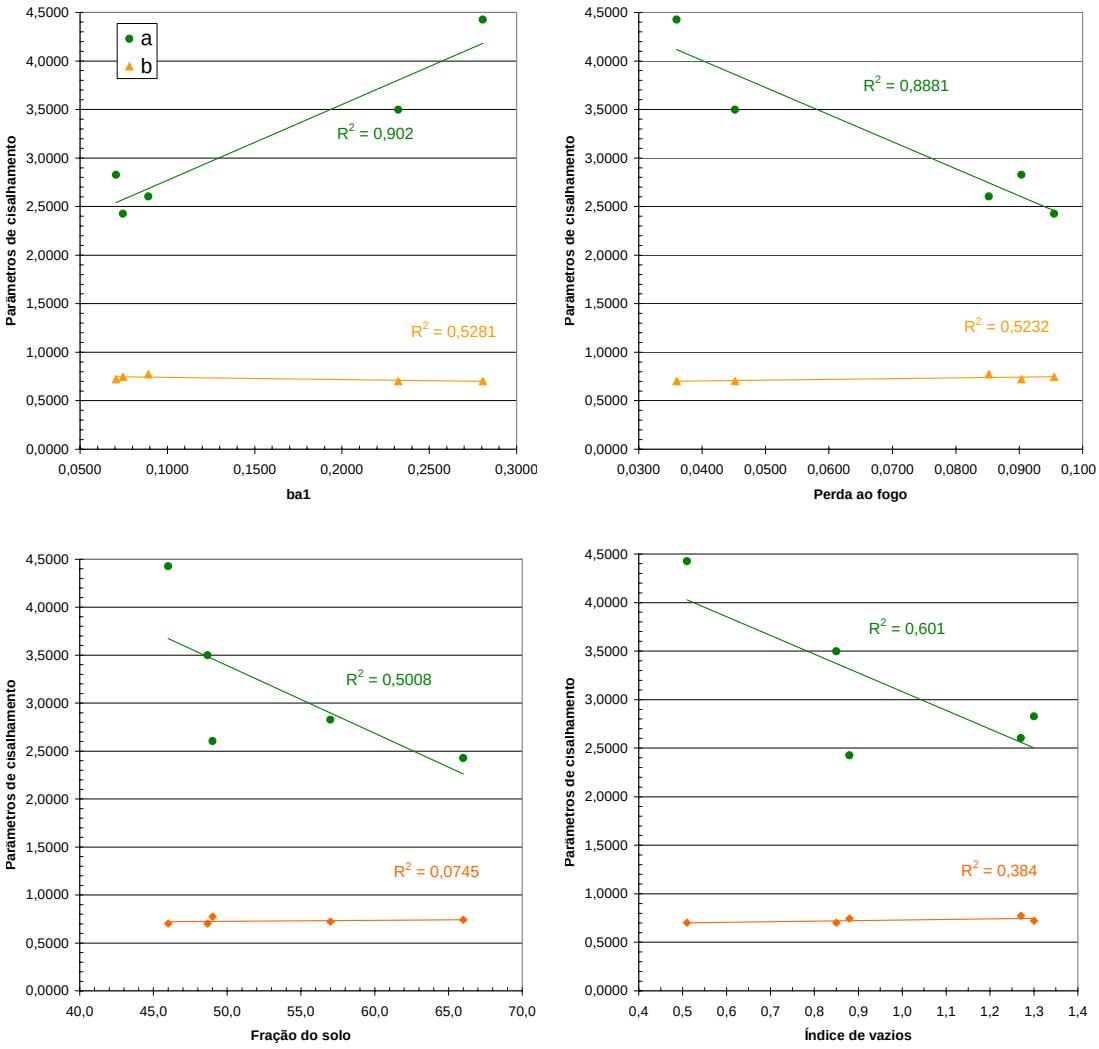

Figura 6.9 - Correlações lineares entre os parâmetros a e b e alguns índices propostos de quantificação do intemperismo

Em relação à resistência, o solo Branco foi o que apresentou maior quantidade de feldspato menos intemperizado na análise micromorfológica, podendo justificar o fato de apresentar uma maior resistência ao cisalhamento. Também a difratometria por raios-X sugere que o solo Branco é o que apresenta a maior quantidade de feldspato pouco alterado.

Por outro lado, o solo Marrom, que se mostrou o mais poroso na micromorfologia, foi o que apresentou uma menor resistência ao cisalhamento, seguido do Vermelho, Amarelo e Laranja, em concordância inversa com o aumento da porosidade.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410766/CA

6.4. Relação entre propriedade físicas, químicas, mineralógicas e micromorfológicas e as análises microbiológicas

Objetivando dar o primeiro passo em busca de correlações entre parâmetros microbiológicos do solo com seu grau de intemperismo procurou-se nesta dissertação correlacionar a quantidade de microorganismos e a atividade degradadora total dos solos do perfil com a quantidade de matéria orgânica, o índice de intemperismo químico $\mathbf{ba_1}$, a superfície específica dos solos, a capacidade de troca catiônica e o pH. Com exceção da matéria orgânica, nenhuma correlação foi encontrada entre estes parâmetros e os parâmetros microbiológicos. Isto evidencia uma real necessidade de se realizarem mais análises desta natureza nos solos deste perfil.

Em relação à quantidade de matéria orgânica, o solo Marrom é o único a apresentar uma quantidade representativa (5,6%). Muito provavelmente, esta quantidade um pouco mais elevada, estimula uma sobrevivência diferenciada de microrganismos heterotróficos.

Nas camadas mais profundas, onde o teor de matéria orgânica é muito baixo (entre 0,7 e 0,9%), os dois parâmetros microbiológicos avaliados também se mostraram baixos. O número de microrganismos nestes solos pode advir da manutenção da população com baixo metabolismo ou da presença de microrganismos quimiossintéticos que usam elementos minerais reduzidos como fonte de poder redutor (energia) provocando sua oxidação e consequentemente intemperização do solo.

A Figura a seguir mostra que existe uma relação entre a atividade microbiana degradadora total (Figura 6.10a) e o teor de matéria orgânica (Figura 6.10b). Isto pode ser explicado pelo fato de que o FDA (atividade microbiana degradadora total) está relacionado com a atividade enzimática de esterases, que, por sua vez, são enzimas ligadas à degradação de matéria orgânica. Não foi possível, entretanto fazer uma correlação direta dos parâmetros microbiológicos com o grau de intemperismo, uma vez que o teor de matéria orgânica não apresentou boa correlação com nenhum dos parâmetros propostos. Isto não exclui a possibilidade de existência destas correlações uma vez que, como já mencionado neste trabalho, devido a grande quantidade de ensaios implementados na presente dissertação, não se procurou comparar de forma sistemática todos os dados obtidos, optando-se por efetuar comparações apenas entre aqueles que, se esperava, propiciassem melhores correlações.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410766/CA

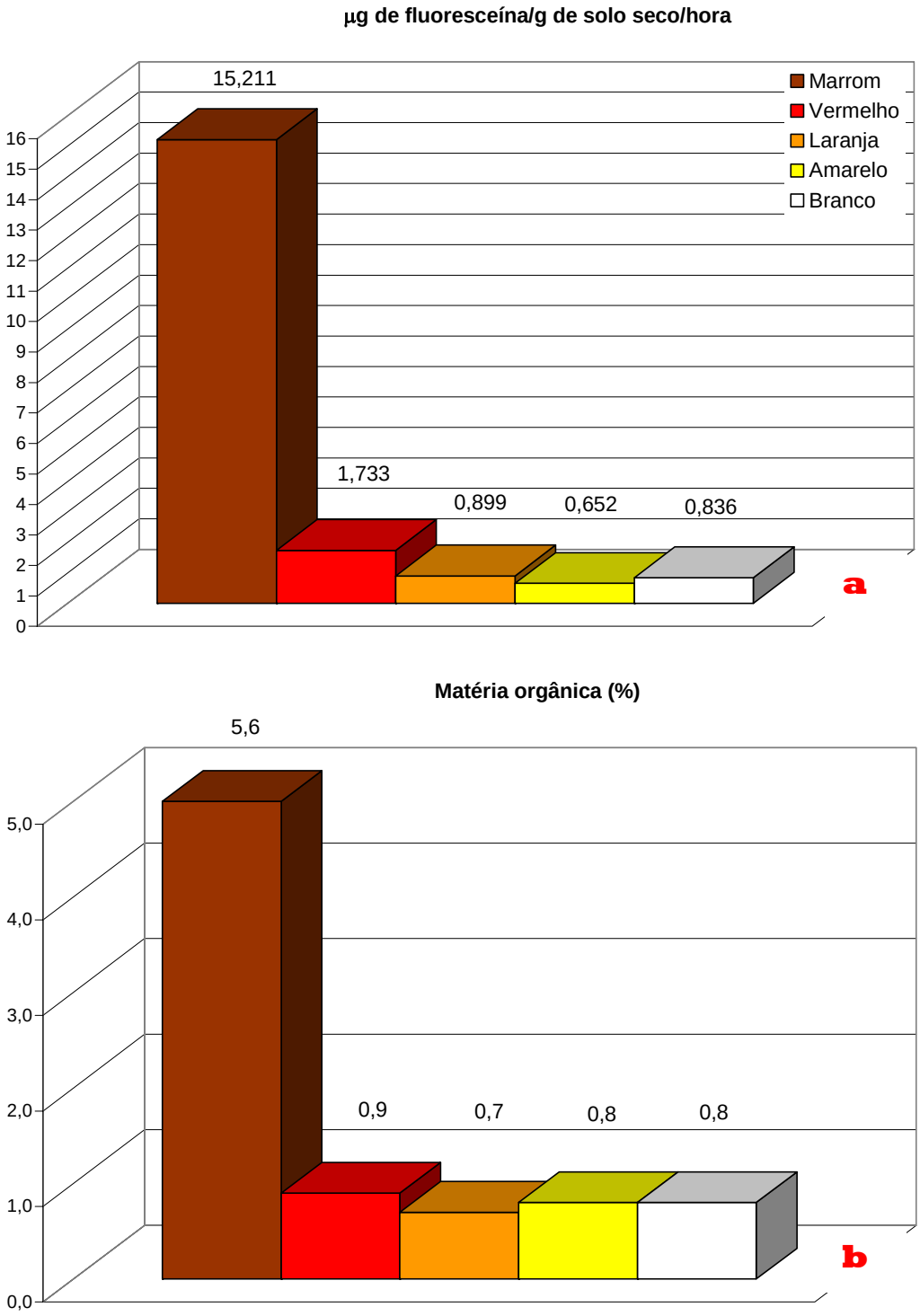

Figura 6.10 – (a) Atividade microbiana degradadora total (FDA); (b) Teor de matéria orgânica – valores médios

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410766/CA