

INFLUÊNCIA DA CALAGEM NO COMPLEXO DE TROCA E MOVIMENTO
DO CÁLCIO E MAGNÉSIO EM UM ANDOSOL DE COSTA RICA

Tese de Grau de Magister Scientiae

Maurelio Morelli



INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS DE LA OEA
Centro Tropical de Enseñanza e Investigación
Departamento de Cultivos y Suelos Tropicales
Turrialba, Costa Rica
Abril, 1971

INFLUÊNCIA DA CALAGEM NO COMPLEXO DE TROCA E MOVIMENTO
DO CÁLCIO E MAGNÉSIO EM UM ANDOSOL DE COSTA RICA

Tese

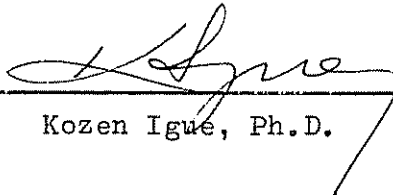
Apresentada ao Conselho da Escola para Graduados
como requisito parcial para optar ao grau de

Magister Scientiae

no

Instituto Interamericano de Ciências Agrícolas da OEA

APROVADA:



Kozen Igue, Ph.D.

Conselheiro



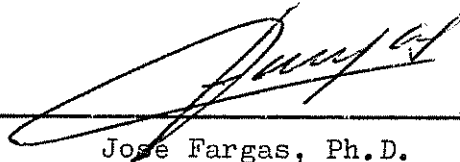
Gilberto Páez, Ph.D.

Comitê



Rufo Bazán, Ph.D.

Comitê



Jose Fargas, Ph.D.

Comitê

Abril, 1971

Aos meus pais
e irmãos

AGRADECIMENTO

O autor deseja expressar seu agradecimento ao Dr. Kozen Igue, Conselheiro Principal, pela valiosa orientação e constante apoio na realização do presente trabalho de tese.

Ao Dr. Gilberto Páez, pela orientação na análise estatística e sugestões que contribuíram para melhorar êste estudo.

Ao Dr. Hans W. Fassbender, pelas sugestões e colaboração inicial, cedendo os dados do experimento que serviu de base ao presente estudo.

Aos Drs. Rufo Bazán e José Fargas, pelas sugestões que permitiram melhorar os resultados e apresentação dêste trabalho.

Ao colega Ing. Raúl Fuentes, pelo auxílio prestado na amostragem do solo.

Ao IICA-CTEI e a OEA, pela bolsa de estudos concedida.

A tódas as pessoas que de alguma forma colaboraram para a realização desta pesquisa.

BIOGRAFIA

O autor nasceu na cidade de Dom Feliciano, Estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

Realizou seus estudos universitários na Faculdade de Agronomia e Veterinária da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em Pôrto Alegre, graduando-se Engenheiro Agrônomo em dezembro de 1965.

Prestou serviços na Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo do Ministério da Agricultura, no Rio de Janeiro, de 1966 a 1968. Em 1969 ingressou na Superintendência do Vale do São Francisco, desempenhando suas funções em Pirapora, Minas Gerais.

Em setembro de 1969 ingressou na Escola de Graduados do Instituto Interamericano de Ciências Agrícolas da OEA, tendo obtido o grau de Magister Scientiae em abril de 1971.

CONTEÚDO

	<u>Página</u>
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Natureza ácida do solo	3
2.2. A calagem e o controle da acidez	5
2.3. Efeito do calcário na capacidade de troca de cátions	8
2.4. A calagem e a perda de cálcio por lixiviação	10
3. MATERIAIS E MÉTODOS	12
3.1. Localização	12
3.2. Esquema experimental	12
3.3. Amostragem do solo	13
3.4. Procedimento analítico	14
3.4.1. Análise química	14
3.4.2. Análise granulométrica	16
3.5. Curvas de titulação	17
3.6. Análise estatística	17
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
4.1. Características do solo	18
4.2. Efeito da calagem no complexo de troca	18
4.2.1. Efeito no pH e acidez de troca	18
4.2.2. Curvas de neutralização	27
4.2.3. Capacidade de troca de cátions e saturação de bases	27
4.2.3.1. CTC com acetato de amônio 1N, pH 7,0	27
4.2.3.2. CTC determinada com KCl 1N	29
4.2.3.3. CTC pH-dependente	33
4.2.4. Saturação de bases	36
4.3. Influência da calagem no movimento do Ca e Mg no solo	39
4.3.1. Movimento vertical do Ca	39
4.3.2. Movimento vertical do Mg	41
4.3.3. Movimento lateral do Ca	42

	<u>Página</u>
4.4. Influência da calagem na produção de cana-de-açúcar	43
5. CONCLUSÕES	46
6. RESUMO	47
7. SUMMARY	48
8. BIBLIOGRAFIA	49
APÊNDICE	56

LISTA DE QUADROS

Quadro nº		<u>Página</u>
1	Dados de análise química das parcelas testemunhas. (Médias de cinco repetições)	19
2	Dados de análise física do solo	20
3	Influência da calagem no pH em H ₂ O e em KCl 1N, a diversas profundidades	21
4	Influência da calagem na CTC, bases trocáveis e acidez de troca, em amostras coletadas à profundidade de 20-40 cm. (Médias de cinco repetições)	30
5	Determinação da CTC-KCl 1N. Testes com três maneiras de lavar o excesso de sal. (Médias de duas repetições)	51

LISTA DE FIGURAS

Figura nº		<u>Página</u>
1	Influência da calagem no pH-H ₂ O e pH-KCl ...	23
2	Influência do calcário na acidez de troca ..	26
3	Curvas de titulação de amostras coletadas a várias profundidades (em parcelas testemunhas)	28
4	Influência da calagem na CTC-KCl 1N e na CTC pH-dependente	34
5	Influência da calagem no soma de cátions trocáveis	37
6	Influência da calagem na percentagem de saturação de bases	38
7	Movimento de cálcio através do perfil do solo, em função dos vários níveis de calcário aplicados	40
8	Movimento de magnésio através do perfil do solo, em função dos vários níveis de calcário aplicados	40
9	Influência da calagem na produção da cana-de-açúcar	44

1. INTRODUÇÃO

Os solos de regiões tropicais se caracterizam em geral pela elevada acidez e baixos teores de bases trocáveis, em decorrência do processo de lixiviação a que, via de regra, estão submetidos. Investigações sobre a influência da calagem realizadas em regiões temperadas, conduzem a resultados que não podem ser empregados integralmente em regiões tropicais, sendo necessário fazer uma revisão de conceitos (38), especialmente quando se trata de solos com alto teor de alumínio, ferro e manganês, elementos estes que ocorrem com frequência em "latossóis" e "andosóis".

Sem dúvida a principal causa do comportamento diferente dos solos de regiões tropicais em relação aos de regiões temperadas, reside no sistema coloidal dominante. Condições de elevada temperatura e precipitação que em geral ocorrem nos trópicos, imprimem uma aceleração da meteorização, onde predomina a lixiviação de bases, inclusive do Si, dando como consequência a formação de óxidos hidratados amorfos ou pseudocristalinos, os quais possuem propriedades marcadamente distintas dos coloides cristalinos. Desta maneira para a compreensão dos efeitos da calagem nos solos de regiões tropicais, torna-se necessário considerar o sistema coloidal do solo especialmente no que se refere às propriedades de troca de cations.

Tratando-se de solos derivados de cinzas vulcânicas onde o alofano é o coloide dominante, as peculiaridades do comportamento dos mesmos em relação à calagem são bastante acentuadas e ainda não compreendidas satisfatoriamente. As investigações realizadas até o presente, têm mostrado que para estes solos a calagem deve ser feita

com prudência, para evitar problemas como o desbalance catiônico ou a indisponibilidade de micronutrientes.

O presente trabalho foi realizado utilizando-se um experimento iniciado há quatro anos, onde se estuda a influência de vários níveis de calcário na cultura da cana-de-açúcar. Os objetivos são os seguintes:

1. Determinar o efeito da calagem no complexo de troca de cations do solo, utilizando soluções de sais neutras não tamponizadas e soluções tamponizadas.
2. Analisar a perda de calcário por lixiviação, através do estudo do movimento do cálcio e do magnésio no perfil do solo.
3. Estudar a resposta da cultura da cana-de-açúcar à calagem.

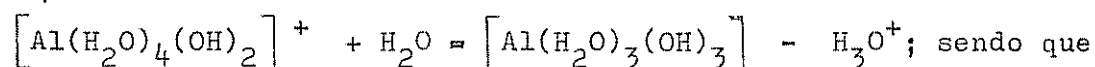
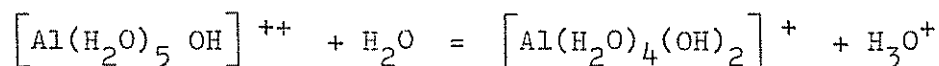
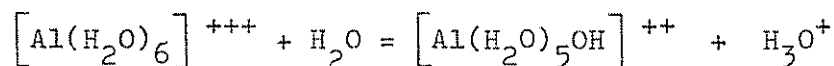
2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Natureza ácida do solo

A natureza da acidez do solo tem sido assunto controvertido desde o século passado quando esta era atribuída primordialmente aos ácidos húmicos. Veitch (69) em 1904, mostrou que extratos de NaCl de solos ácidos e com baixos teores em humus, continham Al, Fe e Mn, postulando que a causa da acidez estava na fração mineral dos solos. Trabalhos de Daikuhara e de Kappen (1944 e 1916), conforme cita Jeny (32), evidenciaram a existência do Al trocável dando origem à acidez de troca. Mais tarde em 1923, Bradfield (12), aponta a existência do hidrogênio trocável nas argilas, que se comportavam como ácidos fracos. Atribuiu-se então, ao hidrogênio a acidez do solo, teoria esta que foi aceita na época em contraposição a do Al.

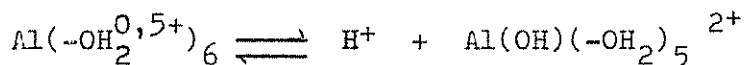
Paver e Marshall (49) em 1934, mostraram que argilas insaturadas continham Al e H adsorvidos e não apenas o H. Schofield (63) em 1946 demonstrou a necessidade de se reconhecer o Al como cation presente em solos ácidos, sugerindo a existência da coordenação octaédrica polimerizada do tipo H_2O-OH -íon. Com trabalhos de outros autores como Muckerjee, Chernov e Russel, conforme cita Jeny (32), volta a teoria do Al trocável à tona, sendo desde então confirmada a sua importância nos solos ácidos. A origem do Al em solos ácidos é devida a instabilidade de argilas-H que se decompõem liberando-o da estrutura cristalina em troca com o H, (Coleman, 15). O alumínio se hidroliza constituindo uma fonte potencial de acidez, conforme o

indicado abaixo:



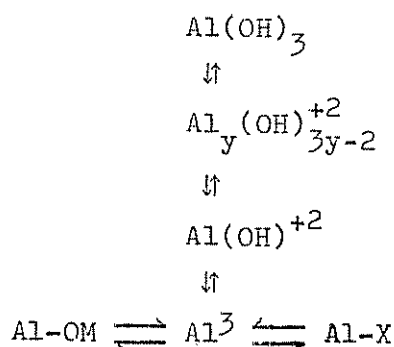
a segunda e a terceira equações são hipotéticas.

Segundo Jackson (31), a acidez causada pelo "aluminohydronium" (ou aluminohexahydronium) pode ser assim esquematizada:



Investigações mais recentes, têm mostrado a existência do Al adsorvido pelas argilas não somente como ion trocável trivalente, mo nomérico, mas também na forma de polímeros de $\text{Al}_y(\text{OH})_x$ de tamanho e grau de hidratação indefinidos. Conforme êstes autores os hidróxidos de Al e Fe são adsorvidos na superfície dos minerais silicatados, onde comportam-se como doadores de prótons, sendo responsáveis por grande parte da carga pH-dependente dos solos. Podem ser adsorvidos na superfície interna das argilas tipo 2:1, dando origem aos minerais denominados intergradados, Rich (57).

Segundo Pionke e Corey (51), o alumínio ácido no solo está rela cionado com o pH, argila e matéria orgânica, ocorrendo as seguintes reações:



De acôrdo com o esquema acima, Al^3 representa a atividade dos íons Al hidratados trivalentes na solução do solo; Al-X representa o Al trocável por KCl; Al-OM refere-se ao componente ácido não trocável coplexado pela matéria orgânica e $\text{Al}_y(\text{OH})_{3y-2}^{+2}$ refere-se ao componente não trocável que está polimerizado e provâvelmente residindo na superfície das partículas.

A caracterização das diferentes formas de Al ocorrendo em solos ácidos é problema difícil. Até o momento as distinções são feitas à base dos extratores usados. Assim a acidez extraída com KCl 1N inclui grande proporção de Al^{+++} e H^+ , (41). Investigações têm mostrado que o KCl 1N determina também o alumínio nas formas Al(OH)^{++} e Al(OH)_2^+ , (54).

2.2. A calagem e o contrôle da acidez

A acidez de troca medida com KCl 1N tem sido usada como base para a recomendação da necessidade de calagem, ainda que a quantidade de calcário necessária para elevar o pH em tôrno da neutralidade, em solos ácidos, seja sempre maior que a acidez de troca assim determinada (44). Outros métodos bastante satisfatórios para a determinação da necessidade de calagem têm sido propostos, (1, 45, 52, 65, 70).

A correção da acidez em solos tropicais é ainda assunto controvertido (38). Embora seja reconhecida a necessidade da calagem para estes solos, torna-se necessário considerar as características que os tornam diferentes daqueles de regiões temperadas onde foram realizadas a grande maioria das investigações sobre a prática da calagem. As condições de alta temperatura e precipitação das regiões tropicais conduzem a um intenso intemperismo com processos de lixiviação de bases e formação de coloides não cristalinos, dando aos solos características especiais discutidas.

Fox e Plucknett (27), estudando solos de Hawaii, advertem para o perigo do excesso de calagem em solos tropicais, e apontam a necessidade de considerar a solubilidade do calcário no desbalance de nutrientes e exigências de plantas tropicais com respeito a Ca. Observam ainda que o calcário não deve ser empregado para alcançar o pH neutro, pois quando o solo torna-se demasiado alcalino há prejuízo na disponibilidade de fósforo. Da mesma forma, Matsusaka e Sherman (39), trabalhando com solos de Hawaii, concluem que doses altas de calcário podem saturar o complexo de troca e causar sérios desbalances entre os diversos nutrientes em geral. Rios e Martini (60), estudando solos do Panamá chegam à conclusão de que para elevar o pH para 6 ou 7 seriam necessárias doses muito altas de CaCO_3 , as quais provocariam uma concentração excessiva de Ca, ocasionando um desbalance nutricional expressado pelas relações inadequadas de Ca/Mg, Ca/K e Ca/elementos menores. Hortenstin e Ozaki (30), registram uma redução no aproveitamento do Mg pelas plantas, em solo arenoso, causada

pela calagem. Este fato evidencia a vantagem de usar o calcário dolomítico para a correção de solos ácidos.

Bornemisza et al. (11), investigando o efeito do calcário em latosolo de Costa Rica observam que 12 meq. de CaCO_3 /100 g de solo aumentava o pH em aproximadamente uma unidade, sendo que 24 meq. aumentava em 1,8 unidades; resultados estes que evidenciam uma considerável capacidade tamponizadora do solo.

Mikkelsen et al. (47), estudando solos de cerrado do Brasil, concluem que a resposta à adubação com fósforo está condicionada à aplicação de calcário, sendo que nesses solos, que contêm alto teor de P_2O_5 total, a aplicação de calcário pode reduzir a necessidade de fertilizante fosfatado.

No que se refere a solos derivados de cinzas vulcânicas, são relativamente poucas as investigações sobre os efeitos da calagem. Rixon e Sherman (61), observam um substancial contrôlo da acidez pela aplicação de calcário, manifestado pela elevação do pH e diminuição do teor de alumínio trocável, em solos de Hawaii.

Em solos vulcânicos de Costa Rica, Fassbender (24) e Fassbender e Molina (25), observaram um sensível aumento na produção de tomate com a calagem, ao mesmo tempo em que assinalaram uma alta capacidade tamponizadora desses solos. Observam ainda que a produção máxima se realizou com a elevação do pH para 5,8, decrescendo com doses de calcário necessárias para elevar o pH a um valor maior.

Mahilum et al. (37), trabalhando com solos derivados de cinzas vulcânicas de Hawaii, encontraram que a calagem produziu um decréscimo

curvilíneo no teor de alumínio trocável. Encontraram ainda que a calagem provocou um aumento nos teores de K e Ca na parte superficial do solo e um decréscimo no subsolo, dando como explicação o deslocamento do Al pelo Ca que atuaria como íon complementar, e a liberação de cargas pH-dependentes pela calagem.

2.3. Efeito da calagem na capacidade de troca de cations

A existência da CTC pH-dependente tem sido evidenciada por vários autores (17, 29, 33, 42, 53, 62). Coleman e colaboradores (17), chamam de CTC pH-dependente à diferença entre a CTC a pH 8,2 medida com solução tamponizada, e a soma de cations removidos por KCl 1N. A este último componente os autores denominam CTC pH-permanente.

Os óxidos hidratados de Al e Fe comportam-se como doadores de protons (H^+) e podem ser responsáveis por grande parte da CTC pH-dependente (43). Vários autores têm demonstrado que a matéria orgânica tem grande influência na CTC pH-dependente, sendo a principal fonte na maioria dos solos, (17, 29, 53). Pratt (53), verificou que a contribuição da matéria orgânica para a CTC pH-dependente era em média, para vários solos, 24 vezes maior que a contribuição da argila.

Quando soluções não tamponizadas de sais de ácidos fortes como KCl e $CaCl_2$, são usadas para a determinação da CTC, a calagem influencia apreciavelmente esse valor, especialmente em solos com alto teor de alumínio extraível. McLean e Owen (42) encontram que a maior parte do aumento da CTC pela calagem deve-se às cargas da matéria orgânica prêviamente inativadas por Al. Clark (14), mostrou que políme-

ros de hidróxidos de alumínio e de ferro bloqueiam as cargas de troca tanto da argila como de grupos carboxílicos de resina de troca. Este bloqueio aumenta é tanto maior quanto maior for a acidez de troca. De Villiers e Jackson (21), explicam o aumento da CTC com o aumento do pH, pela liberação de cargas negativas de substituição isomórfica de argilas, inicialmente bloqueadas, devido à desprotonização de hidróxidos de Al presentes.

A influência da calagem na CTC pH-dependente tem sido estudada por diversos autores. Pratt (53), correlacionou a CTC pH-dependente com os miliequivalente de CaCO_3 necessários para obter o ponto de equivalência na reação do CaCO_3 com o solo, o qual é obtido quando praticamente não há mais mudanças no pH do solo (pela adição de CaCO_3). Encontrou que o ponto de equivalência menos a acidez de troca era igual a CTC pH-dependente. McLean et al. (43), incubando solos de Ohio com calcário, observaram que a calagem reduziu marcadamente a CTC pH-dependente enquanto que a CTC medida com KCl 1N aumentava. Bhumbra e McLean (6), observaram, por outro lado, que a CTC medida com acetato de amônio 1N, pH 7,0 não era influenciada pela calagem, entretanto havia aumento na CTC medida com soluções não tamponizadas de KCl 1N e CaCl_2 1N.

Bornemisza et al. (11), em trabalho com latosol de Costa Rica, observou que a CTC medida com Ba, aumentava, em média de 29,9 meq/100 g para 37,4 meq/100 g com a aplicação de 36 meq/100 g de CaCO_3 . Laroche (34), utilizando também latosol de Costa Rica, conclui que a saturação de bases de solo é uma função linear das doses de CaCO_3

aplicadas. Observa ainda um aumento na CTC medida com CaCl_2 , 1N pela calagem.

Estudando solos derivados de cinzas vulcânicas de Hawaii, Rixon e Sherman (61), observam que o calcário não produziu modificações diretamente na CTC medida com NH_4OAc , 1N, pH 7. Entretanto Fassbender e Molina (25), estudando solos derivados de cinzas vulcânicas de Costa Rica, observaram que a calagem produziu um aumento na CTC medida com BaCl_2 e trietanolamina. Segundo Birrell e Gradwell (7), a determinação da CTC de solos com sistema coloidal amorfo deve ser feita pela soma de bases trocáveis mais a acidez de troca, o que dá valores mais reais que pelos métodos comuns diretos, onde se incluem erros devido a variações de pH e retenção de cations saturadores.

2.4. A calagem e a perda de Ca por lixiviação

A lixiviação de bases está na dependência das condições climáticas e das condições físico-químicas dos solos. Em regiões de alta precipitação a lixiviação de bases constitui, sem dúvida, um sério problema conduzindo à acidificação dos solos. Solos derivados de cinzas vulcânicas possuem alta permeabilidade e têm alta susceptibilidade à perda de bases por lixiviação.

Brown et al. (13), estudando o efeito da calagem no perfil de um solo de textura franca, após vinte e três anos de aplicação, observaram influência no pH do solo até a profundidade de 75 cm, dando como explicação a provável desintegração e dissociação do calcário em água carbonatada, sendo os bicarbonatos lixiviados através do perfil,

elevando o pH. Pratt e colaboradores (56), verificaram que após vinte anos de aplicação de calcário em solo irrigado, a acumulação do calcário era maior entre 0 e 15 cm e entre 50 e 90 cm, sendo menor entre 15 e 30 cm o que se explica devido à flutuação do lençol de água. Pearson e colaboradores (50), encontram que a lixiviação de Ca e Mg, após a calagem, aumentava com o aumento da acidez provocada por adubação com sulfato de amônio. Fox (26), estudando solos derivados de cinzas vulcânicas de Hawaii, conclui que a lixiviação é uma importante consequência da facilidade com que os cations se dissociam dos coloides amorfos. Por essa razão, quantidades moderadas de calcário, estão associadas a quantidades consideráveis de Ca perdido por lixiviação através do perfil. Apresenta resultados que mostram uma modificação substancial do pH no perfil do solo até uma profundidade de 120 cm, cinco anos após a aplicação de 19 ton/ha de calcário.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Localização

O solo estudado está localizado na Finca La Vitória, à margem da rodovia Turrialba-Juan Viñas, Província de Cartago, Costa Rica. Pertence à Série Birrisito, segundo Dondoli e Torres (22), sendo formado a partir de cinzas vulcânicas. Knox e Maldonado (34), classificam de Oxíc Dystrandept, ashy, isohypertermic, a um perfil localizado cerca de 500 m do local do experimento que serviu de base ao presente trabalho, possuindo características semelhantes ao referido local. O local está situado à uma altitude de 1200 m, com temperatura média anual de 21°C e precipitação de 3800 mm por ano.

3.2. Esquema experimental

Um experimento de campo foi instalado nesse local com o objetivo de estudar o efeito de doses crescentes de calcário na produção da cana-de-açúcar*. Utilizou-se um desenho experimental de quadrado latino com cinco tratamentos que correspondem às seguintes doses de calcário: 0, 3780, 7560, 15120 e 30240 Kg/ha. Empregou-se calcário proveniente do depósito Las Animas (Turrialba), que apresentava 88,9% de carbonatos. O calcário foi aplicado por ocasião do preparo do terreno, em 9/6/1966, no fundo de sulcos de 20 cm de profundidade e distanciados um do outro de 150 cm. Cada parcela era de 144 m², com cinco sulcos de cana.

* Fassbender, H. W. Turrialba, IICA, 1970. Comunicação pessoal.

Foi realizada uma adubação básica de: 126,5 Kg/ha de N, 230,5 Kg/ha de P_2O_5 e 170 Kg/ha de K_2O , por ocasião do plantio. Os fertilizantes foram aplicados em todo o experimento com a finalidade de eliminar as possíveis variações ou limitações de produção devidas a deficiências de N, P e K.

3.3. Amostragem do solo

A amostragem do solo foi efetuada 39 meses após a aplicação do calcário, depois de serem feitas duas colheitas de cana. Antes da coleta de amostras tratou-se de delimitar o sulco de aplicação fazendo-se um corte transversal nas linhas de aplicação. As amostras foram coletadas de tôdas as parcelas nas seguintes profundidades: 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-80 cm e 80-100 cm. Pelo fato de haver ainda calcário não dissolvido no fundo dos sulcos, na profundidade de 0-20 cm foi feita amostragem com pá, evitando misturar o calcário residual com o solo coletado, sendo que para as demais profundidades coletaram-se as amostras com trado. A consistência adquirida pelo solo com a elevada umidade existente, possibilitou uma coleta de amostras sem perigo de contaminação entre as diversas profundidades. Os locais de amostragem foram marcados sôbre o sulco de aplicação do calcário, em número de três para cada parcela. Portanto para cada parcela coletou-se uma amostra composta de três sub-amostras, em tôdas as profundidades mencionadas.

A coleta de amostras para o estudo do movimento lateral do Ca, foi feita da seguinte maneira: Escolheram-se três parcelas que

receberam dose máxima (30 240 Kg/ha de calcário), e em cada uma destas parcelas fixou-se um local sôbre o sulco de aplicação do calcário. Nestes locais marcaram-se pontos distanciados de 20, 40 e 60 cm do sulco de aplicação. Estes pontos correspondiam aos lugares onde eram coletadas as amostras, nas seguintes profundidades: 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm. As amostras das três parcelas correspondentes às mesmas distâncias do sulco de aplicação e profundidades, eram misturadas, obtendo-se desta maneira uma amostra composta de três sub-amostras para cada distância do sulco de aplicação e à cada profundidade.

3.4. Procedimento analítico

As amostras coletadas foram secadas ao ar e tamizadas por malha de 2 mm. Tôdas as análises foram feitas nestas amostras e corrigidas para solo sêco a 105°C.

3.4.1. Análise química

As seguintes caracterizações foram feitas: pH, Al e H trocáveis, Ca, Mg, K, CTC-NH₄OAc, CTC-KCl, CTC pH-dependente, acidez medida com BaCl₂·2H₂O e trietanolamina, pH 8,2 e carbono orgânico.

- a. Medição do pH: Foi feita em H₂O e em KCl 1N, usando relação solo/solução 1/2,5.
- b. Acidez de troca determinada com KCl: Usou-se KCl 1N como solução extratora, segundo o método de Yuan (73), com ligeira modificação que consiste em percolar o solo com cinco porções

de 50 ml de KCl, em tubos percoladores com tampa perfurada na parte inferior e lã de vidro como filtro. O método citado com a referida modificação, produz uma boa extração da acidez, com dados bastante reproduzíveis, (Igue e Fuentes*). Este método permite determinar a CTC a pH do solo, possibilitando desta maneira, detectar a influência do calcário nesta propriedade.

- c. Acidez de troca determinada com $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ -TEA--pH 8,1: Foi empregado o método de Mehlich, com pequenas modificações: Adicionou-se 40 ml de solução de $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e trietanolamina em 2,5 g de solo e deixou-se em repouso por quatro horas. Após transferiu-se a suspensão para tubos de vidro contendo na base uma tampa perfurada e sobre esta um disco de papel de filtro Watman nº 42, coletando-se o filtrado em Herlenmeyer de 250 ml. Em seguida adicionou-se 25 ml da solução de $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 0,2N. Uma vez drenado, o solo era lavado com três porções de 20 ml de água, titulando-se todo extrato com HCl 0,04 N.
- d. Capacidade de troca de cations com NH_4OAc , 1N, pH 7: Usou-se o método de Bower e colaboradores (10), com pequenas modificações introduzidas por Diaz-Romeu e Balardi (22). O solo era saturado com NH_4OAc , 1N, pH 7, lavando-se o excesso de sal com álcool etílico e deslocando-se o NH_4^+

* Igue, K. e Fuentes, R. Turrialba, IICA, 1971. Dados não publicados.

retido com KCl 10%; sendo a CTC medida por destilação do NH_4^+ em aparato micro-Kjeldahl (48).

- e. Capacidade de troca de cations com KCl: Usou-se o KCl 1N como solução saturadora e NH_4OAc 1N pH 7,0 para deslocar o K retido, sendo que o K determinado por absorção atômica da va a medida da CTC-KCl. O procedimento usado foi o mesmo adotado para a determinação da CTC- NH_4OAc , com exceção da lavagem do excesso de KCl, que foi feita, segundo resultados de testes realizados, com dois lavados com 33 ml de H_2O destilada seguidos de três lavados de 33 ml de álcool etílico a 95%.
- f. Capacidade de troca de cations pH-dependente: Foi obtida pela diferença entre a CTC- NH_4OAc , 1N, pH 7,0 e a CTC-KCl 1N.
- g. Bases trocáveis: Foram extraídas com NH_4OAc 1N, pH 7,0, con forme o descrito em d, sendo analisadas por meio de espectrofotometria de absorção atômica.
- h. Carbono orgânico: Foi usado o método de Walkley e Black (2), em que a matéria orgânica é oxidada pelo $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 1N em presença de H_2SO_4 concentrado, sendo o excesso de dicromato titulado com $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0,5 N.

3.4.2. Análise granulométrica

Empregou-se o método de Bouyoucos modificado por Day (20), com ligeira modificação que consiste em aumentar o tempo de agitação do solo com a solução dispersante para 10 minutos, visando a melhor dispersão dos grumos existentes no solo.

3.5. Curvas de titulação

Empregou-se o método de Abruña e Vicent (1), que consiste em acrescentar à 10 g de solo, soluções de diferentes concentrações de Ca(OH)_2 , diluídas a partir de uma solução 0,03 N. Após aquecer até e ebulição por cinco minutos as suspensões são esfriadas e o pH é medido.

3.6. Análise estatística

Os dados obtidos foram processados em uma computadora IBM-1620-40K.

Além da análise de variância procedeu-se a análise de regressão para determinar a relação causa-efeito entre as variáveis consideradas mais importantes.

Para a análise do movimento do cálcio e do magnésio no solo, usou-se a equação gama: $Y = \beta_0 \cdot \beta_1^{-X} \cdot X^{\beta_2}$, onde:

Y = Variável de resposta (teor de Ca ou de Mg)

β_0 = Constante

β_1 = Taxa de decréscimo de Y por unidade de X

β_2 = Taxa de aumento de Y por unidade de X

X = Variável independente (profundidade)

Com esta equação se pôde determinar as tendências seguidas pelos teores de Ca e Mg no perfil do solo, em consequência da lixiviação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Características do solo

Nos Quadros 1 e 2 são apresentados os dados referentes às características físicas e químicas da área em estudo, sendo resultados de análise de parcelas testemunhas. Os dados indicam um solo com um pH bastante baixo, alta acidez de troca e saturação de bases relativamente baixa. Observa-se que o Ca aumenta com a profundidade em contraposição ao Al e H que diminuem, enquanto que o Mg se distribui mais ou menos uniformemente. O teor de matéria orgânica é mais ou menos elevado, mostrando uma capa negra superficial.

Com exceção da capa superficial, a textura média é argilo-arenosa. Este valor textural deve ser tomado com certa reserva em vista dos problemas de dispersão que o solo apresenta, pelo método de análise de partículas usado. Observando-se a retenção de água, a 15 bares, nota-se que a análise textural não coincide com a alta capacidade de retenção observada. Quanto à mineralogia, o solo apresenta alofana como mineral dominante, com presença de gibbsita e hidróxidos de Fe. Não existe indícios de minerais de argila cristalina quando submetido à análise térmico-diferencial.

4.2. Efeito da calagem no complexo de troca

4.2.1. Efeito no pH e acidez de troca

O efeito dos tratamentos de cal no pH do solo pode ser observado na Quadro 3. Verifica-se que o pH é afetado à maiores profundidades

Quadro 1. Dados de análise química das parcelas testemunhas. (Médias de cinco repetições).

Profundidade	Análise química									
	pH-H ₂ O	pH-KCl	Materia Orgânica % *	meq/100 g de solo						C.T.C.
				Al ⁺⁺⁺	H ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺		
0-20 cm	4,26	4,51	24,7	5,589	1,121	0,284	0,156	0,331	7,481	
20-40 "	4,28	4,68	24,7	4,192	0,710	0,325	0,106	0,380	5,713	
40-60 "	4,42	4,83	22,5	2,610	0,815	0,439	0,102	0,299	4,265	
60-80 "	4,74	4,99	7,2	1,932	0,496	0,524	0,110	0,163	3,225	
80-100 "	4,96	5,14	7,2	1,748	0,269	0,555	0,096	0,196	2,864	

* Knox e Maldonado (34).

Quadro 2. Dados de análise física do solo.

Profundi- dade	GRANULOMETRIA				Textura	Densidade aparente*	Retenção de água a 15 bares (%) *	Minerais da fração argila **
	Areia (%)	Limo (%)	Argila (%)					
0-20 cm	41,94	31,26	26,80		Franco-Aren.	0,5	100	Alofana-dominante
20-40 "	41,52	21,86	36,62		Franco-Argilo-Aren.	0,5	100	Gibbsita-comum Geis de Fe--Escassos
40-60 "	44,82	18,44	36,74		"	0,5	120	
60-80 "	49,04	18,84	32,02		"	0,5	120	
80-100 "	45,28	21,06	33,66		"	0,5	100	

* Knox e Maldonado (34)

** Besoin, E. Turrialba, IICA, 1971. Dados não publicados.

Quadro 3. Influência da calagem no pH em H₂O e em KCl 1N, a diversas profundidades.

Profundi- dade	CALCÁRIO (TONELADAS POR HECTARE)									
	0,00	3,78		7,56		15,12		30,24		
	pH-H ₂ O	pH-KCl	pH-H ₂ O	pH-KCl	pH-H ₂ O	pH-KCl	pH-H ₂ O	pH-KCl	pH-H ₂ O	pH-KCl
0-20 cm	4,26	4,51	4,68	4,62	5,02	4,79	5,21	4,92	5,49	4,98
20-40 "	4,24	4,68	5,26	5,17	5,72	5,67	5,89	5,64	6,06	5,79
40-60 "	4,42	4,83	4,89	4,90	5,26	5,23	5,30	5,18	5,37	5,21
60-80 "	4,74	4,99	4,84	5,02	4,80	5,24	4,98	5,18	5,03	5,18
80-100 "	4,96	5,14	4,84	5,01	4,86	5,39	5,08	5,45	5,13	5,23

conforme aumentam as doses de calcário aplicadas. À doses máximas o efeito se faz notar até a profundidade de 100 cm, embora em menor grau que na superfície. Os dados evidenciam desde já uma lixiviação do Ca e seu efeito durante o período de quatro anos. As análises de variâncias (Quadros 5 e 6), Apêndice), mostraram influência significativa da calagem nos valores de pHs medidos. Estes resultados confirmam as observações de Fox (26), que verificou um aumento de pH até a profundidade de 120 cm, cinco anos após a aplicação de 10 ton/ha de calcário em um andosol.

Na Figura 1 se representam os valores de pH em H_2O e em KCl, para a profundidade de 20-40 cm, camada situada logo abaixo do sulco de aplicação. Observa-se que o pH em H_2O é menor que em KCl para a parcela sem calcário. Entretanto a aplicação de calcário aumentou os valores de pH, tornando-se aqueles medidos em H_2O maiores que os medidos em KCl, conforme se observa comumente em solos ácidos. A validade desta observação estende-se à diferentes profundidades como se pode observar no Quadro 3, sendo o pH em H_2O menor que em KCl em torno de 0,25 unidades. Tal fenômeno foi indicado por Colmet-Daage (18) em solos com alofana muito hidratada ou com argilas roxas bauxíticas. A explicação desse fenômeno deve residir no fato de que o Cl^- dissociado do KCl, desloca os anions OH^- trocáveis da superfície do alofano, os quais passam à solução elevando o pH. Segundo Wada (72), a presença de grupos OH^- reativos no alofano é evidenciada pela troca isotópica com OD^- (óxido de deutério), sendo que em minerais como montmorilonita e haloisita isto ocorre em quantidades quase desprezíveis. Por

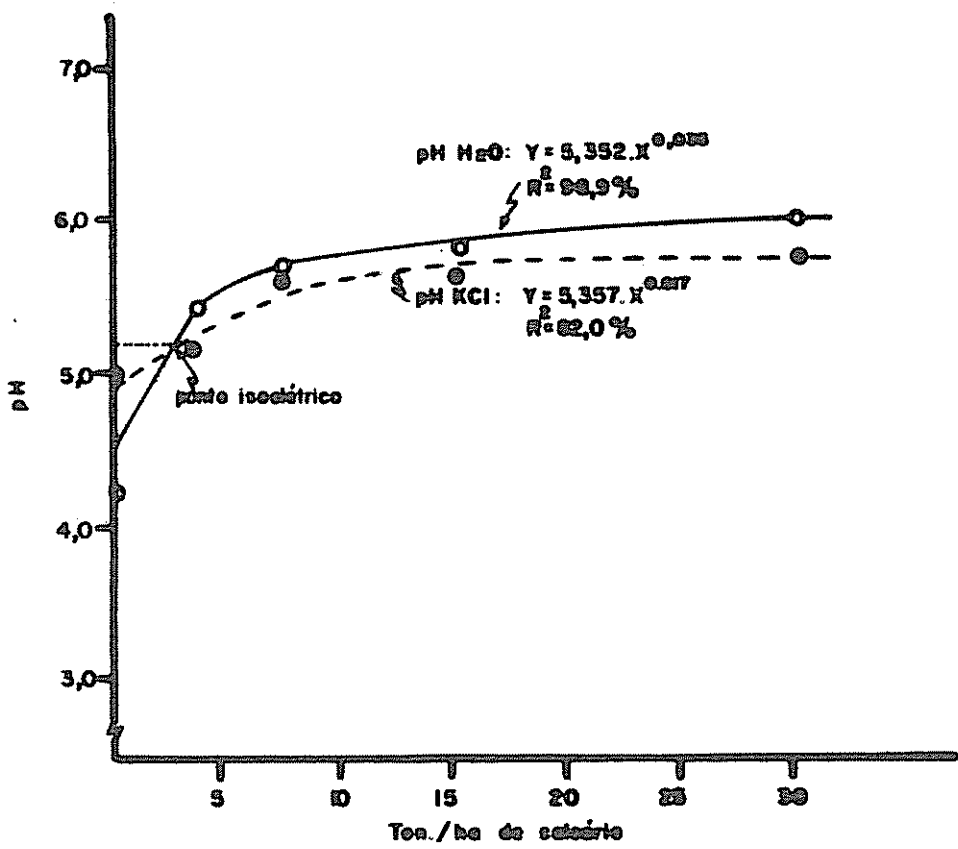


Fig.1 influência da calagem no pH em H₂O e em KCl, do solo, na profundidade de 20-40 cm

outro lado, a diferença de pH em KCl e KSO_4 em solos vulcânicos de Oregon, dá uma forte evidência de troca de OH^- por Cl^- ou SO_4^{--} , sendo maior para o SO_4^{--} que apresenta maior poder de deslocamento (19).

O fato de a alofana apresentar carga positiva deve-se ao seu alto ponto isoelétrico que se situa em torno de 6,0, segundo Besoain (5). Assim abaixo deste pH existe uma predominância de cargas positivas e acima, negativas. A gibbsita por sua vez apresenta um pH isoelétrico de 4,8 (68). De acordo com a composição mineralógica, o fenômeno discutido deve ser notório neste solo. Considerando ainda a presença de matéria orgânica, pode-se pensar que o ponto isoelétrico do sistema coloidal desse solo deve ser menor que 6,0. Segundo Aomine e Kazuhiko (3), em andossóis o sistema coloidal deve apresentar uma carga negativa no horizonte A, mas positiva no horizonte C, onde a influência da matéria orgânica é menor; sendo que no horizonte B deve existir uma carga de transição. No caso presente verifica-se que após a calagem o pH em H_2O passa a ser maior que em KCl. A explicação deve residir no fato de a calagem elevar o pH acima do ponto isoelétrico dos coloides amorfos onde os grupos $-\text{AlOH}$ e $-\text{FeOH}$ são neutralizados, ocasionando aumento de cargas negativas.

Considerando o acima exposto a Figura 1 nos daria uma maneira de calcular o ponto isoelétrico do solo, que corresponde ao pH 5,2. Maiores investigações seriam necessárias para determinar a relação entre cargas nesse solo de acordo com o método proposto por Schofield (64).

O efeito do calcário na acidez de troca está representado na

Figura 2 (e Quadro 5 do Apêndice). Conforme se observa na figura o valor $Al^{+++} + H^+$ diminui com o aumento nas doses de calcário, o que pode ser representado pela seguinte equação:

$$Y = 4,02 - 0,419X - 0,012X^2, R^2 = 0,815$$

onde:

Y = acidez de troca

X = níveis de calcário.

Nota-se que o calcário na dose de 7 ton/ha praticamente elimina o Al^{+++} trocável, ou seja neutraliza um teor original de 4,2 meq/100 g de solo. Verifica-se que a diminuição do H^+ com as doses de calcário não é tão brusca como a diminuição do teor de Al^{+++} , o que parece ser devido a que êste se hidroliza lentamente a $Al(OH)^{+2}$, $Al(OH)_2^+$ e $Al(OH)_3$, conforme muda o pH do solo devido à calagem.

No Quadro 1 do Apêndice estão os dados de determinação da acidez de troca com $BaCl_2 \cdot 2H_2O$ e trietanolamina, pH 8,1, onde se nota que a calagem foi pouco eficiente em controlar a acidez assim determinada, ainda que haja um decréscimo notório desta propriedade com os diversos níveis de calcário empregados.

A acidez pH-dependente foi definida como a diferença entre a acidez determinada com $BaCl_2 \cdot 2H_2O$ -TEA, pH 8,1 e a acidez de troca determinada com KCl 1N. Os dados do Quadro 1 do Apêndice mostram que esta propriedade diminui com a calagem ao mesmo tempo em que evidenciam um aumento com o teor de carbono orgânico, o que pode ser melhor visualizado no Quadro 20 do Apêndice. Êstes resultados estão de acôrdo os encontrados por outros autores (43, 53).

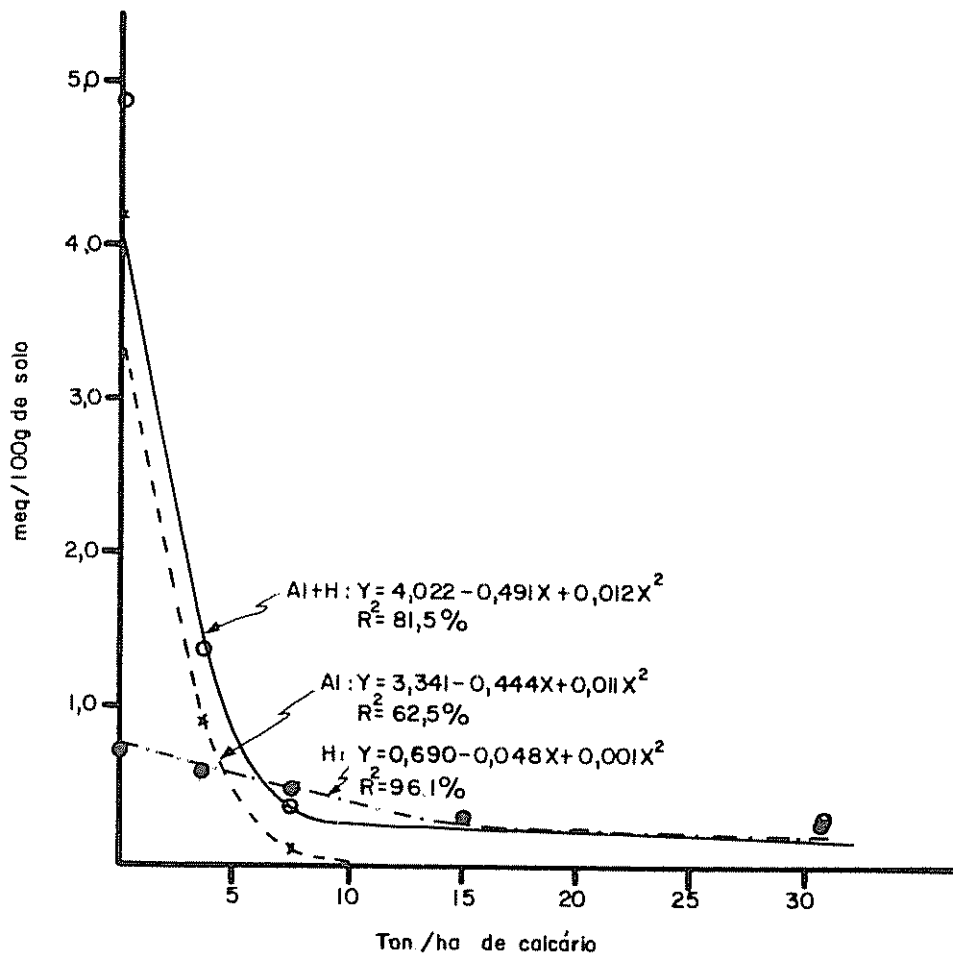


Fig.2. Influência do calcário na acidez de troca determinada com KCl IN.

4.2.2. Curvas de neutralização

O poder tampão do presente solo pode ser observado na Figura 3. Foram efetuadas curvas de titulação para as distintas profundidades. Estas curvas revelam uma grande capacidade tamponizadora do solo, principalmente na capa superficial de 0-20 cm. Isto se deve em grande parte à matéria orgânica associada a um alto conteúdo de alofana. Londono (36), titulando ácidos húmicos de solos colombianos, na presença a ausência de Al, indicou a influência do Al na capacidade tamponizadora destes ácidos, de maneira similar ao seu efeito nos solos naturais. Encontrou também que curvas de titulação de ácidos húmicos saturados com H, revelam um aumento progressivo nas cargas com o aumento do pH, devido à ionização de ácidos fracos.

Conforme se observa na figura mencionada, à medida em que aumenta a profundidade, diminui o poder tamponizador dos solos, em associação com a decréscimo do teor de matéria orgânica. Na maioria dos horizontes observa-se uma mudança inicial rápida entre pH 4,0 e 5,0, o que deve ser atribuída à neutralização de H^+ , enquanto que a mudança de pH acima de 5 é bastante pequena em função das doses de base adicionadas. O alto poder tamponizador encontrado, é característico para solos derivados de cinzas vulcânicas.

4.2.3. Capacidade de troca de cations e saturação de bases

4.2.3.1. CTC com acetato de amônio 1N, pH 7,0

Para verificar a influência do calcário sobre a CTC, foram utilizadas as amostras de 20-40 cm, na qual a influência do calcário foi

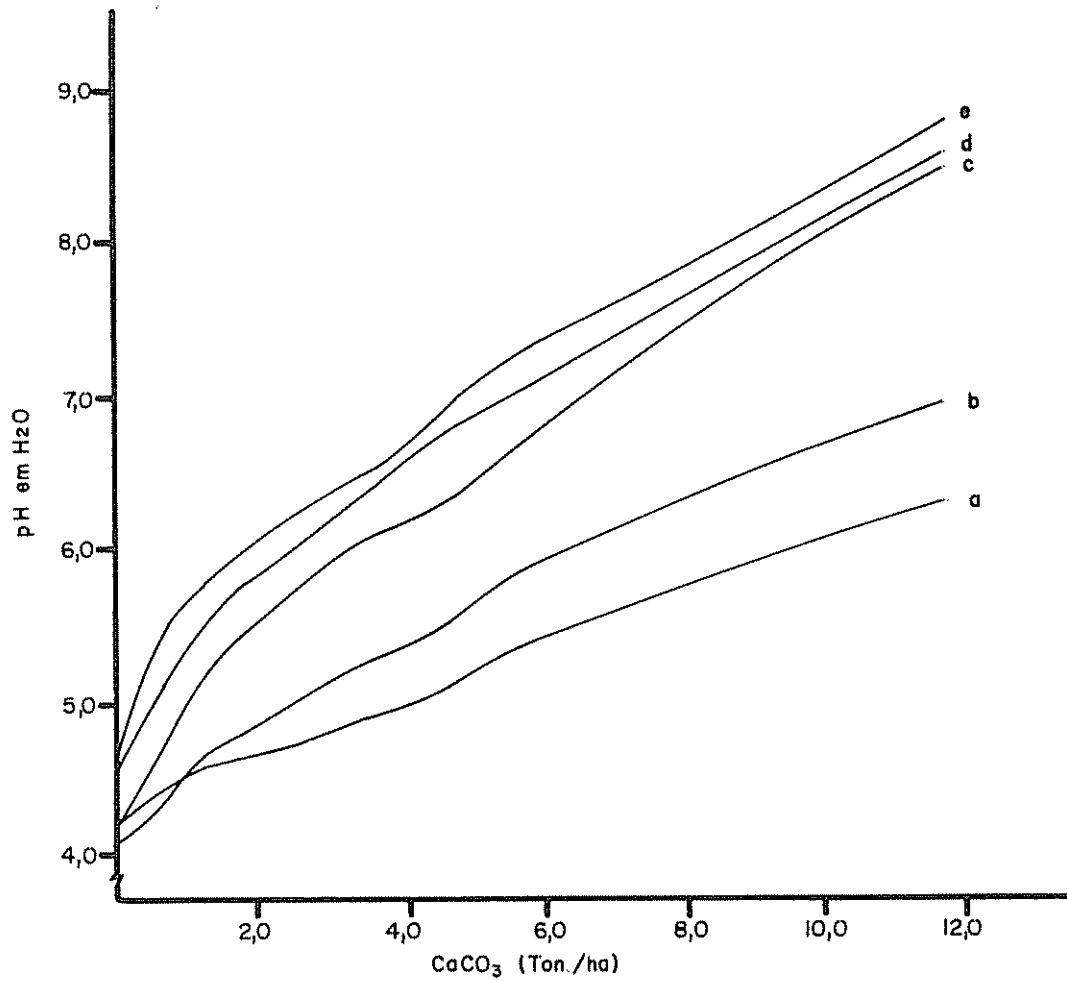


Fig. 3 Curvas de titulação de amostras coletadas a várias profundidades (em parcelas testemunhas): a) 0-20cm, b) 20-40 cm, c) 40-60cm, d) 60-80cm, e) 80-100 cm

maior, visto ser aplicado na capa superior à mesma.

No Quadro 4, estão os resultados de análise, onde pode-se ver que a influência da calagem na CTC com NH_4OAc , 1N pH 7 não se faz notar. As análises de variância indicam que não houve diferença significativa, conforme mostra o Quadro 10 do Apêndice. Isto se deve ao fato de a CTC ser medida a um pH constante de 7,0. Os valores obtidos são bastante altos devendo-se, em parte, à retenção dos sais de NH_4OAc no complexo de troca quando se trata de presença de materiais amorfos conforme indica Rich (58). Bhumbra e Mclean (6), encontraram também que a calagem não produziu aumento na CTC medida com NH_4OAc 1N, para solos do Ohio.

Em vista do alto teor de C orgânico, procurou-se correlacionar este com a CTC- NH_4OAc . A análise estatística indicou correlação significativa, onde se comprova um aumento da CTC à medida em que aumenta o teor de carbono orgânico, sendo a regressão dada pela equação:

$$Y = 28,010 + 2,387X, \quad r = 0,857$$

onde:

$$Y = \text{CTC-}\text{NH}_4\text{OAc}$$

$$X = \text{teor de C \%}$$

4.2.3.2. CTC determinada com KCl 1N

A determinação da CTC-KCl tem sido usada por vários autores (6, 15, 44). Quando se utilizou este método, efetuou-se um teste preliminar de lavagem de excesso de sais depois da saturação do solo com KCl 1N. Para isso o solo saturado foi submetido a três processos diferentes de lavagem com água e etanol. Os resultados encontram-se no Quadro 5.

Quadro 4. Influência da calagem na CTC, bases trocáveis e acidez de troca em amostras coletadas à profundidade de 20-40 cm de profundidade. (Médias de 5 repetições).

Calcário ton/ha	Ca + Mg + K	CTC- -KCl	CTC- NH ₄ OAc	CTC-pH- dependente (pH 7,0)	% sat. (KCl)	% sat. (NH ₄ OAc)	Acidez de troca BaCl ₂ -TEA (pH 8,1)	Acidez pH-depen- dente
0,00	0,792	7,377	58,277	50,900	10,736	1,359	58,489	53,599
3,78	10,098	11,881	63,362	51,481	84,988	15,937	58,843	57,513
7,56	14,507	15,640	61,704	46,064	92,765	23,511	50,473	50,085
15,12	16,550	20,086	63,898	43,812	82,396	25,901	52,690	52,391
30,24	17,270	22,876	57,219	34,343	75,496	30,182	44,530	43,894

Quadro 5. Determinação da CTC-KCl LN: Testes com três maneiras de lavar e excesso de sais.
(Médias de 2 repetições).

Ton/ha de cal- cário	3 lavados com 33 ml de álcool etílico 95%	1 lavado com 33 ml H ₂ O e 3 com 33 ml de álcool etílico 95%	2 lavados com 33 ml de H ₂ O e 3 com 33 ml de álcool etílico 95%	Ca+Mg + K	acidez de troca (Al-H)	Ca+Mg +K+Al + H
----- (meq/100 g) -----						
0,00	63,956	15,074	7,080	0,176	4,450	5,166
3,78	74,045	15,493	8,721	4,909	3,326	8,235
7,56	74,399	17,801	13,338	10,407	0,425	10,832
15,12	76,405	23,905	17,955	16,001	0,144	16,145
30,24	77,820	28,674	23,029	17,433	0,144	17,577

Verifica-se que três lavados com etanol resultam em um valor bastante alto da CTC-KCl, indicando que o excesso de sais não é eficientemente removido. Incluindo lavados com água, grande parte dos sais de excesso são eliminados sendo maior no caso de dois lavados com água.

Rich (58), observou que a determinação da CTC pode ser grandemente afetada pelo solvente usado na lavagem do excesso de sal, principalmente em solos com colóides amorfos. A remoção do excesso de sal dependerá da solubilidade do mesmo no solvente utilizado na lavagem, das afinidades entre cations e anions retidos e da difusão de íons dentro da estrutura amorfa. Thomas (67), por outro lado, encontrou grandes diferenças na CTC da haloisita de acordo com o solvente usado para lavar o excesso de sais. Observou que a grande facilidade da água para penetrar entre as camadas da haloisita hidratada, era responsável pela fácil remoção do KCl usado como solução saturadora, redundando em valores mais baixos para a CTC, em comparação com etanol e metanol.

No presente caso conclui-se que dois lavados com água seguidos de três com etanol 95%, oferecem resultados mais reais quando comparados com a soma de cations deslocados. Adotou-se então este procedimento para determinações posteriores.

No Quadro 4, se indica a CTC medida com KCl, em função das doses crescentes de calcário. Observa-se neste caso um aumento significativo na CTC-KCl com o aumento das doses de calcário, o que pode ser representado pela seguinte equação:

$$Y = 7,565 + 1,183X - 0,025X^2, R^2 = 0,999$$

onde;

$$Y = \text{CTC-KCl}$$

$$X = \text{níveis de calcário}$$

Resultados semelhantes têm sido encontrados por outros autores (6, 42, 43). Segundo McLean e colaboradores (43), os Al(OH)_n^{3-n} e Fe(OH)_n^{3-n} presentes em solos ácidos podem bloquear cargas negativas das argilas estando adsorvidos na superfície das mesmas. Com a calagem parte destas cargas são liberadas pela substituição de hidróxidos de Al e Fe por Ca. Assim, no presente caso, o aumento da CTC-KCl parece ser devido a um aumento de cargas negativas proporcionado por elevação do pH com a aplicação de calcário. Por outro lado, McLean e Owen (42), indicam que cargas negativas da matéria orgânica, previamente inativadas por Al, são liberadas pela calagem, ocasionando um aumento na CTC-KCl.

4.2.3.3. CTC pH-dependen (pH 7,0)

Na Figura 4 são apresentadas as variações da CTC pH-dependente e CTC-KCl com a calagem. Observa-se que a CTC-KCl aumenta com a calagem, enquanto que a CTC pH-dependente diminui. A CTC pH-dependente foi definida no presente trabalho como a diferença entre a CTC medida com NH_4OA , 1N, pH 7,0 e a CTC-KCl 1N. Coleman et al. (17), chamam à soma de bases mais acidez de troca, removidas por KCl 1N, de CTC pH-permanente. Entretanto McLean (43) indica que a soma de bases removidas com sal neutro pode não ser igual às cargas derivadas de

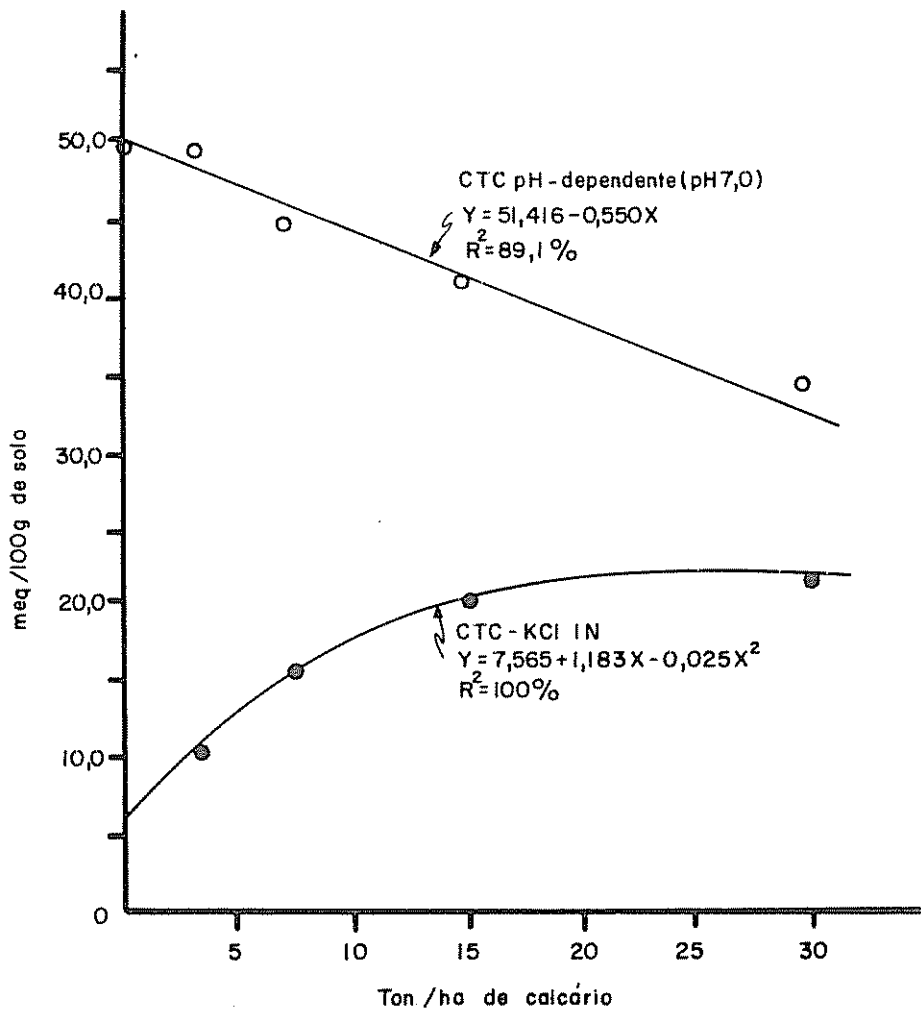


Fig. 4 Influência da calagem na CTC-KCl IN e na CTCpH-dependente (CTC-NH₄OAc, pH7,0 - CTC-KCl)

substituição isomórfica. Outros autores têm também evidenciado o decréscimo da CTC pH-dependente devido à calagem (43,44). Pratt (53), encontrou que a acidez de troca mais a CTC pH-dependente, correspondia ao ponto de equivalência obtido pela neutralização do solo com CaCO_3 . Correlacionado-se a CTC pH-dependente com as doses de calcário aplicadas, obteve-se a seguinte equação:

$$Y = 51,416 - 0,550X \quad R^2 = 89,0\%$$

onde:

Y = CTC pH-dependente

X = doses de calcário

Em vista da influência que tem a matéria orgânica e a calagem na CTC pH-dependente, procurou-se estabelecer uma regressão múltipla para determinar a magnitude do efeito dêsse dois fatores, obtendo-se a seguinte equação:

$$Y = 18,706 - 0,489X_1 + 2,262 X_2 + 0,010X_1^2 + 0,014X_2^2 - 0,029X_1X_2$$

onde:

$$R^2 = 79,8\%$$

Y = CTC pH-dependente

X_1 = doses de calcário

X_2 = C %

Esta equação indica que a CTC pH-dependente aumenta consideravelmente com o teor de C orgânico (taxa de aumento de 2,262) e diminui com a calagem (taxa de decréscimo de -0,489).

4.2.4. Saturação de bases

O efeito da calagem na soma de bases está representado na Figura 5. Conforme se pode observar, as quantidades de Ca, Mg e K, juntas, aumentam com as doses de calcário, em detrimento da acidez de troca. Aproximadamente à uma quantidade de 7,5 ton/ha de calcário a acidez de troca ($Al^{+++} + H^+$), deixa de ser significativa, tornando-se o complexo de troca praticamente saturado com bases.

As percentagens de saturação de bases calculadas em função da CTC-KCl 1N e CTC-NH₄OAc 1N, pH-7,0, estão indicadas no Quadro 4 e Figura 6. Considerando-se a percentagem de saturação de bases calculada em função da CTC-KCl, verifica-se um aumento com as doses de calcário chegando a um valor máximo (92,76%), com 7,5 ton/ha, passando a decrescer com doses superiores. Isto poderia ser explicado admitindo-se que doses muito elevadas de calcário promovam a liberação de cargas antes bloqueadas por polímeros de Al, e a liberação de grupos ácidos orgânicos antes bloqueados por Al.

Quanto à percentagem de saturação de bases calculada em função da CTC-NH₄OAc, 1N, pH 7,0, nota-se que aumenta de 1,36% para 30,18%. Isto indica que apesar de se aplicar 36 ton/ha de calcário a completa saturação não foi possível. Essa observação não concorda com o discutido anteriormente em que 7,5 ton/ha de calcário foi suficiente para a saturação de bases. Entretanto essa disparidade deve-se aos valores muito altos da CTC-NH₄OAc, pH 7,0, que faz manifestar a CTC pH-dependente a pHs elevados, enquanto que a CTC-KCl foi medida a um pH máximo de 6,0 (em média), ou seja ao pH do solo.

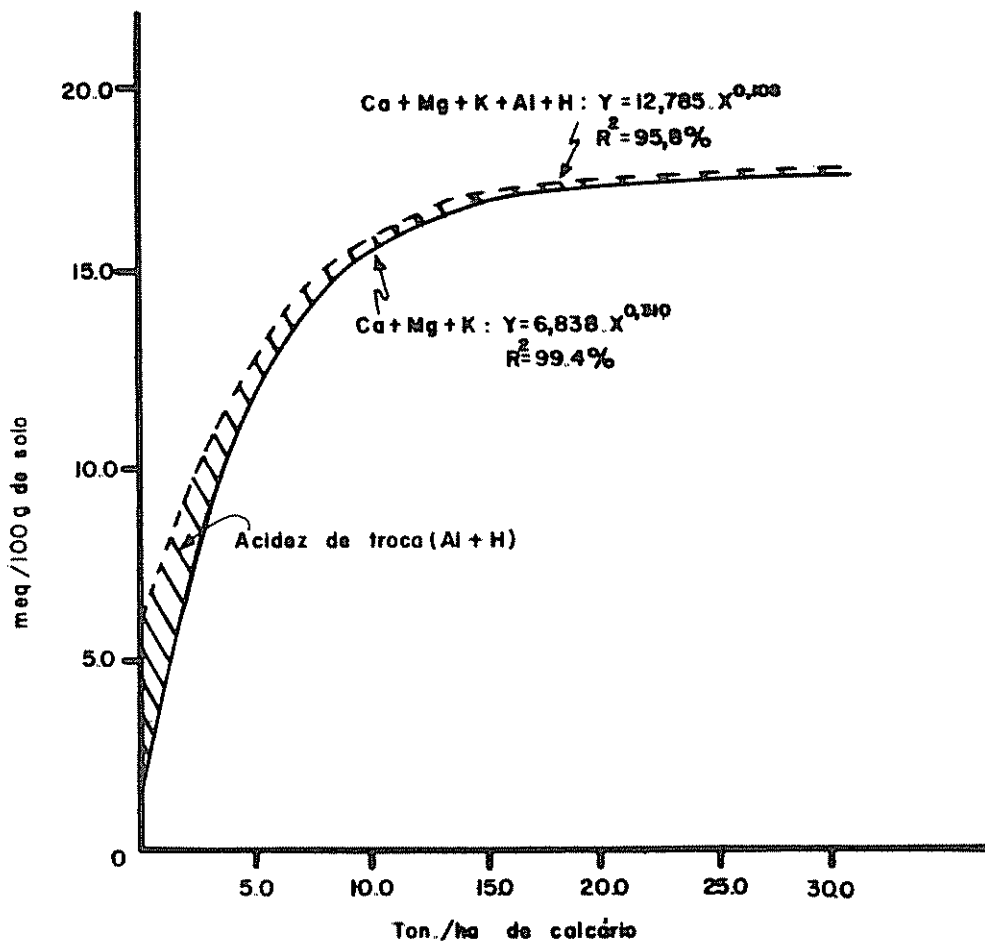
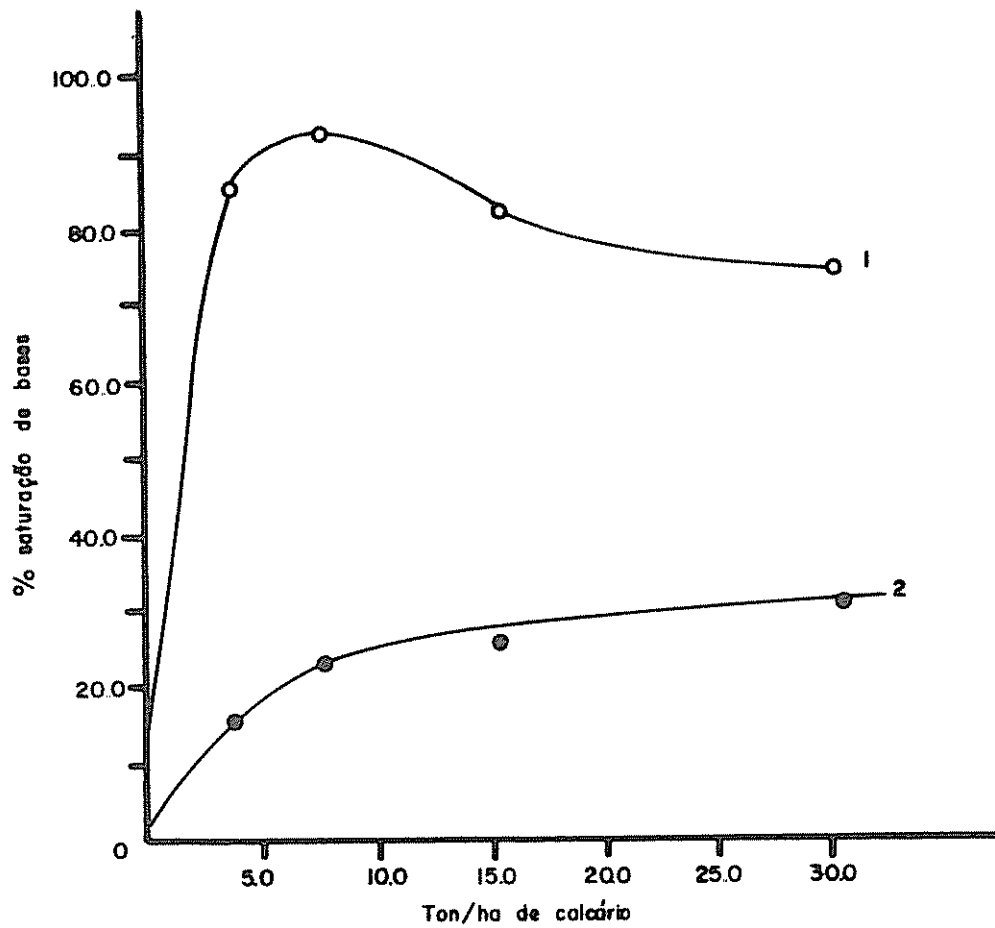


Fig.5 Influência da calagem na soma de cátions trocáveis



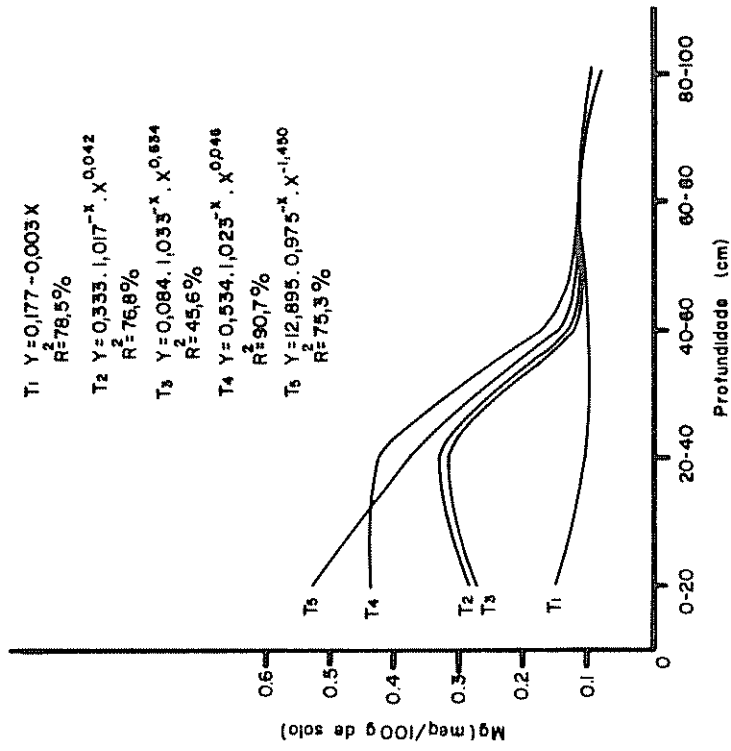
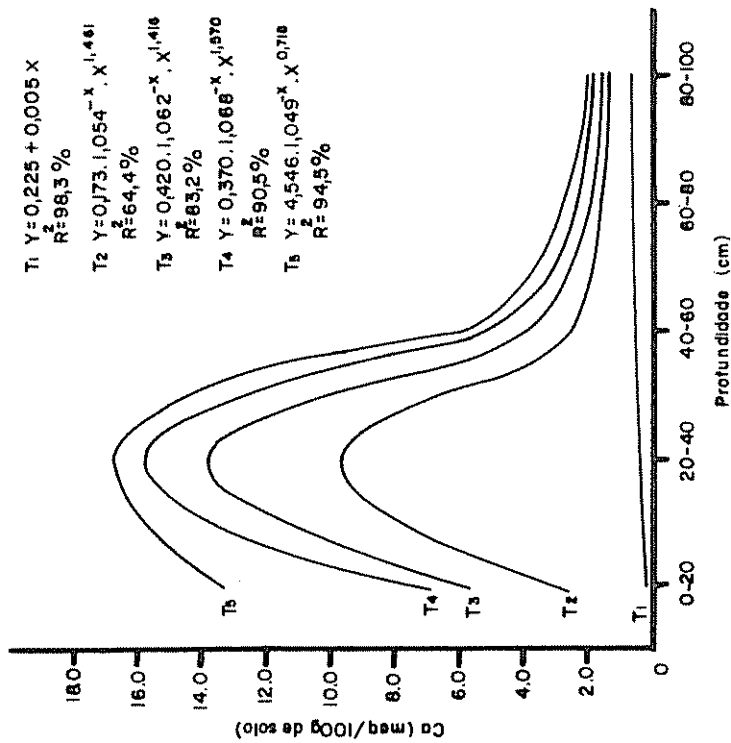
1 : % sat. calculada em função da CTC-KCl IN
 2 : % sat. calculada em função da CTC-NH₄ OAc IN, pH 7.0

Fig. 6 Influência da calagem na percentagem de saturação de bases

4.3. Influência da calagem no movimento do Ca e Mg no solo

4.3.1. Movimento vertical do cálcio

Os resultados obtidos para a distribuição do cálcio no perfil mostram que houve uma lixiviação pronunciada de cálcio, evidenciada por um aumento da concentração deste elemento na profundidade de 80-100 cm, como se pode ver no Quadro 15 do Apêndice. A análise, de variância (Quadro 13 do Apêndice), indica diferença significativa para profundidade e tratamento. Na Figura 7 apresenta-se o movimento do cálcio através do perfil, percebendo-se que mesmo para menor dose de calcário aplicado (3,78 ton/ha), houve aumento no teor de cálcio até a profundidade de 80-100 cm. O maior teor de cálcio observado na profundidade de 20-40 cm, deve-se ao fato de o calcário ser aplicado em sulcos de 20 cm de profundidade. Para o tratamento sem calcário, observa-se que foi significativa a regressão linear, com uma taxa de incremento do teor de cálcio com a profundidade (em cm) de 0,005, bastante pequena. Logo o solo apresenta um aumento no teor de cálcio com a profundidade evidenciando uma alta lixiviação. Para os demais tratamentos, o teor de cálcio no perfil está representado por uma curva à qual se ajusta uma equação do tipo $Y = b_0 \cdot b_1^{-X} \cdot X^{b_2}$ (descrita em material e métodos), como se pode ver na Figura 7. O fato do aumento do teor de cálcio no perfil não ser diretamente proporcional às doses de calcário empregadas, é devido a existir ainda calcário não dissolvido no fundo do sulco, principalmente para tratamentos com altas doses.



Figs. 7 e 8. Movimento do Ca e Mg através do perfil do solo, com vários níveis de calcário aplicados: $T_1 = 0.00$ Ton./ha, $T_2 = 3.78$ Ton./ha, $T_3 = 7.56$ Ton./ha, $T_4 = 15.12$ Ton./ha, $T_5 = 30$ Ton./ha

Vários autores tem estudado a perda de cálcio por lixiviação (13, 26, 50). Enquanto Brown (13), verificou que após 23 anos de calagem, havia uma mudança no pH do solo até a profundidade de 75 cm, Fox (26), encontrou para solos derivados de cinzas vulcânicas, uma mudança no pH do solo até a profundidade de 120 cm, 5 anos após a aplicação, o que sem dúvida deve ser explicado pela lixiviação de cálcio até esta profundidade.

A alta precipitação média anual de 3 800 mm, associada à permeabilidade do solo e a pouca força de retenção de cations apresentada pela alofana, são os fatores que devem ter contribuído mais para a perda considerável de cálcio.

4.3.2. Movimento vertical do Mg

Pelo Quadro 15 do Apêndice, observa-se que as amostras das parcelas que não receberam calcário, apresentam um maior teor de Mg na capa superficial (0-20 cm), sendo que para as demais profundidades o teor deste elemento é menor e mais ou menos constante. Entretanto, para os tratamentos com calcário, observa-se um maior teor de Mg em relação à testemunha, até a profundidade de 60 cm, o que indica um movimento do Mg até esta profundidade, após a calagem. A tendência seguida pelo teor do Mg no perfil do solo, foi interpretada estatisticamente pela mesma função usada na análise do movimento do Ca, como se pode ver na Figura 8.

4.3.3. Movimento lateral do Ca

A distribuição lateral do Ca à diferentes profundidades está apresentada nos Quadros 16 e 17 do Apêndice. A análise de variância, (Quadro 12 do Apêndice), mostrou que houve diferença significativa no teor de Ca de amostras coletadas à diferentes distâncias do sulco de aplicação. Observa-se no Quadro 16 que a 20 cm de distância do sulco de aplicação há uma maior concentração de Ca, sendo insignificante à distâncias maiores. Já na profundidade de 20 a 40 cm o efeito do Ca não se fez notar mesmo na distância lateral de 20 cm. Quando aumentou a profundidade, a concentração de Ca encontrado nas distâncias laterais de 20 a 40 cm do sulco de aplicação, sofreu um aumento marcante, o qual indica um movimento lateral em profundidade. Esse movimento se faz notar também até a profundidade de 60-80 cm para distância lateral de 20 a 60 cm. Segundo Fried e Broeshat (28), o movimento de cations, por difusão num sistema poroso como o solo ocorre em distância muito curta. Spiegler e Coryell (66), trabalhando com resinas de troca, encontraram que o coeficiente de difusão (D) do cálcio era de $3 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{seg}$, o que representa um movimento de 9,33 cm por ano. Embora as condições do solo sejam diferentes, o dado serve para dar uma idéia comparativa. Pode-se indicar que grande parte do movimento do Ca neste caso se deve ao fluxo de massa, conhecido também como difusão hidrodinâmica. Os dados de pH apresentados no Quadro 17 do Apêndice, comprovam também que houve certo movimento lateral em profundidade seguindo as mesmas tendências da concentração do Ca. Nota-se um leve aumento de pH, nas duas últimas capas até uma distância

lateral de 60 cm, que é mais alto que o pH da testemunha. Com exceção do ponto de aplicação, as capas inferiores a 60 cm não foram afetadas lateralmente, de maneira notória.

4.4. Influência da calagem na produção da cana-de-açúcar

Os dados apresentados neste capítulo foram obtidos por Fassbender*. Correspondem a duas colheitas de cana obtidas no período quatro anos. As análises estatísticas não mostram diferenças significativas para as doses de calcário em qualquer das colheitas (Quadros 18 e 19 do apêndice). Houve, entretanto, diferença significativa entre as duas colheitas, sendo menor a produção no segundo ano.

Na Figura 9, observa-se o aumento da produção em função das doses de calcário. A análise de regressão obtida resume-se nas seguintes equações:

$$1^{\text{a}} \text{ colheita: } Y = 14\,093,00 + 243,49X - 6,432X^2, R^2 = 60\%$$

$$2^{\text{a}} \text{ colheita: } Y = 8\,520,90 + 45,27X, \quad r = 63\%$$

1^a e 2^a colheitas conjuntamente:

$$Y = 11\,380,40 + 122,36X - 2,507X^2 \quad R^2 = 65\%$$

De acordo com as equações de regressão, a curva de resposta foi quadrática no primeiro ano, sendo linear no segundo. Na avaliação conjunta das duas colheitas vemos que a dose que maximizou a produção foi de 24,4 ton/ha de calcário. A falta de resposta significativa à

* Fassbender, H. W. Turrialba, IICA, 1970. Dados não publicados.

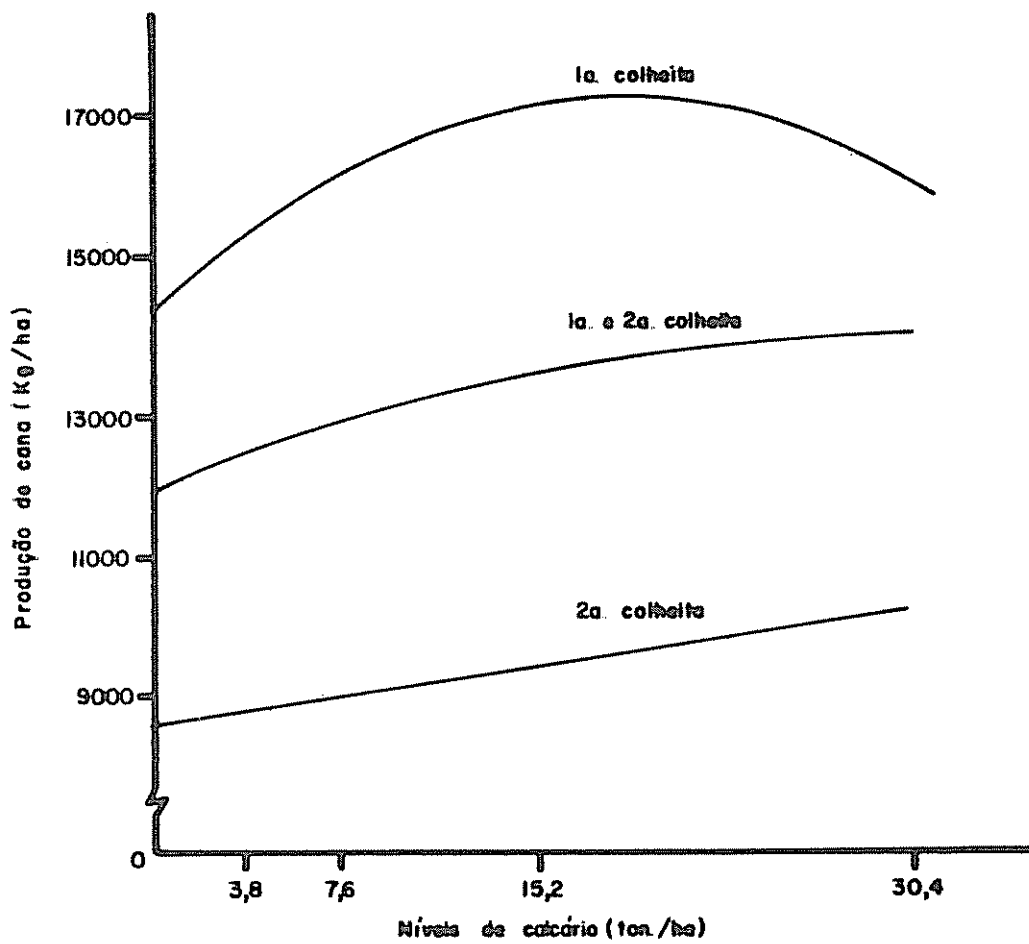


Fig.9 Influência da calagem na produção de cana de açúcar

aplicação de calcário, poderia ser explicada em função do método localizado de aplicação, o qual não permitiu o máximo aproveitamento de calcário pela planta. Isso explica também a curva quadrática de resposta, na primeira colheita, com o máximo de produção ao redor de 15 ton/ha. Já no segundo ano o movimento de calcário dissolvido permitiu uma resposta linear.

Os dados obtidos indicam que a aplicação de calcário no sulco, antes do plantio, não parece render o benefício máximo que se pode esperar de uma aplicação a lanço em, toda área, com a qual poderia esperar-se maiores efeitos das doses crescentes aplicadas.

5. CONCLUSÕES

Os resultados do presente estudo permitem chegar às seguintes conclusões, sôbre os efeitos da calagem a longo prazo:

1. A aplicação de doses crescentes de calcário afetou as propriedades de troca do complexo coloidal do andosol, quatro anos após a aplicação. Eliminou a acidez trocável, aumentou o pH e a porcentagem de saturação de bases através do perfil.
2. O calcário teve efeito marcante sôbre a capacidade de troca. A CTC determinada com KCl 1N, solução não tamponizada, dá uma melhor indicação do efeito da calagem que a CTC determinada com NH_4OAc , 1N, pH 7,0. A CTC dependente do pH diminui com as doses de calcário e aumenta com o conteúdo de carbono orgânico.
3. O movimento vertical do Ca e do Mg no perfil, quatro anos após a aplicação, foi bastante pronunciado. Um movimento lateral foi observado para camadas mais profundas. Grandes quantidades de bases podem ser perdas por lixiviação, nas condições estudadas.
4. O calcário aplicado no sulco, como no presente caso, não propicia um benefício máximo na produção de cana-de-açúcar, pela excessiva concentração no local de aplicação, para doses elevadas, causando um desbalance nutricional.

6. RESUMO

Foi estudado o efeito do calcário na acidez do solo, lixiviação de Ca e Mg, e propriedades de troca de um andosol da Série Birrisito (Oxic Distrandept), de Costa Rica. Utilizou-se experimento iniciado há quatro anos onde foram aplicadas várias doses de calcário em sulcos, na cultura da cana-de-açúcar, coletando-se amostras de solo à várias profundidades.

A aplicação de calcário provocou um decréscimo a acidez de troca e aumentou o pH até a profundidade de 100 cm. Houve aumento na capacidade de troca de cátions determinada com KCl 1N, entretando não houve influência nesta propriedade quando determinada com NH_4OAc , 1N, pH 7,0. A capacidade de troca de cátions dependente do pH e a acidez determinada com $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ -TEA-pH 8,1, decresceram com a aplicação de calcário, o mesmo acontecendo com a acidez pH-dependente. Houve uma acentuada perda de Ca e Mg por lixiviação, constatada pelo aumento dos teores destes dois elementos até a profundidade de 100 cm. Não houve, entanto, influência da calagem na produção da cana-de-açúcar, detectada estatisticamente, atribuindo-se esta falta de resposta à aplicação localizada do calcário.

Conclui-se que o efeito do calcário na capacidade de troca de cations pode ser melhor analisado determinando-se esta propriedade com sais não tamponizados, e determinando-se também o componente dependente do pH. Por outro lado, consideráveis perdas de bases por lixiviação podem ser esperadas em andosois dos trópicos húmidos

7. SUMMARY

The effect of lime application upon acidity, pH, leaching of Ca and Mg, and the exchange properties of an Oxic Dystrandept was studied. Soils samples at different depths were collected from a sugar cane experiment at Juan Viñas, Costa Rica. Increasing rates of lime were applied in the furrow four years ago, prior to planting.

Lime application decreased salt exchangeable acidity and increased pH up to 100 cm depth. There was an increase in CEC determined by 1N KCl, although no marked effect was detected upon CEC measured with 1N NH_4OAc at pH 7.0. The pH-dependent CEC decreased with lime applications. The leaching of Ca and Mg downward the profile were pronounced under prevailing conditions indicating high loss of bases. There was also a slight lateral movement as depth increases. There was no significant effect of lime upon the yield of sugar cane. It was concluded that the effect of lime can be better assessed by measuring the CEC with an unbuffered salt solution. By other hand, considerable loss of bases can be expected from andosols of humid tropics. The application of lime in the furrow does not seem to be an adequate procedure for improving plant growth.

8. BIBLIOGRAFIA

1. ABRUÑA, F. e VICENTE, J. Refinement of a quantitative method for determining the lime requirement of soils. *Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico* 39(1):41-45. 1955.
2. ALLISON, L. E. Organic carbon. In Black, C. A., ed. *Methods of Soil Analysis*. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. v. 2, pp. 1367-1378.
3. AOMINE, S. e EGASHIRA, K. Flocculation of allophanic clays by electrolytes. *Soil Science and Plant Nutrition* 14(3):94-98. 1968.
4. BESOAIN, E. M. Mineralogía de las arcillas de los suelos de cenizas volcánicas. In *Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina*. Turrialba, 1969. Turrialba, IICA, 1969. pp. B.1.1-B.1.17.
5. _____. *Curso de mineralogía de suelos*. Turrialba, IICA, 1971. p. irr. (Mimeografiado).
6. BHUMBLA, D. R. e McLEAN, E. O. Aluminum in soils: VI. Changes in pH-dependent acidity, cation exchange capacity and extractable aluminum with additions of lime to acid surface soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 29(4): 370-374. 1965.
7. BIRRELL, K. S. e GRANDWELL, M. Ion-exchange phenomena in some soils containing amorphous mineral constituents. *Journal of Soil Science* 7(1):130-143. 1956.
8. BLACK, C. A. *Soil-plant relationships*. 2a. ed. New York, John Wiley, 1968. 792 p.
9. _____. *Methods of soil analysis*. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. v. 2, pp. 771-1572.
10. BOWER, C. A., REITMEIER, R. F. e FIRMAN, M. Exchangeable cations analysis of saline and alkaline soil. *Soil Science* 73(4):251-261. 1952.
11. BORNEMISZA, E., LAROCHE, F. e FASSBENDER, H. W. Effects of liming on some chemical characteristics of a Costa Rican latosol. *Soil and Crop Science Society of Florida* 27:219-226. 1967.

12. BRADFIELD, R. The nature of the acidity of the colloidal of acid soils. *Journal of the American Chemical Society* 45: 2669-2678. 1923.
13. BROWN, et al. Soil reactions at various depths as influenced by time since application and amounts of limestone. *Soil Science Society of America Proceedings* 20(4):518-522. 1956.
14. CLARK, J. S. Aluminum and iron fixation in relation to exchangeable hydrogen in soils. *Soil Science* 98:302-306. 1964.
15. COLEMAN, N. T. Decomposition of clays and the fate of aluminum. II. *Economic Geology* 57:1207-1218. 1962.
16. _____ e THOMAS, G. W. The basic chemistry of soil acidity. In Pearson, R. W. e Adams, F., eds. *Soil acidity and liming*. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1967. pp. 1-34.
17. _____, WEED, S. B. e MacCRACKEN, R. J. Cation exchange capacity and exchangeable cations in Piedmont Soils of North Carolina. *Soil Science Society of America Proceedings* 23:146-149.
18. COLMET-DAAGE, F. et al. Naturaleza de la fracción arcillosa de algunos suelos derivados de cenizas volcánicas de las Antillas, El Ecuador y Nicaragua. In Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina, Turrialba, 1969. Turrialba, IICA, 1969. pp. B.2.1-B.2.12.
19. CHAO, T. T., HARVARD, M. E. e FANG, S. C. Exchange reactions between hydroxyl and sulfate ions in soils. *Soil Science* 99(2):1965.
20. DAY, P. R. Particle fractionation and particle size analyses. In Black, C. A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. v. 1, pp. 545-567.
21. DE VILLERS, J. M. e JACKSON, M. L. Cation exchange capacity variations with pH in soil clays. *Soil Science Society of America Proceedings* 31(4):473-476. 1967.
22. DIAZ-ROMEU, R. e BALERDI, F. Determinación de la capacidad de intercambio de cationes del suelo. Turrialba, IICA. s.p. (Mimeografiado).

23. DONDOLI, B. C. e TORRES, M. J. Estudio geocagronómico de la región oriental de la Meseta Central. San José, Costa Rica, Ministerio de Agricultura e Industrias, 1954. 180 p.
24. FASSBENDER, H. W. Efecto del encalado en la mejor utilización de fertilizantes en andosol de Costa Rica. *Fitotecnia Latinoamericana* 6(1):115-124. 1969.
25. _____ y MOLINA, R. Influencia de enmiendas calcáreas y silicatadas sobre el efecto de fertilizantes fosfatados en suelos derivados de cenizas volcánicas de Costa Rica. *In Panel sobre Suelos de Cenizas Volcánicas de América Latina*. Turrialba, 1969. Turrialba, IICA, 1969. pp. C.2.1.-C.2.12.
26. FOX, R. L. La fertilización de los suelos de cenizas volcánicas de Hawaii. *In Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina*. Turrialba, 1969. Turrialba, IICA, 1969. pp. C.6.1-C.6.14.
27. _____ e PLUCKNETT, D. L. Overliming hawaiian soils creates problems. *Hawaii Farm Science* 13(3):9-10. 1964.
28. FRIED, M. e BROESHART, H. *The soil-plant system*. New York, Academic Press, 1967. 359 p.
29. HELLING, C. S., CHESTERS, G. e COREY, R. B. Contributions of organic matter and clay to soil cation exchange capacity as affected by the pH of saturation solution. *Soil Science Society of America Proceedings* 28:517-520. 1964.
30. HORTENSTINE, C. C. e OZAKI, H. Y. The effects of liming on the availability of Fe and Mn on soil Ca and pH on a Davie Fine Sand Soil. *Soil and Crop Science of Florida Proceedings* 21:44-50. 1961.
31. JACKSON, M. L. Aluminum bonding in soils: a unifying principle in soil science. *Soil Science Society of America Proceedings* 27(1):1-10. 1963.
32. JENY, h. Reflections on the soil acidity merry-go-round. *Soil Science Society of America Proceedings* 25:428-432. 1961.
33. KEENEY, O. R. e COREY, R. B. Factors affecting the liming requirement of Wisconsin soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 27:277-280. 1963.
34. KNOX, E. G. e MALDONADO, F. A. Suelos de cenizas volcánicas, excursión al Volcán Izarú. *In Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina*, Turrialba, 1969. Turrialba, IICA, 1969. pp. A.8.1-A.8.12.

35. LAROCHE, F. A. Efeitos da calagem sobre o complexo de troca de um Latosolo Tropical e os seus Teores de Cations Absorvidos pelo Tomate. Tese Mag. Agr. Turrialba, IICA, 1966. 76 p. (Mimeografada).
36. LONDONO, O. O. Al-organic matter complexes of the A horizont of some acid soils. Ph.D. Thesis. Riverside, University of California, 1967. 140 p.
37. MAHILUM, B. C. FOX, R. L. e SILVA. Residual effects of liming volcanic ash in humid tropics. Soil Science 109(2):102-109. 1970.
38. MARTINI, J. A. Algunas notas sobre el problema del encalado en suelos del trópico. Turrialba 18(3):249-566. 1968.
39. MATSUSAKA, Y. e SHERMAN, D. Titration curves and buffering capacities of Hawaiian soils. Hawaii Agricultural Experimental Station, Technical Bulletin 11. 1950. 36 p.
40. _____ e SHERMAN, D. Lime requirement of Hawaiian soils. Hawaiian Farm Science 13(3):5-7. 1964.
41. McLEAN, E. O. Aluminum. In Black, C. A., ed. Methods of Soil Analysis. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. pp. 978-998.
42. _____ e OWEN, E. J. Effects of pH on the contribution of organic matter and clay to soil. Soil Science Society of America Proceedings 33(6):855-858. 1969.
43. _____, REICOSKY, D. C. e LAKSHMANAN, C. Aluminum in soils. VII. Interrelationships of organic matter, liming and extractable aluminum cation exchange capacity of surface soils. Soil Science Society of America Proceedings 29(4): 374-378. 1965.
44. _____ et al. Aluminum in soil. V. Form of aluminum as a cause of soil acidity and a complication in its measurement. Soil Science 97(2):119-126. 1964.
45. MEHLICH, A. Determination of cation- and anion-exchange properties of soils. Soil Science 66:429-445. 1948.
46. _____. Base unsaturation and pH in relation to soil type. Soil Science Society of America Proceedings 6:150-156. 1941.

47. MIKKELSEN, D. S., FREITAS, L. M. M. e McCLUNG, A. L. Effects of liming fertility cotton, corn and soybeans on campo cerrado soils - State of São Paulo. São Paulo, Brasil, IRI Research Institute, Boletim nº 29. 1963. 34 p.
48. MULLER, L. Un aparato micro Kjeldahl simple para análisis rutinarios rápidos de materiales vegetales. Turrialba 11(1): 17-25. 1961.
49. PAVER, H. e MARSHALL, C. E. The role of aluminum in reactions of clays. Jour. Soc. Chem. Ind. 53:750-760. 1934.
50. PEARSON, R. W., ABRUÑA, F. e VICENT-CHANDLER, J. E. Effect of lime and nitrogen applications on downward movement of calcium and magnesium in two humid tropical soils of Puerto Rico. Soil Science 93(2):77-82. 1962.
51. PIONKE, H. B. e COREY, R. B. Relation between acidity aluminum and soil pH, clay and organic matter. Soil Science Society of America Proceedings 31(6):749-752. 1967.
52. PEECH, M. Liming requirement. In Black, C. A., ed. Methods of soil analysis. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. v. 2, pp. 927-932.
53. PRATT, P. F. Effect of pH on cation-exchange capacity of surface soils. Soil Science Society of America Proceedings 25(2):96-98. 1961.
54. _____ e BAIR, F. L. Comparison of the reagents for the extraction of aluminum from soils. Soil Science 91:357-359. 1961.
55. _____ e BAIR, F. L. Cation exchange properties of some acids soils of California. Hilgardia 33(13):689-705. 1962.
56. _____ et al. Chemical changes in an irrigated soil during 28 years of differential fertilization. Hilgardia 28(15): 381-420. 1959.
57. RICH, C. I. Aluminum interlayers of Vermiculite. Soil Science Society of America Proceedings 24(1):26-32. 1960.
58. _____. Removal of excess salt in cation-exchange-capacity determinations. Soil Science 93(2):87-94. 1962.
59. RIO, U. del. Reacciones de los fosfatos monocálcico, monohidratado y dicálcico dihidratado en tres suelos ácidos en condiciones de laboratorio. Tese Mag. Agr. Turrialba, IICA, 1971. 58 p. (Mimeografada).

60. RIOS, V. y MARTINI, J. A. Efecto del encalado sobre la acidez y el contenido de aluminio y hierro extraíble en nueve suelos de Panamá. *Turrialba* 18(2):139-146. 1968.
61. RIXON, A. J. y SHERMAN, F. D. Effects of heavy liming applications to volcanic-ash soils in the humid tropics. *Soil Science* 94:19-27. 1962.
62. SCHWERTMANN, U. e JACKSON, M. L. Influence of hydroxy aluminum ions on pH titration curves of hydronium-aluminum clays. *Soil Science Society of America Proceedings* 28(2):179-182. 1964.
63. SHCOFIELD, R. K. Factors influencing ionic exchange in soils. *Soils and Fertilizers* 9(4):265-266. 1946.
64. _____. Effect of pH on electric charges carried by clay particles. *Journal of Soil Science* 1(1):1-18. 1949-1950.
65. SHOEMAKER, H. E., McLEAN, E. O. e PRATT, P. F. Buffer methods for determining lime requirements of soils with appreciable amounts of extractable aluminum. *Soil Science Society of America Proceedings* 25(3):274-277. 1961.
66. SPIEGLER, K. S. e COREYL, D. C. Electromigration in cation-exchange resins III. *Journal of Physic and Chemistry* 57: 687-690. 1953.
67. THOMAS, G. W. Factors affecting the removal of salts from halosite. *Soil Science* 90(6):344-347. 1960.
68. VAN SCHUYLENBORCH, J. The electrokinetic behaviour of the sesquioxide hydrates and its bearing on the genesis of clay minerals. *International Congress of Soil Science, 4th.* Amsterdam, 1950. Hoitsema Brothers Groningen, Netherlands 1:89-92. 1950.
69. VEITCH, F. P. Comparison of methods for the estimation of soil acidity. *Journal of the American Chemical Society* 26: 637-662. 1904.
70. VETTORI, L. Determinação da necessidade de cal dos solos. *Boletim do Instituto de Química Agrícola, Brasil* 7:7-9. 1948.

71. WOODROFF, C. M. Determination of exchangeable hydrogen and lime requirement of the soil by means of glass electrode and buffer solution. Soil Science Society of America Proceedings 12:141-142. 1947.
72. WADA, K. Deuterium exchange of hydroxyl groups in allophane. Soil Science and Plant Nutrition 12(5):176-182. 1966.
73. YUAN, T. L. Determination of exchangeable hydrogen by a titration method. Soil Science 88(2):164-167. 1959.

A P Ê N D I C E

Quadro 1. Influência da calagem na acidez de troca, na profundidade de 20-40 cm. (Médias de 5 repetições).

Calcário (ton/ha) (meq/100 g)	acidez de troca (Al + H) (meq/100 g)	Al+++ (meq/100 g)	H ⁺ (meq/100 g)	acidez de troca com BaCl ₂ -TEA (pH 8,2)	acidez pH- dependente	Carbono orgânico no %
0,00	4,890	4,190	0,700	58,489	53,599	12,750
3,78	1,330	0,805	0,525	58,843	57,513	14,830
7,56	0,388	0,056	0,332	50,473	50,0,85	14,005
15,12	0,299	0,023	0,276	52,690	52,391	14,006
30,24	0,318	0,000	0,318	44,530	43,894	13,276

Quadro 2. Influência da calagem no teor de alumínio trocável.

F. V.	G.L.	S.C.	C. M.	F
Profundidade	4	61,214	15,304	5,757**
Tratam. = níveis de calcário	4	132,339	33,085	12,848**
Profundidade x tratamento	16	53,448	3,340	1,260
Êrro	100	265,030	2,650	
Total	124	512,033		

Quadro 3. Influência da calagem no teor de hidrogênio trocável.

F. V.	G.L.	S.C.	C.M.	F
Profundidade	4	4,124	1,031	15,388**
Tratam. = níveis de calcário	4	1,169	0,292	4,358**
Profundidade x tratamento	16	1,346	0,138	2,060
Êrro	100	6,737	0,067	
Total	124	14,242		

Quadro 4. Influência da calagem na acidez de troca (Al + H).

F. V.	G.L.	S.C.	C.M.	F
Profundidade	4	96,041	24,010	7,733**
Tratam. = níveis de calcário	4	154,639	38,660	12,451**
Profundidade x tratamento	16	73,737	4,608	1,484
Êrro	100	310,540	3,105	
Total	124	634,958		

Quadro 5. Influência da calagem no pH-H₂O.

F. V.	G.L.	S.C.	C.M.	F
Profundidade	4	4,953	1,238	22,509**
Tratam. = níveis de calcário	4	12,561	3,140	57,090**
Profundidade x tratamento	16	6,442	0,403	7,327**
Êrro	100	5,526	0,055	
Total	124	29,485		

Quadro 6. Influência da calagem no pH-KCl.

F. V.	G.L.	S.C.	C.M.	F
Profundidade	4	5,468	1,367	8,041**
Tratam. = níveis de calcário	4	3,822	0,955	5,618**
Profundidade x tratamento	16	2,666	0,167	0,982
Êrro	100	17,038	0,170	
Total	125	29,192		

Quadro 7. Influência da calagem na soma de bases (Ca, K e Mg), na profundidade de 20-40 cm.

F. V.	G.L.	S.C.	C. M.	F
Tratamento	4	919,428	229,857	23,701**
Êrro	20	193,970	9,698	
Total	24	1113,398		

Quadro 8. Influência da calagem na soma de cations (Ca, Mg, K, Al, H), na profundidade de 20-40 cm.

F. V.	G.L.	S.C.	C. M.	F
Tratamento	4	475,328	118,832	19,040**
Êrro	16	184,932	6,241	
Total	24	660,260		

Quadro 9. Influência da calagem na CTC-KCl, na profundidade de 20-40 cm.

F. V.	G.L.	S.C.	C. M.	F
Tratamento	4	927,674	231,918	70,556**
Êrro	20	65,958	3,287	
Total	24	993,424		

Quadro 10. Influência da calagem na CTC-NH₄OAc, na profundidade de 20-40 cm.

F. V.	G.L.	S.C.	C. M.	F
Tratamento	4	180,632	45,158	0,328
Êrro	20	2749,630	137,486	
Total	24	2930,262		

Quadro 11. Influência da calagem na CTC pH-dependente, na profundidade do 20-40 cm.

F. V.	G.L.	S.C.	C. M.	F
Tratamento	4	2885,287	721,321	6,869**
Êrro	20	2102,513	105,011	
Total	24	4987,800		

Quadro 12. Movimento lateral do Ca no solo.

F. V.	G.L.	S.C.	C. C.	F
Profundidade	4	63,192	15,798	51,126**
Distancia lateral ao sulco	4	565,767	141,441	457,737**
Prof. x Dist. Lat.	16	285,571	17,848	57,760**
Êrro	25	7,715	57,760	
Total	49	922,246		

D.M.S. = 1,145

Quadro 13. Movimento vertical do Ca no solo.

F. V.	G.L.	S.C.	C. M.	F
Profundidade	4	1588,313	397,078	118,707**
Tratamento	4	839,879	209,970	62,771**
Profundidade x tratamento	16	659,100	3,345	1,231
Erro	100	334,495		
Total	124	3421,787		

Quadro 14. Movimento vertical do Mg no solo.

F. V.	G.L.	S.C.	C.M.	F
Profundidade	4	1,086	0,271	5,314**
Tratamento	4	0,317	0,079	1,549
Profundidade x tratamento	16	0,625	0,039	0,764
Erro	100	1,507	0,051	
Total	124	3,535		

Quadro 15. Influência das doses de calcário no teor de Ca e Mg do perfil do solo.
(Médias de 5 repetições).

Profundi- dade	Ca (meq/100 g)					Mg (meq/100 g)				
	*T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
0-20 cm	0,284	2,567	5,333	6,525	13,666	0,156	0,284	0,270	0,439	0,528
20-40 "	0,325	9,385	13,751	16,588	16,588	0,106	0,337	0,350	0,421	0,276
40-60 "	0,439	2,224	3,805	5,094	5,620	0,102	0,118	0,103	0,156	0,133
60-80 "	0,524	1,681	1,825	2,271	2,671	0,110	0,107	0,103	0,112	0,101
80-100 "	0,555	1,412	1,453	1,483	1,822	0,095	0,101	0,074	0,095	0,091

* Doses de calcário, (Ton/ha): T₁ = 0,00; T₂ = 3,78; T₃ = 7,56; T₄ = 15,12; T₅ = 30,24.

Quadro 16. Movimento lateral do Ca.

DISTÂNCIA LATERAL AO SULCO DE APLICAÇÃO												
Profundi- dade da amostra	Ca (meq/100 g)											
	0 cm			20 cm			40 cm			60 cm		
	Rep. 1	Rep. 2	Testemunha	Rep. 1	Rep. 2	Testemunha	Rep. 1	Rep. 2	Testemunha	Rep. 1	Rep. 2	Testemunha
0-20 cm	13,912	13,894	0,231	1,350	1,360	0,071	0,057	0,071	0,047	0,045	0,299	0,231
20-40 "	17,320	17,558	0,201	0,289	0,277	0,067	0,083	0,067	0,177	0,157	0,235	0,201
40-60 "	6,190	6,046	0,307	0,610	0,630	0,621	0,635	0,621	0,253	0,267	0,329	0,307
60-80 "	2,637	6,549	0,356	0,800	0,844	0,506	0,528	0,506	0,334	0,320	0,356	0,356
80-100 "	1,840	1,931	0,387	0,523	0,503	0,253	0,253	0,253	0,417	0,387	0,387	0,218

Quadro 17. Influência do movimento lateral do Ca no pH do solo.

Profundidade da amostra	Distância lateral ao sulco de aplicação			
	0 cm	20 cm	40 cm	60 cm
0-20 cm	5,48	4,80	4,42	4,40
20-40 "	6,12	4,75	4,40	4,55
40-60 "	5,55	4,80	4,90	4,82
60-80 "	5,15	5,00	5,00	5,20
80-100 "	5,21	5,25	5,25	5,30

Quadro 18. Produção de açúcar em Kg/ha, segundo as doses de calcário usadas*.

CALCÁRIO (TONELADAS POR HECTARE)											
0,00		3,78		7,56		15,12		30,24			
1ª co- lheita	2ª co- lheita	1ª co- lheita	2ª co- lheita	1ª co- lheita	2ª co- lheita	1ª co- lheita	2ª co- lheita	1ª co- lheita	2ª co- lheita	1ª co- lheita	2ª co- lheita
12 765	8 380	17 703	8 207	18 904	6 085	18 101	9 200	16 989	9 645		
14 186	7 800	13 834	9 730	16 683	4 875	16 104	7 652	14 012	11 036		
10 199	4 498	14 324	8 310	16 101	9 958	12 766	8 545	15 924	11 345		
17 792	9 913	14 235	11 334	15 035	9 343	16 078	9 808	17 344	9 456		
13 390	10 424	14 726	11 262	16 187	10 610	14 541	9 776	14 147	8 728		
13 666	10 424	14 965	9 769	16 582	8 175	15 518	8 996	15 683	10 041		

* Fassbender, H. W. Turrialba, IICA, 1970. Dados não publicados.

Quadro 19. Análise de variância dos dados de produção da cana-de-açúcar.*

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	F
1ª Colheita:				
Colunas	4	36 573 706	9 143 426	1,657
Fileiras	4	67 457 722	16 864 430	3,057
Tratamentos	4	53 323 896	13 331 474	2,417
Erro	12	66 187 859	5 515 655	
Total	24	223 545 184		
2ª Colheita:				
Colunas	4	8 778 913	2 194 728	0,264
Fileiras	4	41 531 234	10 382 808	1,248
Tratamentos	4	34 493 757	8 623 439	1,037
Erro	12	99 772 266	8 314 355	
Total	24	184 576 171		
1ª e 2ª Colheita, conjuntas				
Fileiras	4	52 062 381	13 015 555	1,547
Colunas	4	19 017 489	4 754 372	0,565
Tratamentos	4	48 402 621	12 100 655	1,438
Erro (a)	12	100 971 033	8 414 252	
Colheitas	1	1 126 377 677	11 263 776	151,955**
Trat. x colheitas	4	39 417 032	9 854 258	1,329
Erro (b)	20	148 250 798	7 412 539	
Total	49	1 534 499 032		

* Fassbender, H. W. Turrialba, IICA, 1970. Dados não publicados.

Quadro 20. Dados de análise da CTC-KCl, CTC-NH₄OAc, CTC pH-dependente e carbono %, na profundidade de 20-40 cm.

Kg/ha de cal- cário	meq/100 g de solo					C %
	CTC-KCl	CTC- NH ₄ OAc	CTC pH-de- pendente (pH 7,0)	Acidez BaCl ₂ TEA (pH 8,1)	Acidez pH- dependente	
0,00	7,628	39,665	32,037	41,791	33,695	6,842
"	7,279	65,090	57,811	65,688	60,318	14,386
"	7,099	59,903	52,804	58,983	54,533	13,282
"	7,024	64,319	57,295	62,192	57,977	14,110
"	7,858	62,411	54,826	63,750	61,467	15,134
3 780	9,128	52,693	43,565	51,531	49,645	11,224
"	8,737	58,041	49,304	59,834	56,508	12,983
"	12,821	62,077	49,256	52,279	51,699	14,041
"	14,967	67,286	52,319	64,000	63,563	17,330
"	13,755	76,716	62,961	66,573	66,148	18,572
7 560	14,432	51,175	36,743	37,501	37,282	9,027
"	15,676	61,318	45,642	46,287	45,631	13,760
"	14,936	63,457	48,521	49,450	49,094	13,892
"	13,317	56,810	43,493	52,555	51,130	14,720
"	20,012	75,762	55,750	66,573	66,286	18,630
15 120	24,881	47,874	22,993	29,819	29,532	5,203
"	18,413	58,512	40,099	48,495	48,782	13,811
"	17,955	62,916	44,961	63,190	63,046	14,306
"	19,009	71,484	52,478	57,316	56,960	17,399
"	20,173	78,706	57,903	64,630	64,205	19,314
30 240	18,310	37,455	19,145	21,850	21,264	3,806
"	24,188	42,045	17,857	43,976	43,689	15,122
"	23,035	65,883	42,848	49,600	49,456	14,035
"	23,386	66,987	43,601	52,969	52,682	17,330
"	25,462	73,726	48,264	54,257	53,970	16,088

Quadro 21. Resultados de determinação do pH.

Profundidade	TONELADAS POR HECTARE: DE CALCÁRIO											
	0,00		3,78		7,56		15,120		30,24			
	pH-H ₂ O	pH-KCl	pH-H ₂ O	pH-KCl	pH-H ₂ O	pH-KCl	pH-H ₂ O	pH-KCl	pH-H ₂ O	pH-KCl	pH-H ₂ O	pH-KCl
0-20 cm	4,25	4,47	4,60	4,50	5,30	4,88	5,55	5,27	5,68	5,30	5,68	5,30
"	4,30	4,40	4,62	4,50	4,92	4,76	5,10	4,80	5,60	5,08	5,60	5,08
"	4,12	4,50	4,85	4,62	5,02	4,80	5,40	5,03	5,45	5,20	5,45	5,20
"	4,45	4,60	4,50	4,68	4,90	4,72	5,00	4,72	5,40	4,10	5,40	4,10
"	4,20	4,60	4,87	4,80	4,98	4,80	5,00	4,77	5,35	5,23	5,35	5,23
20-40 cm	4,15	4,50	5,40	4,92	6,05	5,70	5,65	5,38	5,98	5,45	5,98	5,45
"	4,25	4,51	5,10	4,80	5,95	5,63	6,10	5,78	6,38	6,00	6,38	6,00
"	4,25	4,68	5,65	5,30	5,90	5,76	6,05	5,72	5,98	5,82	5,98	5,82
"	4,48	4,86	4,58	5,47	5,75	5,43	5,78	5,55	6,00	5,78	6,00	5,78
"	4,10	4,87	5,57	5,38	4,97	5,81	5,88	5,78	6,00	5,88	6,00	5,88
40-60 cm	4,30	4,22	4,70	4,45	5,35	4,93	5,15	4,76	5,00	4,45	5,00	4,45
"	4,30	4,56	4,68	4,62	5,50	5,40	5,50	5,32	5,62	5,18	5,62	5,18
"	4,40	5,00	5,22	5,27	5,10	5,05	5,20	5,30	5,55	5,52	5,55	5,52
"	4,78	5,18	4,75	5,10	5,05	5,30	5,35	5,33	5,50	5,43	5,50	5,43
"	4,33	5,21	5,10	5,10	5,33	5,45	5,30	5,21	5,18	5,47	5,18	5,47
60-80 cm	4,70	4,20	4,62	4,40	4,80	4,50	4,80	4,57	4,67	4,18	4,67	4,18
"	4,70	4,70	4,68	4,45	4,32	5,58	5,28	5,32	5,10	4,95	5,10	4,95
"	4,70	5,22	5,10	5,45	4,80	5,08	4,85	5,25	5,20	5,50	5,20	5,50
"	5,00	5,52	4,85	5,42	5,00	5,50	5,00	5,40	5,15	5,47	5,15	5,47
"	4,61	5,53	4,95	5,38	5,10	5,55	5,00	5,37	5,05	5,50	5,05	5,50
80-100 cm	4,80	4,19	4,80	4,22	4,80	4,45	4,90	4,98	4,90	4,12	4,90	4,12
"	5,00	4,70	4,80	4,25	4,25	5,70	5,50	5,50	5,25	5,20	5,25	5,20
"	4,90	5,47	5,10	5,55	4,90	5,25	4,90	5,62	5,20	5,62	5,20	5,62
"	5,20	5,67	4,50	5,52	5,18	5,73	5,00	5,40	5,18	5,72	5,18	5,72
"	4,89	5,68	5,00	5,52	5,20	5,82	5,10	5,75	5,05	5,68	5,05	5,68

Quadro 22. Dados de análise da acidez trocável (meq/100 g).

Profundidade	TONELADAS POR HECTARE DE CALCÁRIO														
	0,00		3,78		7,56		15,120		30,24						
	ACIDEZ TROCÁVEL	Al+++	H+	ACIDEZ TROCÁVEL	Al+++	H+	ACIDEZ TROCÁVEL	Al+++	H+	ACIDEZ TROCÁVEL	Al+++	H+			
0-20 cm	7,555	6,095	1,460	5,819	3,565	2,254	2,611	1,840	0,771	2,909	1,965	0,944	0,874	0,230	0,644
"	7,268	5,980	1,288	6,601	5,635	0,966	3,634	2,760	0,847	2,909	2,070	0,839	0,874	0,460	0,414
"	6,992	6,210	0,712	5,152	3,565	1,587	3,634	2,645	0,989	1,230	0,460	0,770	0,724	0,115	0,609
"	5,957	5,060	0,927	5,819	4,945	0,874	4,669	3,570	1,099	4,315	3,335	0,980	1,012	0,690	0,322
"	5,819	4,600	1,219	3,197	2,300	0,897	3,197	2,300	0,877	2,611	1,840	0,771	0,575	0,230	0,345
20-40 cm	8,096	7,392	0,704	1,886	1,150	0,736	0,219	0,000	0,219	0,287	0,115	0,172	0,586	0,000	0,586
"	5,370	4,485	0,885	3,323	2,530	0,793	0,656	0,050	0,606	0,287	0,000	0,287	0,287	0,000	0,287
"	4,450	3,565	0,945	0,580	0,115	0,465	0,356	0,000	0,356	0,144	0,000	0,144	0,144	0,000	0,144
"	4,215	3,565	0,750	0,437	0,115	0,322	0,425	0,230	0,195	0,356	0,115	0,241	0,287	0,000	0,287
"	2,323	1,955	0,268	0,425	0,115	0,310	0,287	0,000	0,287	0,425	0,000	0,425	0,287	0,000	0,287
40-60 cm	7,578	6,440	1,138	4,657	3,795	0,962	1,742	1,150	0,592	2,173	1,437	0,836	4,140	2,760	1,380
"	5,382	4,600	0,742	4,795	4,140	0,655	0,667	0,050	0,617	0,621	0,126	0,495	0,575	0,230	0,345
"	2,035	1,150	0,885	0,644	0,115	0,529	1,299	0,575	0,774	0,724	0,287	0,447	0,356	0,000	0,356
"	1,161	0,460	0,701	1,299	0,920	0,379	0,724	0,345	0,379	0,575	0,230	0,345	0,575	0,115	0,460
"	1,012	0,402	0,610	0,862	0,460	0,402	0,575	0,115	0,460	0,863	0,115	0,748	0,356	0,000	0,356
60-80 cm	7,176	6,900	0,276	5,807	4,945	0,862	4,652	3,795	0,847	2,599	2,070	0,529	5,232	4,140	1,092
"	3,197	2,415	0,782	5,025	4,025	1,000	0,581	0,000	0,581	0,736	0,230	0,506	1,161	0,690	0,471
"	0,874	0,230	0,644	0,580	0,115	0,465	1,161	0,460	0,701	0,724	0,115	0,609	0,472	0,115	0,357
"	0,426	0,115	0,311	0,724	0,230	0,594	0,426	0,115	0,311	0,575	0,115	0,460	0,632	0,000	0,632
"	0,581	0,115	0,466	0,425	0,115	0,310	0,426	0,115	0,311	0,425	0,000	0,425	0,287	0,000	0,287
80-100 cm	6,796	6,555	0,241	7,038	6,075	0,943	4,209	3,335	0,874	1,449	0,805	0,644	5,520	4,600	0,920
"	2,611	2,070	0,541	5,807	4,715	1,092	0,529	0,000	0,529	0,724	0,115	0,609	0,575	0,115	0,460
"	0,115	0,115	0,000	0,506	0,000	0,506	0,874	0,374	0,529	0,356	0,057	0,299	0,356	0,000	0,356
"	0,278	0,000	0,278	0,426	0,230	0,196	0,287	0,000	0,287	0,356	0,000	0,356	0,287	0,000	0,287
"	0,287	0,000	0,287	0,425	0,000	0,425	0,287	0,000	0,287	0,287	0,115	0,177	0,425	0,000	0,425

Quadro 23. Dados de análise de Ca, Mg e K (meq/100 g)

TONELADAS POR HECTARE DE CALCÁRIO

Profundidade	0,00			3,78			7,56			15,120			30,24		
	Ca	Mg	K	Ca	Mg	K	Ca	Mg	K	Ca	Mg	K	Ca	Mg	K
0-20 cm	0,432	0,138	0,604	1,679	0,189	0,345	7,877	0,333	0,402	11,005	0,460	0,870	15,467	0,523	0,517
"	0,191	0,140	0,293	2,300	0,184	0,345	3,588	0,247	0,218	3,795	0,483	0,270	12,040	0,575	0,351
"	0,130	0,141	0,323	2,587	0,425	0,270	5,980	0,264	0,230	8,510	0,483	0,460	17,250	0,586	0,575
"	0,598	0,186	0,230	1,610	0,218	0,311	3,530	0,402	0,310	2,185	0,247	0,368	12,420	0,437	0,400
"	0,069	0,177	0,207	5,658	0,402	0,241	5,692	0,116	0,284	7,130	0,523	0,270	11,155	0,517	0,434
20-40 cm	0,561	0,115	0,604	7,095	0,247	0,598	12,477	0,258	0,678	9,200	0,236	0,748	11,816	0,172	0,426
"	0,260	0,115	0,414	4,427	0,149	0,333	14,260	0,287	0,253	17,882	0,443	0,334	18,998	0,374	0,322
"	0,220	0,099	0,397	9,890	0,437	0,444	13,857	0,396	0,356	15,007	0,379	0,615	16,387	0,258	0,414
"	0,454	0,124	0,254	14,030	0,414	0,541	9,683	0,391	0,333	16,617	0,425	0,753	16,933	0,230	0,270
"	0,131	0,079	0,230	11,488	0,437	0,230	18,480	0,416	0,414	19,032	0,621	0,460	18,802	0,345	0,605
40-60 cm	0,940	0,092	0,244	2,242	0,115	0,207	5,060	0,138	0,428	4,197	0,138	0,287	5,140	0,115	0,161
"	0,300	0,092	0,397	1,403	0,092	0,299	4,600	0,121	0,184	5,865	0,144	0,184	8,337	0,195	0,195
"	0,321	0,095	0,312	3,392	0,155	0,397	2,156	0,126	0,253	4,140	0,121	0,287	5,922	0,126	0,253
"	0,448	0,149	0,218	2,300	0,127	0,322	1,690	0,086	0,155	6,440	0,195	0,368	4,169	0,103	0,210
"	0,184	0,081	0,322	1,782	0,103	0,126	5,520	0,046	0,224	4,830	0,184	0,293	4,542	0,126	0,253
60-80 cm	0,940	0,083	0,125	1,518	0,121	0,115	1,667	0,138	0,172	1,989	0,097	0,132	3,277	0,144	0,126
"	0,642	0,138	0,191	1,092	0,085	0,115	2,944	0,092	0,103	2,760	0,092	0,126	3,335	0,081	0,115
"	0,360	0,121	0,209	1,575	0,115	0,138	1,380	1,035	0,161	2,443	0,086	0,189	2,587	0,092	0,076
"	0,494	0,129	0,128	1,805	0,121	0,236	0,834	0,081	0,069	2,242	0,184	0,189	1,857	0,080	0,091
"	0,184	0,079	0,161	2,415	0,092	0,103	2,300	0,100	0,092	1,920	0,103	0,126	2,300	0,109	0,115
80-100 cm	0,940	0,087	0,115	1,322	0,132	0,074	1,092	0,086	0,121	1,828	0,081	0,103	1,667	0,120	0,069
"	0,851	0,138	0,092	1,288	0,092	0,293	1,403	0,076	0,805	1,667	0,121	0,092	2,788	0,092	0,098
"	0,330	0,088	0,153	1,092	0,092	0,069	1,207	0,086	0,092	1,607	0,092	0,138	1,667	0,086	0,059
"	0,448	0,103	0,529	2,472	0,115	0,126	0,690	0,046	0,046	1,104	0,081	0,139	1,207	0,075	0,083
"	0,207	0,066	0,091	0,885	0,074	0,069	2,875	0,075	0,660	1,207	0,098	0,080	1,782	0,805	0,076