

# SEÇÃO V - GÊNESE, MORFOLOGIA E CLASSIFICAÇÃO DO SOLO

## AVALIAÇÃO DE FATORES EDAFOCLIMÁTICOS E DO MANEJO NA PRODUÇÃO DE CAFEEIROS (*Coffea arabica* L.) NO OESTE PAULISTA<sup>(1)</sup>

M. A. M. WEILL<sup>(2)</sup>, F. B. ARRUDA<sup>(3)</sup>, J. B. OLIVEIRA<sup>(4)</sup>,  
P. L. DONZELI<sup>(5)</sup> & B. van RAIJ<sup>(6)</sup>

### RESUMO

Atributos do clima, solo e manejo foram caracterizados em 10 lavouras comerciais de café, estabelecidas na região oeste do estado de São Paulo, nos municípios de Sagres, Pompéia, Iacri, Bastos, Herculândia, Marília, Vera Cruz, Garça e Gália. Os objetivos foram identificar os principais fatores limitantes à cultura e estabelecer um modelo multivariado simples para explicar as produções observadas entre 1984 e 1989. Foram analisados, por correlação simples, mais de 2.000 atributos em relação às produções finais. Os atributos que apresentaram significância a 5% de probabilidade pelo teste *t* de Student foram combinados em sucessivas análises de regressão múltipla. Três equações, com quatorze, cinco e seis variáveis preditoras, foram selecionadas, com graus de explicação da produção observada da ordem de 77, 73 e 75%, respectivamente. Quatro variáveis foram comuns aos três modelos: produção do ano anterior, idade da lavoura, temperatura mínima absoluta média na época do abotoamento e florescimento e soma dos teores de silte e argila nos horizontes subsuperficiais. Outras variáveis selecionadas foram: precipitação na época do abotoamento e florescimento; precipitação na época da maturação e colheita; densidade do solo e água disponível junto à cova (camada de 20-40 cm); macroporosidade na rodagem de máquinas (camada de 0-20 cm); adubação nitrogenada; pH em água e fósforo, ambos na área adubada (camada de 20-40 cm); teor de cálcio trocável e relação Mg:K trocáveis, ambos na área adubada (camada de 0-20 cm). A análise dos dados

<sup>(1)</sup> Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor, junto à Universidade de São Paulo/Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (SP). Projeto executado com auxílio financeiro da FAPESP. Apresentado no XIII Congresso Latino Americano de Ciência do Solo-*Solo-Suelo*, Águas de Lindóia (SP), agosto de 1996. Recebido para publicação em julho de 1998 e aprovado em setembro de 1999.

<sup>(2)</sup> Engenheiro-Agrônomo, Dr., Instituto Agronômico, Centro de Ecofisiologia e Biofísica. Caixa postal 28, CEP 13001-970 Campinas (SP). E-mail: mweill@cec.iac.br. Bolsista do Programa Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento do Café. PNP&D-Café.

<sup>(3)</sup> Pesquisador científico do Instituto Agronômico, Centro de Ecofisiologia e Biofísica. E-mail: farruda@cec.iac.br.

<sup>(4)</sup> Pesquisador científico aposentado do Instituto Agronômico e Professor Visitante do Departamento de Água e Solo, Faculdade de Engenharia Agrícola/UNICAMP. Bolsista do CNPq. Caixa Postal 1170, CEP 13081-970 Campinas (SP). E-mail: bertoldo@agr.unicamp.br.

<sup>(5)</sup> Pesquisador científico do Instituto Agronômico, Centro de Solos e Recursos Agroambientais. E-mail: pdonzeli@barao.iac.br.

<sup>(6)</sup> Pesquisador científico aposentado do Instituto Agronômico e Chefe Geral do Centro Nacional de Pesquisa de Monitoramento e Avaliação de Impacto Ambiental - Embrapa Meio Ambiente. Caixa postal 69. CEP 13820-000 Jaguariúna (SP). E-mail: bvanraij@cnpma.embrapa.br.

de produção no período de seis anos mostrou que as lavouras encontravam-se em processo de depauperamento, com declínio da produtividade da ordem de 400 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. As áreas necessitavam de melhoria da calagem, fosfatagem em profundidade, restabelecimento dos níveis de magnésio no solo e adubação mineral equilibrada. Também ficou evidenciada a necessidade de ser evitada a instalação da lavoura em áreas de acúmulo de ar frio no inverno ou solos com acentuado gradiente textural.

**Termos de indexação:** café, avaliação de terras, modelagem, produtividade.

**SUMMARY:** *EVALUATION OF SOIL, CLIMATE AND CROP MANAGEMENT FACTORS IN Coffea arabica L. PRODUCTION IN WESTERN REGION OF SÃO PAULO, BRAZIL*

*Attributes of soil, climate and crop management were characterized in ten growing coffee plantations in the western region of São Paulo State. The purpose of this work was to identify the main limiting productivity factors and develop a simple multivariate model to explain observed yield in the period between 1984 and 1989. Over two thousand traits were initially analyzed by simple correlation to the final yield, and the significant ones, with at least 5% level according to the Student test t, were selected and combined in successive multiple regression analysis with the final yield. Three equations were selected following the described methodology, having fourteen, five and six independent variables, with explanation levels (or coefficients of determination) of 77, 73 and 75%, respectively. Four important variables were common to the three selected models: coffee yield in the preceding year, crop age, subsurface silt plus clay content and average of absolute minimum temperature during the bud development and flowering stages (July to September). Other selected variables were: rainfall during bud development and flowering stages, rainfall during maturation and harvest stages, soil density and available water close to plants (layer 20-40 cm), macroporosity in the machine wheel track (layer 0-20 cm), nitrogen fertilizer, pH and phosphorus in fertilized area (layer 20-40 cm), exchangeable calcium content and Mg:K exchangeable ratio in fertilized area (layer 0-20 cm). A general analysis of six years of coffee production indicated a steady annual reduction in yield, at the rate of 400 kg per hectare per year. The results emphasize the need to improve liming, deep phosphate application, restore magnesium content to acceptable levels and a more balanced fertilization practice. The models also indicated the importance of choosing adequate planting areas. Places prone to cold air accumulation during the winter or soil profiles with high textural gradient should be avoided for coffee production.*

*Index terms: coffee, land evaluation, modelling, productivity.*

## INTRODUÇÃO

A avaliação de terras é fundamental ao planejamento do uso agrícola (FAO, 1976). O objetivo do processo de avaliação é identificar as melhores alternativas de uso em relação aos diferentes tipos de terra presentes em dado local, tendo por base expectativas de desempenho e do impacto decorrente (Beek, 1978). Métodos disponíveis em avaliação de terras são, em grande parte, qualitativos (FAO, 1974). No entanto, o desenvolvimento de métodos estatísticos apropriados para a solução de problemas espaciais, nas décadas de trinta e quarenta, e os avanços tecnológicos no campo da informática, já na década de sessenta (Burrough, 1986), possibilitaram reduzir a subjetividade dos métodos qualitativos em

avaliação de terras, incentivando vivamente a busca pela quantificação.

Assim, na avaliação da expectativa de desempenho de sistemas agrícolas, deve-se preferir a aplicação de indicadores quantitativos, por permitirem comparações objetivas. Sob esse aspecto, a produtividade biológica, primariamente uma função do genótipo e do meio, é considerada bom indicador de desempenho. Pelo método paramétrico, que envolve a análise de medidas pareadas de produtividade biológica e fatores locais relacionados (Nix, 1968), podem-se selecionar modelos estatísticos, que são então usados nas estimativas de desempenho. Em avaliação de terras, a aplicação desse método representa uma evolução em direção à maior quantificação e objetividade.

A primeira aplicação do método paramétrico em avaliação de terras ocorreu com o desenvolvimento de um modelo simples, baseado em poucos atributos do solo, combinados pelo método aditivo, que foi utilizado como referência para taxaço de terras (FAO, 1974). Na avaliação do potencial agrícola de solos, o modelo mais conhecido é o *Índice de Storie* (Storie, 1970), um modelo multiplicativo simples, que combina quatro fatores alusivos às condições do solo e do terreno. Mais recentemente, especificamente para a cultura da soja, Bruce et al. (1990) validaram dois modelos de produtividade, baseados em atributos edafoclimáticos. No Brasil e para o cafeeiro, Camargo et al. (1984) desenvolveram um modelo para estimar a produtividade para as localidades de Mococa e Ribeirão Preto, no estado de São Paulo, e Liu & Liu (1987) desenvolveram três modelos de previsão de safras para o estado de Minas Gerais.

No presente trabalho, seguindo a tendência rumo à crescente quantificação de atributos em avaliação de terras, foi desenvolvida uma aplicação do método paramétrico, com vistas em avaliar a produtividade de lavouras comerciais de café, estabelecidas na região oeste do estado de São Paulo.

### MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada em 10 lavouras cafeeiras estabelecidas na região da Alta Paulista, no estado de São Paulo, distribuídas pelos municípios de Marília, Garça, Gália, Vera Cruz, Pompéia, Herculândia, Iacri, Bastos e Sagres, em uma área compreendida entre os paralelos 21°30' e 22°30', de Latitude Sul, e entre os meridianos 49°15' e 51°15', de Longitude Oeste (Quadro 1).

O levantamento de atributos climáticos foi efetuado a partir dos registros meteorológicos de dois postos, das cooperativas locais de produtores,

situados nos municípios de Garça e Adamantina. Os dados do posto meteorológico de Garça foram utilizados nos locais 2, 3, 6, 7, 8, 9 e 10, enquanto os dados do posto de Adamantina foram utilizados nos locais 1, 4 e 5. Foram considerados os valores mensais da precipitação pluviométrica (em mm) e da frequência de chuvas (em número de dias no período), bem como as médias mensais das temperaturas (máxima, média e mínima) em °C. Esses atributos foram avaliados por períodos trimestrais, aproximadamente associados com as fases fenológicas do cafeeiro, conforme definidas no trabalho de Camargo et al. (1984) e resumidas no quadro 2. A disponibilidade hídrica dos solos foi avaliada pelo cálculo dos balanços hídricos, pelo método de Thornthwaite & Matter (1955), considerando uma capacidade de armazenamento do solo de 100 mm. Foram utilizadas as médias mensais das precipitações e das temperaturas médias, para o período entre 1984 e 1989.

Em abril de 1989, foram efetivadas as amostragens para caracterização morfológica, analítica e classificação taxonômica dos solos das dez lavouras cafeeiras. Em cada local, foi aberta uma trincheira, perpendicular à linha de plantio, para descrição do perfil de solo representativo da área e coleta de amostras deformadas e indeformadas. Os perfis de solo foram observados e amostrados até 100 cm de profundidade. Os horizontes pedogenéticos foram identificados e descritos de acordo com as definições e procedimentos usuais contidos em Lemos & Santos (1982) e em EMBRAPA (1988a,b). Foram realizadas, em laboratório, as seguintes determinações: granulometria, pH em água e em KCl, carbono orgânico, cátions básicos trocáveis, alumínio trocável e hidrogênio covalente, seguindo os métodos descritos em Camargo et al. (1986). Foram calculados os valores da soma de bases trocáveis, da capacidade de troca de cátions, da saturação por bases e da saturação por alumínio trocável.

**Quadro 1. Localização das lavouras amostradas e algumas informações cadastrais**

Local	Município	Varietade	Idade	Cova por hectare	Planta por hectare
			ano		
01	Sagres	Mundo Novo	11	1250	2500
02	Pompéia	Mundo Novo	10	1250	2500
03	Garça	Mundo Novo	12	1250	2500
04	Iacri	Mundo Novo	15	1000	2000
05	Bastos	Mundo Novo	11	1667	3333
06	Herculândia	Mundo Novo	22	833	2500
07	Marília	Mundo Novo	20	1053	3158
08	Vera Cruz	Mundo Novo	21	1000	3000
09	Gália	Mundo Novo	11	1250	2500
10	Gália	Catuaí	11	1600	3180

**Quadro 2. Trimestres, fases fenológicas aproximadas e variáveis meteorológicas correspondentes, para análise do efeito do clima nas produções de cafeeiros no estado de São Paulo**

Trimestre	Fase fenológica	Variáveis climáticas					
		Pp	Fq	Tma	Tmaa	Tmi	Tmia
Maio-junho-julho	abotoamento	X1	X9	X17	X25	X33	X41
Julho-agosto-setembro	abotoamento/florescimento	X2	X10	X18	X26	X34	X42
Agosto-setembro-outubro	florescimento	X3	X11	X19	X27	X35	X43
Outubro-novembro-dezembro	florescimento/chumbinho	X4	X12	X20	X28	X36	X44
Novembro-dezembro-janeiro	chumbinho/granação	X5	X13	X21	X29	X37	X45
Janeiro-fevereiro-março	máx. vegetação/granação	X6	X14	X22	X30	X38	X46
Fevereiro-março-abril	granação/início da maturação	X7	X15	X23	X31	X39	X47
Abril-maio-junho	maturação/colheita	X8	X16	X24	X32	X40	X48

*Códigos:* Pp (precipitação acumulada, em mm); Fq (frequência de chuvas, em número dias); Tma (temperatura máxima média, em °C); Tmaa (média da temperatura máxima absoluta, em °C); Tmi (temperatura mínima média, em °C); Tmia (média da temperatura mínima absoluta, em °C).

Nas mesmas trincheiras, extraíram-se amostras indeformadas, em três posições: (1) *na cova*, próximo aos pés de café; (2) *sob a rodagem de máquinas*, e (3) *próximo ao meio da rua*. Em cada posição, a amostragem foi realizada utilizando anéis volumétricos do tipo Kopeck, com volume ao redor de 100 cm<sup>3</sup>, extraídos perpendicularmente à superfície do solo. A coleta foi efetuada em cinco camadas, 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, com três repetições por camada. Foram determinadas as curvas de dessorção de água dos solos, pelo método de Topp & Zebchuk (1979).

Ao final do levantamento das curvas de dessorção de água, os valores da densidade dos solos foram obtidos, calculando a razão entre o peso do solo contido no anel, seco em estufa a 105°C por 24 h, e o volume total do anel (correspondente ao volume do solo). A partir das curvas de dessorção de água, foram extraídos os seguintes atributos: porosidade total determinada, definida pelo teor volumétrico de água retido no solo, após a aplicação de uma tensão de 0,00001 MPa; microporosidade, definida pelo teor volumétrico de água retido no solo, após a aplicação de uma tensão de 0,006 MPa; macroporosidade, obtida por diferença entre a porosidade total determinada e a microporosidade; água disponível, definida pelo teor volumétrico de água retido no solo entre as tensões 0,01 e 0,80 MPa, e água facilmente disponível, definida pelo teor volumétrico de água retido no solo entre as tensões 0,01 e 0,1 MPa.

Também foram incorporados ao trabalho os resultados da caracterização analítica de amostras de fertilidade, anteriormente coletadas<sup>(7)</sup> nas

mesmas lavouras, em duas posições: na *área adubada*, sob a projeção da copa, e no *meio da rua*. Os resultados referem-se a quatro camadas, 0-5, 0-20, 20-40 e 40-60 cm, tendo sido determinados os seguintes atributos: fósforo, matéria orgânica, pH em CaCl<sub>2</sub>, bases trocáveis e acidez potencial, seguindo os métodos de análise descritos no trabalho de Raij & Quaggio (1983). Os valores da soma de bases trocáveis (S), da capacidade de troca de cátions (T) e da saturação por bases (V) foram obtidos por cálculo.

Foram estabelecidas matrizes para as análises de correlação linear simples entre as produções e os atributos do clima, dos solos e do manejo das lavouras. Foram testadas as correlações com as produções anuais, com as médias bi-anuais de produção e com a média dos seis anos. Na montagem das matrizes, as produções foram correlacionadas com as variáveis meteorológicas (Quadro 2).

Com relação aos atributos da classificação de solos, foram calculadas as médias ponderadas, para duas "profundidades": (1) Representativa do conjunto de horizontes superficiais (A, E ou AB), e (2) Representativa do conjunto de horizontes subsuperficiais (Bt, Bw ou BC). Tal procedimento foi adotado para tornar comparáveis os resultados, uma vez que, normalmente, não há correspondência entre as espessuras dos horizontes pedogenéticos de perfis provenientes de locais distintos. Nas matrizes de correlação, entraram os valores médios ponderados, nas profundidades 1 e 2, relativos a cada local.

Com relação aos atributos de fertilidade e aos físicos e hídricos, caracterizados por meio das amostras indeformadas, como houve correspondência entre posições e camadas amostradas nos dez locais, entraram nas matrizes os valores originais obtidos das análises.

<sup>(7)</sup> Dados originais do Projeto Dris - Café, cedidos pelo Setor de Fertilidade do Solo, do Instituto Agrônomo de Campinas.

Com relação à cultura e ao manejo, foram testados, dentre outros atributos, a produção do ano anterior, a idade da lavoura, o número de covas por hectare e o número de plantas por cova. Os atributos que, na maioria dos locais, correlacionaram-se significativamente com as produções anuais, a 5% de probabilidade, pelo teste t de Student, bem como os que detiveram os maiores coeficientes de determinação, foram selecionados para integrarem, progressivamente, as matrizes para as análises multivariadas.

O método escolhido foi o de regressão linear múltipla, empregando-se o pacote estatístico SANEST 5.0 (Zonta & Machado, 1989). A hierarquização de atributos, a seleção de variáveis preditoras e o estabelecimento de modelos multivariados simples foram efetuados, adotando-se os processos de seleção de variáveis designados por “máximo valor de R<sup>2</sup>” e “descendente modificado”, sendo este último uma modificação introduzida no SANEST ao processo *backward elimination*, conforme descrito por Davis (1973).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

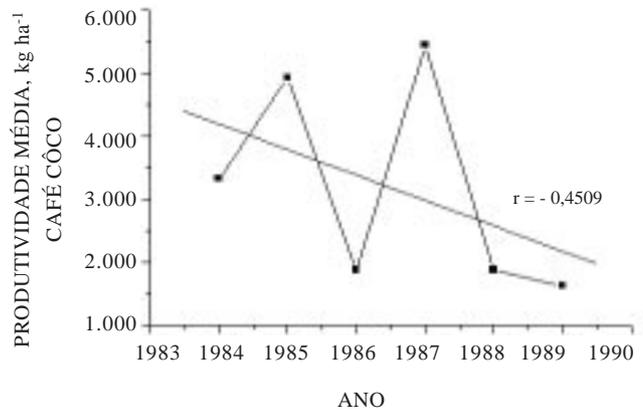
### As lavouras e as produções

A análise das produções anuais e dos coeficientes de variação no período de seis anos (1984-1989) evidenciou grande flutuação da produtividade, em um mesmo local, de um ano para outro. A alternância entre altas e baixas produções espelha o efeito de um grande fator da produção do cafeeiro, que corresponde à contra-safra ou produção do ano anterior. A importância desse fator, que é determinado por características fisiológicas da planta (Cannel & Huxley, 1969; Rena & Maestri, 1987), já havia sido reconhecida no trabalho de Camargo et al. (1984) e incorporada em seu modelo de produtividade.

A interferência da evolução tecnológica na série de anos de produção agrícola foi avaliada, estabelecendo a linha de regressão linear no gráfico de dispersão das médias anuais das produções em função do tempo (Figura 1). O gráfico obtido mostra que, mesmo em termos médios para os dez locais, permanece o ciclo de altos e baixos valores de uma safra para outra, revelando grande influência do ano, que também pode estar relacionada com a variação temporal dos atributos climáticos. Com relação à tendência anual da produção, observa-se que ela é negativa, indicando que as produtividades médias decresceram com o tempo, no período considerado, a uma taxa elevada, da ordem de 400 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>.

### Atributos do clima

Os resultados das análises de correlação entre a produção e os atributos do clima evidenciaram a



**Figura 1. Variação da produtividade média anual para 10 lavouras cafeeiras no estado de São Paulo, no período entre 1984 e 1989.**

importância da precipitação pluviométrica e da temperatura nas fases de abotoamento, florescimento, máxima vegetação e granação (Quadro 3).

As correlações com a precipitação concordam com as obtidas para o cafeeiro por Lains & Silva (1956), Castro (1961), Tosello & Arruda (1962) e Camargo et al. (1984). Na época da maturação e colheita, que coincide com o início do abotoamento da safra seguinte, a correlação da produção com a precipitação (variável X8) foi negativa. Este resultado relaciona-se com o fato de ser necessária a ocorrência de estresse hídrico, após a iniciação da gema floral, como estímulo para a liberação da dormência (Rena & Maestri, 1987). Diversamente, na fase do florescimento, é possível que a correlação positiva com a precipitação (variável X2) seja devida ao fato de serem as primeiras chuvas, após a estação seca, um estímulo importante ao florescimento (Rena & Maestri, 1987).

De modo geral, as produções mostraram correlação positiva com o aumento da temperatura, exceto à época do florescimento (variável X27). Tal tendência também é condizente com a literatura, a qual relata o efeito térmico na ocorrência de abortamento floral em *Coffea arabica* L., fenômeno referido por “estrelinha” (Rena & Maestri, 1987).

### Atributos da classificação de solos

Os solos dos locais da pesquisa são tipicamente de textura média, por influência do embasamento rochoso, constituído por arenitos do Grupo Bauru, Formações Marília e Adamantina (IPT, 1981). Conforme caracterizado no trabalho de Weill (1990), predominam os Podzólicos, que apresentam diferença textural normalmente contrastante entre horizontes superficiais, de textura arenosa, e os de subsuperfície, de textura franco-arenosa ou franco-argilo-arenosa.

**Quadro 3. Variáveis climáticas correlacionadas com as produções de lavouras comerciais de café no estado de São Paulo (5%; teste t de Student)**

Local	Posto meteorológico	Variável climática
1	Adamantina	X2 (0,97); X3 (0,94); X4 (0,88); X5 (0,89); X10 (0,86); X15 (-0,85); X18 (-0,86); X19 (-0,89); X41 (0,95)
2	Garça	X2 (0,96); X12 (0,82); X18 (-0,96); X19 (-0,88); X25 (0,82); X28 (-0,96); X40 (0,82); X41 (0,96)
3	Garça	X8 (-0,88); X16 (-0,85); X17 (0,88); X22 (0,82); X24 (0,82); X25 (0,97); X26 (-0,82); X27 (-0,82); X33 (0,88); X40 (0,97); X41 (0,82)
11	Adamantina	X2 (0,94); X3 (0,97); X14(-0,84)
15	Adamantina	X8 (-0,94); X14 (-0,85); X24 (0,82)
16	Garça	X8 (-0,98); X14 (-0,84); X16 (-0,94); X17 (0,82); X22 (0,93); X24 (0,88); X25 (0,88); X27 (-0,93); X33 (0,82); X40 (0,88)
19	Garça	X8 (-0,94); X16 (-0,87); X24 (0,96); X25 (0,97); X26 (-0,83); X40 (0,88)
20	Garça	X44 (-0,91); X47 (0,82)
27	Garça	X21 (0,85); X32 (-0,85)
28	Garça	X8 (0,92); X21 (-0,82); X22 (0,84); X24 (0,96); X25 (0,96); X27 (-0,84); X32 (-0,82); X40 (0,96)

*Códigos:* Descrição das variáveis climáticas, conforme quadro 2. Os números entre parênteses indicam o valor e o sinal das regressões.

A presença de gradiente textural ou de mudança textural abrupta condiciona diminuição da permeabilidade do solo e restrições à drenagem interna e ao desenvolvimento radicular.

Os resultados das correlações simples com os atributos edáficos revelaram que os teores de silte e argila influenciaram as produções de todos os anos, exceto em 1987 (Quadro 4). O sinal das correlações foi, no entanto, negativo. Dado que a ocorrência de gradiente textural é uma característica marcante nos Podzólicos dos locais da pesquisa, correlação negativa com o aumento dos teores de silte e argila em profundidade no solo foi interpretada como sendo uma indicação indireta de limitação por restrição física, associada com gradiente textural mais elevado.

Analisando os atributos químicos, as correlações da produção foram positivas em relação ao pH e negativas em relação aos teores de alumínio trocável e à saturação por alumínio (Quadro 4). Os resultados para potássio trocável refletem que adubações muito pesadas ocasionaram o desbalanço de nutrientes nos solos, especialmente em relação ao magnésio. A correlação das produções com a saturação por bases foi naturalmente positiva, enquanto a correlação com a capacidade de troca de cátions e com o carbono orgânico em subsuperfície foi negativa, possivelmente pelo fato de o complexo estar saturado com íons hidrogênio e alumínio, na maioria dos solos analisados (Quadro 4).

Para as análises de correlação múltipla, foram selecionados, na “profundidade” 1, os atributos pH em água e em KCl, alumínio trocável, saturação por

alumínio, potássio trocável, inverso do potássio trocável e saturação por bases. Na “profundidade” 2, foram considerados a capacidade de troca de cátions e o carbono orgânico.

### Atributos de fertilidade dos solos

Os resultados das análises de correlação com os atributos de fertilidade do solo são apresentados no quadro 5. Nove atributos correlacionaram-se significativamente com as produções: a matéria orgânica, os teores de fósforo e de cálcio, o pH, a soma de bases trocáveis, a saturação por bases e, especialmente, as relações Ca:Mg, Mg:K e 1:K. Na projeção da copa, onde foi caracterizada, no trabalho de Weill (1990), a ocorrência de elevada acidez no solo, a correlação com o pH foi positiva. Correlação negativa com a matéria orgânica reflete o efeito da saturação do complexo orgânico por íons ácidos, como hidrogênio e alumínio trocável. Em profundidade no solo, onde a acidez é mais elevada, diminui a decomposição da matéria orgânica e, portanto, maior teor relaciona-se com maior acidez, o que não é favorável às raízes do cafeeiro. Nesses solos, aumento do teor de matéria orgânica relaciona-se com o aumento do teor de argila e, portanto, com o gradiente textural mais acentuado, o que também limita o desenvolvimento radicular.

O fósforo é um elemento imóvel no solo, devendo estar disponível na zona onde se concentram as raízes. No cafeeiro, isto corresponde à camada até 50 cm de profundidade (Franco & Inforzato, 1946; Inforzato & Reis, 1974). Coerentemente, o maior

**Quadro 4. Atributos físicos e químicos dos solos significativamente correlacionados com as produções de lavouras comerciais de café no estado de São Paulo (5% no teste t de Student)**

Produção	Atributo físico e químico do solo
Y1984	SI1 (-0,67); SI2 (-0,52); (SI1 + ARG1) (-0,51); (SI2 + ARG2) (-0,56); pH1 (0,54); pHK1 (0,71); Al1 (-0,56); m1 (-0,61); T2 (-0,54); V1(0,56)
Y1985	C2 (-0,78); 1/K1 (0,62)
Y1986	SI1 (-0,62); ARG2 (-0,68); (SI1 + ARG1) (-0,75); (SI2 + ARG2) (-0,66); C2 (-0,64); T2 (-0,67)
Y1988	ARG1 (0,86); ARG2 (0,82); (SI1 + ARG1) (0,72)
Y1989	ARG1 (-0,74); ARG2 (-0,77); (SI1 + ARG1) (-0,88); (SI2 + ARG2) (-0,58)
Y84/85	SI1 (-0,82); SI2 (-0,71); (SI2 + ARG2) (-0,75); C2 (-0,87); K1 (-0,56); 1/K1 (0,53); T2 (-0,67)
Y85/86	SI1 (-0,64); SI2 (-0,54); (SI2 + ARG2) (-0,66); C2 (-0,84); K1 (-0,57); 1/K1 (0,57); T2 (-0,64)
Y86/87	SI1 (-0,55); K1 (-0,53); T2 (-0,63)
Y88/89	Al1 (-0,61); m1 (-0,60)
YMED6AN	SI1 (-0,69); SI2 (-0,55); C2 (-0,70); K1 (-0,56); T2 (-0,67)

*Códigos:* Y ano (produção no ano indicado); AG (Areia Grossa); AF (Areia Fina); SI (Silte); ARG (Argila); (SI + ARG) (Silte + Argila); pH (pH em água); pHK (pH em KCl); C (Carbono orgânico); Al (Alumínio trocável); H (Acidez não trocável); m (Saturação por Alumínio); K (Potássio trocável); 1/K ( Inverso do potássio trocável); S (Soma de bases trocáveis); T (Capacidade de troca catiônica); V (Saturação por bases); 1 (profundidade 1); 2 (profundidade 2). Os números entre parênteses indicam o valor e o sinal das regressões.

número de correlações significativas ocorreu com a variável PC3, ou teor de fósforo na área adubada na camada entre 20-40 cm. Correlações positivas para cálcio e soma de bases (Quadro 5) mostraram-se coerentes com a condição média presente nos solos analisados, abaixo da mínima satisfatória, conforme recomendações constantes do trabalho de Kupper (1983). Na área adubada, os resultados revelaram desbalanço de nutrientes, especialmente em função de teores muito baixos de magnésio trocável. Correlação negativa com a capacidade de troca de cátions (Quadro 5), como já comentado, reflete o efeito da saturação do complexo predominantemente com os íons ácidos, representados pelo hidrogênio e alumínio, o que condiciona situação mais restritiva, à medida que T aumenta.

#### Atributos físico-hídricos dos solos

Ocorreram correlações positivas para macroporosidade e negativas para microporosidade, indicativas de volume limitante da porosidade de aeração dos solos (Quadro 6). A porosidade total não se revelou uma variável expressiva. Ao contrário do esperado, as correlações foram negativas para água disponível e água facilmente disponível. Para solos de textura média, Arruda et al. (1987) relataram que o aumento da disponibilidade de água no solo relacionou-se com o aumento dos teores de silte e argila. Nos locais da pesquisa, o aumento dos teores de silte e argila está relacionado não só com a maior disponibilidade de água, mas também com o gradiente textural mais elevado. O resultado negativo das correlações com

água disponível parece refletir, indiretamente, o efeito adverso do aumento do gradiente textural. A correlação positiva com densidade do solo reforça tal interpretação.

#### Efeito integrado dos diversos atributos nas produções: resultados das análises de regressão múltipla

Os resultados das análises de regressão múltipla evidenciaram que os fatores climáticos individualmente explicaram a maior parte da variação total observada na produção, incidindo sua influência mais marcante nas fases do abotoamento e florescimento. O número de covas por hectare, uma variável do manejo, manteve uma pesada influência em todo o processo de desenvolvimento dos modelos, logo após as variáveis climáticas. A produção do ano anterior também se mostrou uma variável importante, reafirmando a grande influência da biologia da planta no ciclo bi-anual da produção. Nas condições da pesquisa, os atributos de fertilidade exerceram influência mais abrangente sobre a produtividade dos cafezais, comparativamente aos físico-hídricos. O pH em água, na área adubada, revelou-se importante nas avaliações de desempenho. Outras variáveis promissoras foram o teor de fósforo e a relação Mg:K, ambas na projeção da copa do cafeeiro. Dentre os atributos físicos e hídricos, a soma dos teores de silte e argila em subsuperfície foi a variável mais significativa para as previsões de desempenho, fato possivelmente relacionado com o efeito do gradiente textural em profundidade no solo, não diretamente avaliado.

**Quadro 5. Atributos de fertilidade dos solos significativamente correlacionados com as produções de lavouras comerciais de café no oeste do estado de São Paulo (5% no teste t de Student)**

Produção	Atributo de fertilidade do solo
Y1984	MOC4 (-0,54); MOR2 (-0,66); MOR1 (-0,69); Ca/MgC1 (-0,52); Ca/MgR1 (-0,59); KR2 (0,61); KR4 (0,55); 1/KR3 (-0,52); Mg/KC1 (0,68); TR3 (-0,56); TR4 (-0,53)
Y1985	PC3 (0,64); PR2 (0,60); PR3 (0,60); KR1 (-0,59); 1/KR1 (0,52); Mg/KC3 (0,54)
Y1986	Mg/KC1 (0,54)
Y1987	PC3 (0,76); PC4 (0,86); PR2 (0,83); PR3 (0,66); MOC2 (-0,54); pHC3 (0,74); CaC2 (0,53); VC2 (0,60); VC3 (0,63)
Y1988	PC3 (-0,56)
Y1989	PC3 (0,63); pHR3 (-0,52); pHR4 (-0,55); KR4 (0,55); Mg/KR3 (-0,77); Mg/KR4 (-0,75)
Y84/85	PC3 (0,72); PR2 (0,52); PR3 (0,64); MOC1 (-0,61); pHC3 (0,52); Ca/MgR1 (-0,68); KR3 (0,55); 1/KR3 (-0,52); Mg/KC2 (0,58); Mg/KR4 (-0,56); TC1 (-0,56); TC4 (-0,60)
Y85/86	PC3 (0,68); pHC2 (0,55); pHC3 (0,55); CaC2 (0,64); KR1 (-0,60); Mg/KC2 (0,56); VC2 (0,53)
Y86/87	PC3 (0,72); PC4 (0,78); PR2 (0,60); PR3 (0,71); pHC2 (0,55); pHC3 (0,70); SC2 (0,56); VC2 (0,65)
Y87/88	PC4 (0,64); pHC3 (0,58)
Y88/89	Ca/MgR2 (-0,60)
YMED6AN	PC3 (0,66); PC4 (0,64); PR2 (0,52); PR3 (0,67); pHC3 (0,64); Mg/KC2 (0,52); VC2 (0,55)

*Códigos:* Y ano (produção no ano indicado); P (fósforo), MO (matéria orgânica), pH (pH em CaCl<sub>2</sub>), K (potássio trocável), 1/K (inverso do potássio trocável), Ca (cálcio trocável), Ca:Mg (relação cálcio-magnésio), Mg:K (relação magnésio-potássio), S (soma de bases trocáveis), T (capacidade de troca de cátions), V (saturação por bases), C (cova), R (meio da rua). 1, 2, 3 e 4 se referem, respectivamente, às profundidades 0-5, 0-20, 20-40 e 40-60 cm. Os números entre parênteses indicam o valor e o sinal das regressões.

O maior valor prognóstico foi alcançado com um modelo de quatorze variáveis preditoras, que explicou cerca de 77% da variação total observada. A equação representativa é a seguinte:

$$Y2 = 10.883,76 - 0,56 Y1 - 557,20 \text{ idade} - 8,52 \text{ covas} + 2,4 N - 4,93 X2 - 0,87 X8 + 771,94 X41 + 134,79 PC3 + 4.167,12 CaC2 - 332,56 Mg:KC2 + 9.455,40 DC2 - 343,29 ADC2 - 181,05 MAR1 - 255,44 (SI2 + ARG2) \\ (r = 0,876^{**}) \quad (1)$$

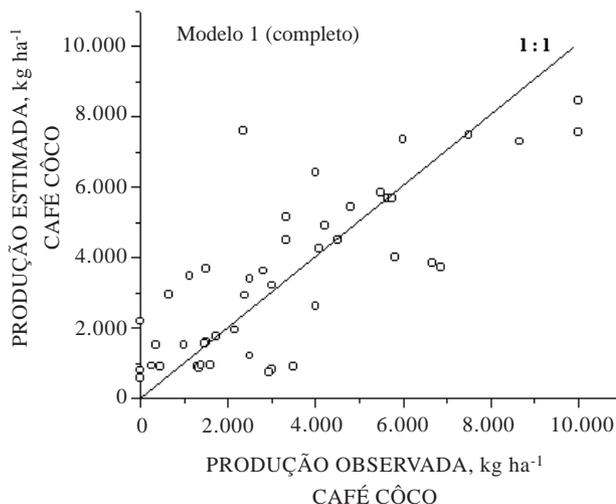
A figura 2 mostra a distribuição das produções observadas em relação às produções estimadas pelo modelo 1 (completo). Observa-se certo equilíbrio das estimativas, em termos de valores sobre e subestimados pelo modelo, ficando a maioria dos pontos em torno da linha de 1:1.

Por ser a operacionalidade ao se trabalhar com um modelo extenso bastante comprometida, o modelo 1 foi submetido ao processo de seleção descendente, que resultou no estabelecimento de dois outros modelos multivariados simples, de cinco e seis variáveis preditoras, com graus de explicação da variação observada pouco inferiores aos do modelo completo, da ordem de 74%. Os modelos selecionados foram:

$$Y2 = 7365,91 - 0,55 Y1 - 308,86 \text{ idade} + 719,50 X41 + 874,88 \text{ pH}C3 - 231,95 (SI2 + ARG2) \quad (r = 0,855^{**}) \quad (2)$$

$$Y2 = 888,42 - 0,56 Y1 - 363,21 \text{ idade} + 704,46 X41 + 1834,52 CaC2 + 7628,25 DC2 - 306,80 (SI2 + ARG2) \\ (r = 0,863^{**}) \quad (3)$$

A relação de variáveis que compõem os três modelos é a seguinte: Y2 (produção estimada); Y1 (produção do ano anterior); idade (idade da lavoura); covas (número de covas por hectare); N (adubação nitrogenada); X2 (precipitação no trimestre jul-ago-set); X8 (precipitação no trimestre abr-maio-jun); X41



**Figura 2. Comparação dos valores de produção de café, observados e estimados pelo modelo 1 (completo), para dez lavouras do oeste paulista.**

**Quadro 6. Atributos físicos e hídricos significativamente correlacionados com as produções de lavouras comerciais de café no oeste do estado de São Paulo (5% no teste t de Student)**

Produção	Atributo físico e hídrico
Y1984	MAM1 (0,52); miC2 (-0,55); miC3 (-0,69); miC4 (-0,58); miC5 (-0,59); miR3 (-0,59); miR4 (-0,52); miR5 (-0,59); miM1 (-0,77); miM2 (-0,53); miM3 (-0,54); miM4 (-0,60); DC1 (0,52); ADC2 (-0,55); ADC3 (-0,54); ADC4 (-0,60); ADR4 (-0,61); ADR5 (-0,53); ADM1 (-0,61); ADM2 (-0,70); ADM3 (-0,60); AFC4 (-0,63); AFR5 (-0,52)
Y1985	MAR1 (0,68)
Y1986	miM4 (-0,54); ADC4 (-0,66); AFC4 (-0,52)
Y1988	DC3 (-0,56); ADR2 (0,63); ADR3 (0,67); AFC3 (0,60)
Y1989	AFM4 (0,60)
Y84/85	MAR3 (0,63); MAM2 (0,63); MAM3 (0,56); miC3 (-0,58); miC4 (-0,62); miC5 (-0,51); miR3 (-0,62); miR4 (-0,54); miR5 (-0,52); miM4 (-0,66); DC5 (0,52); ADC2 (-0,76); ADC3 (-0,72); ADR2 (-0,61); ADR3 (-0,52); ADM1 (-0,60); ADM2 (-0,68); AFC2 (-0,60); AFR2 (-0,53); AFM1 (-0,54)
Y85/86	MAM3 (0,56); miM4 (-0,54); ADC2 (-0,52)
Y86/87	miC4 (-0,55); miR5 (-0,53); miM4 (-0,62); DC1 (0,59)
Y87/88	AFC3 (0,57)
Y88/89	PTM1 (0,56); MAC4 (0,52); MAM4 (0,52); DC3 (-0,52); DC4 (-0,53); DM1 (-0,56); DM3 (-0,53); ADR2 (0,52); AFC3 (0,63)
YMED6AN	MAM3 (0,57); miC4 (-0,55); miM4 (-0,62); ADC2 (-0,55); ADM2 (-0,52)

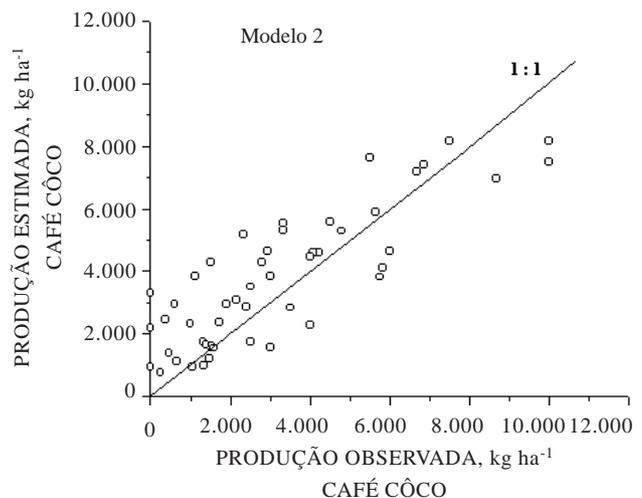
*Códigos:* Y ano (produção no ano indicado); PT (porosidade total determinada); Ma (macroporosidade); mi (microporosidade); AD (água disponível entre 0,01 e 0,80MPa); FD (água facilmente disponível, entre 0,01 e 0,1 MPa); e D (densidade do solo); C (junto à cova); R (na rodagem de máquinas); M (no meio da rua); camada 1 (0-20 cm); 2 (20-40 cm); 3 (40-60 cm); 4 (60-80 cm); 5 (80-100 cm). Os números entre parênteses indicam o valor e o sinal das regressões.

(média das temperaturas mínimas absolutas no trimestre maio-jun-jul); PC3 (fósforo na área adubada na camada de 20-40 cm); pH3 (pH em água na área adubada na camada de 20-40 cm); Ca2 (cálcio trocável na área adubada na camada de 0-20 cm); Mg:K2 (relação Mg:K trocáveis na área adubada na camada de 0-20 cm); DC2 (densidade junto à cova na camada de 20-40 cm); ADC2 (água disponível junto à cova na camada de 20-40 cm); MAR1 (macroporosidade na rodagem de máquinas na camada de 0-20 cm); (SI2 + ARG2) (soma dos teores de silte e argila em subsuperfície).

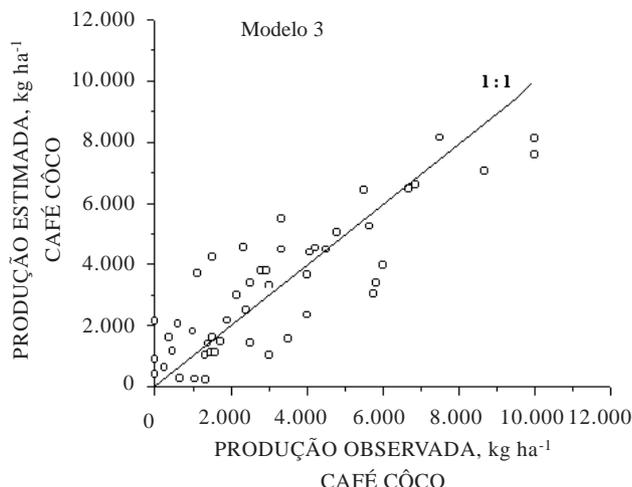
As figuras 3 e 4 ilustram os gráficos de distribuição dos pontos estimados pelos modelos 2 e 3, em relação aos valores observados. Em ambos os casos, os melhores ajustes ocorreram em relação às baixas e médias produções, uma vez que os maiores desvios ocorreram para três dos quatro maiores valores observados.

Os resultados globais alcançados com a série disponível de dados de produção e o elenco adotado de variáveis predictoras permitiram explicar cerca de 77% ( $r = 0,88^{**}$ ) da variação total observada entre as produções. Esse nível, entretanto, é referencial, uma vez que a seleção descendente individualizou modelos menores, com capacidade de explicação da variação observada pouco inferior, ao redor de 74%. A interpretação dos resultados por meio dos modelos mostrou que as lavouras necessitam de melhoria da

calagem, fosfatagem em profundidade, restabelecimento dos níveis de magnésio no solo e adubação mineral equilibrada. Também ficou evidenciada a necessidade de ser evitada a instalação das lavouras em áreas de acúmulo de ar frio no inverno ou em solos com acentuado gradiente textural.



**Figura 3. Comparação dos valores de produção de café, observados e estimados pelo modelo 2, para dez lavouras do oeste paulista.**



**Figura 4. Comparação dos valores de produção de café, observados e estimados pelo modelo 3, para dez lavouras do oeste paulista.**

Os modelos selecionados constituem ferramentas úteis para aplicação na avaliação de terras e no planejamento do uso das terras, orientando as tomadas de decisão quanto a aspectos variados, relativos à instalação de lavouras novas na região e à simulação prévia de níveis de insumos e outros cenários econômicos, antes que sejam implementados. A possibilidade de simulação traz eficiência na seleção de áreas para experimentação e avaliação de práticas de manejo dentro das fazendas, propiciando economia de recursos.

### CONCLUSÕES

1. A maior parte da variação observada nas produções das lavouras, no período avaliado, pode ser explicada pela variação local e sazonal de atributos selecionados do clima, do solo, da planta e do manejo.

2. No período avaliado, os atributos climáticos, a produção do ano anterior e a população de plantas foram fatores preponderantes para a produção de café no oeste paulista.

3. Os atributos de fertilidade do solo apresentaram influência mais acentuada sobre a produção, do que os atributos físicos e hídricos, exceto para solos com mudança textural acentuada.

4. Os modelos selecionados revelaram-se ferramentas promissoras de planejamento e de recomendação de manejo da cultura.

### AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de São Paulo (FAPESP), pelo auxílio financeiro ao

projeto. À Dra. Violeta Nagai, pela colaboração na análise inicial e organização preliminar dos dados para as análises estatísticas. Ao Dr. Sidney Rosa Vieira, do Setor de Conservação do Solo do Instituto Agrônomo de Campinas, pela colaboração no levantamento das curvas de desorção de água no solo.

### LITERATURA CITADA

- ARRUDA, F.B.; ZULLO Jr., J. & OLIVEIRA, J.B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. R. Bras. Ci. Solo, 11:11-15, 1987.
- BEEK, K.J. Land evaluation for agricultural development. Wageningen, International Institute for Land Reclamation and Improvement, 1978. 333p. (ILRI Publication, 23)
- BURROUGH, P.A. Principles of geographical information systems for land resources assessment. Oxford, Oxford University Press, 1986. 194p. (Monographs on Soil and Resources Survey, 12)
- BRUCE, L.L.; SNYDER, W.M.; WHITE Jr., A.W.; THOMAS, A.W. & LANGDALE, G.W. Soil variables and interactions affecting prediction on crop yield pattern. Soil Sci. Soc. Am. J., 54:494-501, 1990.
- CAMARGO, A.; PEDRO Jr. M.; J. ORTOLANI, A.A.; ALFONSI, R.R. & PINTO, H.S. Relações entre a precipitação pluviométrica e a produtividade do cafeeiro. Ecosistema, 9:165-171, 1984.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A. & VALADARES, J.M.A.S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas. Campinas, Instituto Agrônomo, 1986. 94p. (Boletim Técnico, 106)
- CANNEL, M.G.R. & HUXLEY, P.A. Seasonal differences in the pattern of assimilate movement in branches of *Coffea arabica* L. Ann. Appl. Biol., 64:345-357, 1969.
- CASTRO, F.S. Relaciones entre las lluvias y la producción de café. El Salvador, Instituto Salvadoreño de Investigaciones del Café, 1961. p.11-20 (Boletim, 7)
- DAVIS, J.C. Statistics and data analysis in geology. New York, John Wiley & Sons, 1973. p.412-536.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Critérios para distinção de classes de solos e de fases de unidades de mapeamento; normas em uso pelo Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. Rio de Janeiro, 1988a. 67p. (Documentos SNLCS, 11)
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Definição e notação de horizontes e camadas do solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1988b. 53p. (Documentos SNLCS, 3)
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. A Framework for land evaluation. Rome, 1976. 72p. (FAO Soils Bulletin, 32)
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. Approaches to land classification. Rome, 1974. 120p. (FAO Soils Bulletin, 22)

- FRANCO, C.M. & INFORZATO, R. O sistema radicular do cafeeiro nos principais tipos de solo do estado de São Paulo. *Bragantia*, 6:443- 478, 1946.
- INFORZATO, R. & REIS, A.J. Desenvolvimento do sistema radicular em diversas fases do crescimento do cafeeiro. Campinas, Instituto Agronômico, 1974. (Circular, 40)
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. Mapa Geológico do Estado de São Paulo; escala 1:500000. São Paulo, 1981. 2v. (Monografias, 6)
- KUPPER, A. Fatores climáticos e edáficos na cultura do cafeeiro. In: MALAVOLTA, E.; YAMADA, T. & GUIDOLIN, J.A., coords. Nutrição e adubação do cafeeiro. Piracicaba, Instituto de Potassa e Fosfato, 1983. p.27-54.
- LAINS E SILVA, H. Contribuição para o estudo das causas de variação anual da produção de café. *R. Café Port.*, 3:13-28, 1956.
- LEMOs, R.C. & SANTOS, R.D. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 2.ed. Campinas, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1982. 45p.
- LIU, W.T.H. & LIU, B.W.Y. Comparação de três modelos de previsão de safra de café no Estado de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRONOMIA, 5., Belém, 1987. Anais. Belém, Sociedade Brasileira de Agronomia, 1987. p.21-37.
- NIX, H.A. The assessment of biological productivity. In: STEWART, G.A., ed. Land evaluation: Papers on a SCIRO Symposium. Vitoria, Macmillan of Australia, 1968. p.77-87.
- RAIJ, B. van & QUAGGIO, J.A. Métodos de análise do solo para fins de fertilidade. Campinas, Instituto Agronômico, 1983. 31p. (Boletim Técnico, 81)
- RENA, A.B. & MAESTRI, M. Ecofisiologia do cafeeiro. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O. & YAMADA, T., eds. Ecofisiologia da produção agrícola. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. p.119-147.
- STORIE, R.E. Clasificación de los suelos por el índice de Storie. In: STORIE, R.E. Manual de evaluacion de suelos. México, UTEHA, 1970. p.115-158.
- THORNTHWAITE, C.W. & MATTER, J.R. The water balance. Centerton, Drexel Institute of Technology, 1955. 104p (Publication in Climatology, v. 8, n. 1)
- TOPP, G.C. & ZEBCHUK, W. The determination of soil-water desorption curves for soil cores. *Can. J. Soil Sci.*, 59:19-26, 1979.
- TOSELLO, R.N. & ARRUDA, H.V. Correlação entre estimativas oficiais de produção de café e precipitação pluviométrica no estado de São Paulo. *Bragantia*, 21:449-465, 1962.
- ZONTA, E.P. & MACHADO, A.A. SANEST 5.0 - Sistema de análise estatística para microcomputadores. Pelotas, Universidade Federal de Pelotas, 1989. (Manual de Operação)
- WEILL, M.A.M. Avaliação de fatores edafoclimáticos e do manejo na produção de cafeeiros (*Coffea arabica* L.) na região de Marília e Garça, SP. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1990. 182p. (Tese de Mestrado)