

PAULO JOSÉ HAMAKAWA

**ANÁLISES MULTIVARIADAS E DE SÉRIES TEMPORAIS
DE ELEMENTOS METEOROLÓGICOS E DE
PARÂMETROS FENOLÓGICOS DO CACAUEIRO
(*Theobroma cacao* L.) SOB DIFERENTES
ESTRATÉGIAS DE IRRIGAÇÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de "*Doctor Scientiae*".

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2002**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

H198a
2002

Hamakawa, Paulo José, 1963-

Análises multivariadas e de séries temporais de elementos meteorológicos e de parâmetros fenológicos do cacau-eiro (*Theobroma cacao* L.) sob diferentes estratégias de irrigação / Paulo José Hamakawa. – Viçosa : UFV, 2002. 165p. : il.

Orientador: Gilberto C. Sedyama

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Viçosa

1. Cacau - Irrigação. 2. Cacau - Fenologia. 3. Análise multivariada. 4. Análise de séries temporais. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 19.ed. 633.747

CDD 20.ed. 633.7487

PAULO JOSÉ HAMAKAWA

**ANÁLISES MULTIVARIADAS E DE SÉRIES TEMPORAIS
DE ELEMENTOS METEOROLÓGICOS E DE
PARÂMETROS FENOLÓGICOS DO CACAUEIRO
(*Theobroma cacao* L.) SOB DIFERENTES
ESTRATÉGIAS DE IRRIGAÇÃO**

**Tese apresentada à Universidade Federal de
Viçosa, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola, para obtenção do título de "Doctor
Scientiae".**

Aprovada em: 28 de Novembro de 2002

Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi

Prof. Dr. Aristides Ribeiro

Prof. Dr. Paulo Afonso Ferreira
(Conselheiro)

Prof. Dr. Mauro Aparecido Martinez
(Conselheiro)

Prof. Dr. Gilberto C. Sediyaama
(Orientador)

À Théa

Aos meus pais, Tomoti e Wiktorja (*in memoriam*)

A todos meus verdadeiros amigos, estejam próximos ou distantes, no espaço ou no tempo.

AGRADECIMENTOS

ex toto corde

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade concedida para a realização deste curso.

À Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira – CEPLAC, e ao Centro de Pesquisas do Cacau – CEPEC pela cessão dos dados utilizados neste trabalho.

À Fundação Arthur Bernardes – FUNARBE, pela permissão de uso do programa estatístico SAEG – Sistema para Análises Estatísticas

Ao Dr. Sebastião Geraldo Augusto, pelo trabalho em buscar em seus arquivos os dados utilizados neste trabalho.

Ao Professor Gilberto Chohaku Sedyama, pela orientação, amizade e paciência durante o longo tempo até o término deste trabalho.

Ao Professor Aristides Ribeiro, e demais companheiros da ENG-210, Marcos Heil Costa, Sérgio Zolnier, José Maria Nogueira da Costa, Luiz Cláudio Costa, pela amizade e sacrifício em sustentar nossa disciplina nos seus difíceis momentos. Agradeço também, e em especial aos abnegados estudantes do programa de pós graduação dos programas de meteorologia agrícola e engenharia agrícola, participantes da disciplina Estágio em ensino e monitores, nessa árdua batalha.

Aos professores e amigos do Departamento de Engenharia Agrícola, meus sinceros agradecimentos – em especial aos professores Paulo Afonso Ferreira, Mauro Aparecido Martinez, meus conselheiros – Pruski (que tem o defeito de ser gremista), Márcio Mota (cuida do coração!), Mauri, Adílio, Antonio Alves, Antonio Matos, Carlos Magno, Cecília, Daniel (meu caro vizinho, "tá bão? sô! tudo cirtim?"), Delly, Demétrius, Denículi, Evandro (nosso "webmister"), Everardo, Baeta, Chico, Gutemberg ("meu gurú anarquista"), Haroldo, Ilda, Jadir, José Helvécio, Juarez, José Márcio, Baião, Paulo César, Ricardo Capúcio, Rubens, Sandra, Suely, Tetuo e Valmir.

Ao professor Maurinho Luiz dos Santos pelo apoio, amizade e conselhos.

Aos professores Lourival de Castro Vale e Rubens Vianello pelas agradáveis conversas no restaurante Viçosa Shopping.

Agradeço aos demais companheiros de departamento aqui representados por Marcos, Edna, José Mauro (êh timinho vagabundo esse que você torce, hein?, "ão, ão ão, segunda divisão!"), Fernanda, Maria José (a pessoa mais imprescindível do departamento), "Ney", Álvaro (o democrata!), Fátima, Galinari (quando você vai colocar o madeirite na sala de aulas do terceiro piso?), Jurandir e Juvercino. De maneira alguma poderia deixar de agradecer ao Chiquinho e ao "seo Tininho" (com quem sempre se pôde contar).

À Eva Martins, por sua prestatividade e simpatia.

Um agradecimento especial devo à minha esposa, Théa, pela paciência, na fase de redação desta tese, e pelo incentivo constante para que eu não esmorecesse nos momentos em que eu tendia a isto.

A todos aqueles que de alguma maneira contribuíram para que este trabalho fosse possível. De maneira destacada, mas não nominada, porque cada um saberá onde se enquadrar, os meus amigos, professores, companheiros de trabalho das instituições onde trabalhei e colegas de graduação, mestrado e doutorado, pois sem eles eu não teria chegado a este momento, e todos têm uma parcela de contribuição. Seja grande ou pequena. O importante foi a contribuição.

Revisitando os agradecimentos em minha dissertação de mestrado, percebo que, salvo raríssimas exceções, ao longo do tempo, estreitei os laços de amizade com todas as pessoas citadas. Desejo, fervorosamente, que o mesmo aconteça novamente. Desta vez ousei mais: citei mais nomes. Uma única exceção considerável: troquei a cerveja pelo whisky. De preferência malte. Escocês. Coisas da idade.

BIOGRAFIA

omnia mea, mecum porto

PAULO JOSÉ HAMAKAWA, filho de Tomoiti Hamakawa e Wiktorja Krystyna (Krasnodebska) Hamakawa, nasceu no dia 26 de junho de 1963, na cidade de Xambrê, estado do Paraná.

Em 1981 ingressou no curso de engenharia agrônômica na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiróz" – ESALQ – da Universidade de São Paulo – USP – obtendo o título de Engenheiro Agrônomo em 1985. No período de 1982 a 1985 trabalhou como estagiário na Seção de Física do Solo do Centro de Energia Nuclear na Agricultura – CENA/USP.

Obteve o título de Mestre em Agronomia, área de concentração em Agrometeorologia pela ESALQ/USP em 1991, sob orientação do professor Paulo Leonel Libardi.

Trabalhou como docente da disciplina Meteorologia Agrícola na Universidade Federal de Uberlândia, em 1988. No mesmo ano ingressou como pesquisador do Instituto Agrônomo do Paraná – IAPAR, aí permanecendo até 1997.

Em 1997 ingressou no programa de pós graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. No mesmo ano reingressou na carreira docente na Área de Meteorologia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Atualmente coordena três disciplinas de graduação.

ÍNDICE

multa palcis

	Página
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
1. Introdução	1
1.1. As relações entre causa e efeito	1
1.2. O cacau como objeto de estudo	1
1.2.1. Dispersão geográfica do cacau	1
1.2.2. Característica edafoclimáticas para o cacau	2
1.2.2.1. Irradiância solar	2
1.2.2.1.1. Sombreamento	5
1.2.2.2. Temperatura	6
1.2.2.3. Precipitação atmosférica	7
1.2.2.4. Déficit de pressão de vapor e umidade relativa	7
1.2.2.5. Ventos	8
1.2.2.6. Aspectos fenológicos que	9
1.2.2.6.1. Lançamento, atividade fisiológica e queda de folhas	9
1.2.2.6.2. Floração e abortamento floral	10
1.2.2.6.3. Frutificação e frutos pecos	11
1.2.2.7. Estresse hídrico e irrigação	11
1.2.2.8. Solos e distribuição radicular	13
1.2.3. Importância econômica do cacau	13
1.2.3.1. Uma breve visão do mercado	13
1.2.3.2. Panorama do cacau no Brasil e no mercado internacional	14
1.2.3.3. A crise no setor cacau	15
1.2.3.4. Os atores e a correlação de forças	18
1.2.3.4.1. A indústria	19
1.2.3.4.2. Os produtores	19
1.2.3.5. A irrigação no contexto	22
1.2.3.6. Sobre a cadeia de agronegócios do cacau	23
1.3. Análise estatística multivariada e séries temporais	23
1.3.1. Análise estatística multivariada	23
1.3.1.1. Correlação canônica	24
1.3.1.1.1. Análise de correlação canônica ...	25
1.3.1.1.2. Teste de significância	28
1.3.1.2. Componentes principais	28
1.3.1.2.1. Análise dos componentes principais	29
1.3.1.2.1.1. Solução com base na matriz de covariância	30
1.3.1.2.1.2. Solução com base na matriz de correlação	32
1.3.1.2.2. Eliminação de variáveis	34
1.3.1.2.3. Rotação em componentes principais .	34
1.3.2. Análise de séries temporais	36
1.3.2.1. Análise harmônica de Fourier	41
1.3.2.1.1. Funções de autocovariância e autocorrelação	44
1.3.2.1.2. Função de correlação cruzada	46
1.3.2.2. Análise espectral	46
1.3.2.2.1. Análise autoespectral	47
1.3.2.2.2. Análise espectral cruzada	49
2. Objetivos	52
3. Material e métodos	52
3.1. Análises estatísticas	53
3.1.a. Estimativa da evapotranspiração mensal	55
3.1.b. Estimativa de outras variáveis	57
3.1.1. Análise multivariada	58
3.1.1.1. Análise de correlação canônica	58
3.1.1.1.1. Variáveis meteorológicas e variáveis fenológicas	58
3.1.1.2. Análise dos componentes principais	60
3.1.2. Análise das séries temporais	61

4. Resultados e discussões	64
4.1. Análise multivariada	64
4.1.1. Análise de correlação canônica	64
4.1.1.1. Análise de correlação canônica entre as variáveis meteorológicas e as fenológicas	64
4.1.1.1.2. Análise de correlação canônica entre as variáveis fenológicas e as fenológicas entre tratamentos diferentes	64
4.1.1.2. Análise dos componentes principais	65
4.1.1.2.1. Rotação em componentes principais	67
4.1.2. Análise de séries temporais	69
4.1.2.1. Análise harmônica de Fourier	69
4.1.2.1.1. Funções de autocovariância e autocorrelação	75
4.1.2.1.2. Função correlação cruzada	80
4.1.2.1.2.1. Correlação cruzada entre as séries meteorológicas e as fenológicas	80
4.1.2.1.2.2. Correlação cruzada entre as séries fenológicas de diferentes tratamentos	112
4.1.2.2. Análise espectral	115
4.1.2.2.1. Análise autoespectral	115
4.1.2.2.2. Análise espectral cruzada	119
4.1.2.2.2.1. Análise espectral cruzada entre as variáveis meteorológicas e as variáveis fenológicas	119
4.1.2.2.2.2. Análise espectral cruzada entre as variáveis fenológicas de um mesmo tratamento	148
4.1.2.2.2.3. Análise espectral cruzada entre as variáveis fenológicas de tratamentos diferentes	156
5. Conclusões	161
6. Bibliografia	162

RESUMO

HAMAKAWA, Paulo José, D.S. Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2002. **Análises multivariadas e de séries temporais de elementos meteorológicos e de parâmetros fenológicos do cacauzeiro (*Theobroma cacao* L.) sob diferentes estratégias de irrigação.** Orientador: Gilberto C. Sedyama. Conselheiros: Paulo Afonso Ferreira e Mauro Aparecido Martinez.

Os objetivos deste trabalho foram avaliar as interações defasadas no tempo, entre um conjunto de elementos meteorológicos e um conjunto de variáveis fenológicas de uma cultura de cacauzeiro, sob três níveis de irrigação suplementar, bem como comparar os conjuntos de variáveis fenológicas, entre si, em um “corte transversal” no tempo. O experimento foi realizado em Linhares (ES), no período de setembro de 1989 a agosto de 1993, em uma área experimental pertencente à CEPLAC. Os tratamentos foram: irrigação suplementar o ano todo; irrigação suplementar nos períodos de pico de formação da almofada floral e floração (outubro a abril) e a testemunha, sem irrigação. O grupo das variáveis meteorológicas avaliadas foi composto pelas temperaturas máxima, mínima e média, irradiância solar global, insolação, velocidade média do vento a dois metros de altura, evapotranspiração estimada, precipitação e irrigação suplementar; enquanto que o grupo das variáveis fenológicas incluiu o número de folhas novas por planta, queda de folhas por planta, intensidade da floração, número de frutos novos por planta e número de frutos pecos por planta. A análise canônica foi eficiente na detecção das altas correlações entre os grupos das variáveis meteorológicas com o das fenológicas, mesmo em se tratando de séries temporais. A técnica, também, mostrou efeitos dos eventos meteorológicos com apreciável persistência no tempo sobre a fenologia do cacauzeiro, até cinco meses após, insinuando indícios de periodicidades anuais nas inter-relações entre os grupos de variáveis. Também, mostrou-se capaz de separar os tratamentos, sugerindo o maior grau de similaridade entre os tratamentos irrigados entre si, do que qualquer um deles em relação à testemunha, sem irrigação. A análise de componentes principais, ao menos as técnicas utilizadas neste trabalho, em princípio, não se mostraram capazes de selecionar aquelas variáveis meteorológicas que seriam mais importantes para posteriores análises. Esta técnica, foi eficiente na detecção das variáveis meteorológicas que contêm as maiores quantidades de informações, retendo, assim, as variáveis meteorológicas que, em si mesmas, resultam de interações de diversos fatores, descartando, entretanto, as causas primeiras. Também, tenderam a descartar as variáveis ligadas à quantidade de água presente na atmosfera, umidade relativa e precipitação. A análise harmônica de Fourier, foi aquela que explicitou a maior quantidade de informações. A função de autocorrelação foi capaz de mostrar as periodicidades intrínsecas de cada uma das variáveis, meteorológicas e fenológicas. Por seu turno, a correlação cruzada realçou inter-relações entre as diversas variáveis, revelando nuances invisíveis pelas análises estatísticas mais usuais. Os resultados, aparentemente, mais surpreendentes foram as correlações cruzadas entre o fotoperíodo – variável astronômica, por excelência e assim, causa primeira – com as variáveis fenológicas. As respostas fenológicas, em todos os tratamentos, a essa variável astronômica, revelaram-se consistentes, destacando de maneira inequívoca os efeitos das diferentes estratégias de irrigação. As técnicas utilizadas de análise espectral não mostraram resultados particularmente elucidativos, nem acrescentaram informações consistentes àquelas apontadas pela análise harmônica. Uma possível explicação dessas discrepâncias encontradas pelas duas estruturas matemáticas utilizadas para o estudo das séries temporais, seria que o tamanho das séries utilizadas não foram longas o suficiente, em termos de número de dados de cada série, para que a análise espectral pudesse mostrar sua robustez. Concluir-se-ia, então que, pelo menos, para séries curtas a análise harmônica superaria a espectral, na elucidação das inter-relações entre as diversas variáveis.

ABSTRACT

HAMAKAWA, Paulo José, D.S. Universidade Federal de Viçosa, November, 2002. **Multivariate statistics and time series analysis of weather conditions and phenological parameters of cocoa tree (*Theobroma cacao* L.) under several irrigation strategies.** Adviser: Gilberto C. Sedyama. Committee members: Paulo Afonso Ferreira e Mauro Aparecido Martinez.

The goals of this paper were to evaluate the interactions between a set of meteorological elements and sets of phenological variables of cocoa trees under three levels of supplemental irrigations, as well as between the sets of phenological variables themselves, in the "transversal" time steps. The experiment was carried out in Linhares, in the state of Espírito Santo, Brazil, during September of 1989 through August of 1993. The treatments were: no water restriction, supplemental irrigations in the stages of inflorescence and flowering (October to April) and no supplemental irrigations. The set of meteorological data series was made by maximum, minimum and average temperatures, global solar irradiation, and sunshine duration, wind speed at two meters height, estimated evapotranspiration, rain and supplemental irrigation. The sets of phenological variables included leaf flushing, leaf drop, flowering intensity, fruit setting and cherelle wilt. The canonical analysis was efficient to detect high correlations between the sets of meteorological and phenological variables, even in time series analysis. This technique showed time persistency of the effects of meteorological events on phenology of cocoa trees up to five months later, insinuating annual periodicities in interrelations of sets of variables. This technique was able to differentiate the treatments, suggesting higher similarities among the treatments with irrigation. Principal components analysis was an efficient tool to detect which meteorological variables held higher amounts of information; however it was not able to detect the important meteorological variables to be used in posterior analysis as expected. The problem was that meteorological variables that held large amount of information are those derived from several other environmental parameters interactions. Therefore, these variables were not the primary cause. Also, these procedures tended to discard variables associated with water in the atmosphere, like relative humidity and rainfall. The Fourier's harmonic analysis was the better procedures to enlighten the more relevant results. The autocorrelation function was capable to show the intrinsic periodicities of each one of the variables, meteorologicals and phenologicals. The cross-correlation function was able to reveal invisibles tints interrelating the variables. Considering that biological systems do not always show a perfect response to any input variable, the most surprising result was the phenological response to photoperiod, which is essentially an astronomical variable, therefore a primary cause, which is clearly the effect of supplemental irrigation strategies. Unfortunately, the spectral analysis did not elucidate particularly any aspect, or added consistent information to that disclosed by harmonic analysis. A possible reason of these discrepancies would be the lengths of time series used, no longer enough, in terms of number of values of each series, for the spectral analysis to show its mathematical robustness and consistency.

1. Introdução

auctori incubit onus probanti

1.1. As relações entre causa e efeito

A natureza possui uma unidade intrínseca. Não se pode decompô-la em subunidades menores com existências totalmente independentes. É o que nos ensina a teoria quântica. Sendo extremamente rigoroso nenhum par de variáveis avaliadas, a qualquer momento, ou local, poderia ser considerado completamente independente. Naturalmente, dependendo da escala espaço-temporal e/ou rigorosidade, com que sejam observadas e avaliadas, em muitos casos certas variáveis podem ser assumidas como independentes. Outro aspecto que deve ser levado em consideração é que em qualquer escala espaço-temporal que se estude os fenômenos, eles não ocorrem imperiosamente. Têm, sim, maior ou menor probabilidade de ocorrerem.

A visão clássica da relação direta de causa e efeito (*sublata causa, tollitur effectus*) não é totalmente consistente à luz dos conhecimentos atuais, porque as influências das variáveis consideradas como causais, no evento observado, podem ser alteradas, com a inclusão ou remoção de outras variáveis no estudo. Isto põe fim à isenção cartesiana do observador sobre o objeto observado. Nesta abordagem, o observador passa a ser um elemento ativo, tanto na observação, como também sobre o objeto observado. Ou seja, esse observador deixa de ser uma entidade isenta de responsabilidade daquilo que observa (CAPRA, 1991). Isto quer dizer que as variáveis que o observador escolhe para suas medidas e a maneira com as procede influencia no resultado final.

A título de exemplo, pode-se vislumbrar o desenvolvimento de uma planta sob diversos aspectos. A escolha da escala e ênfase nesses variados aspectos será dada pelo observador. Paradoxalmente, cada escolha poderá definir – com dada probabilidade de ocorrência ou, em outras palavras, grau de incerteza – intensidades de respostas diferentes.

A ontogênese de uma planta é extremamente complexa. Sua resposta fisiológica ao ambiente depende de uma extensa série de fatores. Alguns destes poderiam ser considerados mais influentes que outros, por exemplo na defasagem de tempo de respostas fisiológicas a esses diversos fatores. A alguns destes a resposta fisiológica pode ser medida em frações de segundo, caso da absorção de certos comprimentos de onda da irradiância solar, que numa reação em cadeia iniciam o processo fotossintético. Outros fatores, embora de importância fundamental do ponto de vista agrônômico, têm sua resposta percebida num intervalo de tempo significativamente maior. Caso, por exemplo, de estresses hídricos, principalmente em dias em que a atmosfera apresenta alta demanda de vapor d'água. Assim, em tese, esses fatos definiriam a escala ou intervalo de tempo mínimo que deve existir entre duas observações subseqüentes dos agentes causais e efeitos observados.

1.2. O cacauero como objeto de estudo

A escolha do cacauero para este estudo deveu-se ao fato de ser uma cultura perene e nas regiões do Brasil onde ele é produzido, potencialmente ao menos, a qualquer tempo é possível encontrar plantas nos diversos estádios fisiológicos, simultaneamente. Isto possibilita o estudo dos efeitos de variáveis ambientais e diferentes manejos da cultura ao longo do tempo , numa seqüência contínua.

1.2.1. Dispersão geográfica do cacauero

O cacauero (*Theobroma cacao* L.) é uma planta estimulante, tropical, pertencente a família das esterculiáceas, encontrada em seu habitat natural, na América tropical, tanto nas terras baixas, dentro dos bosques escuros e úmidos sob a proteção de grandes árvores, como em florestas menos exuberantes e relativamente menos úmidas, em altitudes variáveis, entre zero e 1.000 m acima do nível do mar. Somente em 1822, os portugueses o introduziram em território africano. Sobre a origem e dispersão do cacauero, DIAS (2001) apresenta uma excelente revisão.

Existem duas variedades principais de cacauero, o *criollo* nativo da América Central e o *forastero*, originário da América do Sul. O sabor e o aroma da semente do *criollo* são

superiores às do *forastero*, sendo este último mais resistente e mais amplamente cultivado no Brasil. Tal como outras árvores frutíferas tropicais, o cacauetei floresce à partir de pequenos nós no tronco e em galhos maiores¹ (COE & COE, 2000) (Figura 1.1., página 16).

1.2.2. Características edafoclimáticas para o cacauetei

A literatura, fartamente, relata que do ponto de vista climático o cacauetei tem como fatores climáticos mais importantes, o regime pluvial e a temperatura.

Sendo originário da região tropical e tendo seu habitat natural em bosques escuros e úmidos, infere-se que o cacauetei apresentaria vigorosas respostas, fisiológicas e fenológicas, às condições meteorológicas e, obviamente, climáticas. Numa aproximação grosseira, a região tropical, apresenta variações relativamente pequenas, durante o ano, mais especificamente, em termos de temperatura, radiação solar e duração do fotoperíodo (ALVIM, 1987). O mesmo não ocorre com o regime de precipitações cuja variação espaço-temporal é marcante.

Muitas questões relativas ao cacauetei e suas respostas fisiológicas e fenológicas ao ambiente, parecem, ainda estar mal resolvidas. Talvez, em virtude de sua própria origem, afinal o cacauetei é originário de uma região que não apresenta variações proeminentes dos elementos meteorológicos, a não ser as relativamente pequenas flutuações em torno de valores médios. Os efeitos do ambiente somente são percebidos quando ocorre alguma anomalia, natural ou provocada, como é o caso da exportação da cultura para um local que não lhe é próprio.

Por esse motivo, ALVIM (1987) relata que os agricultores somente têm sua atenção voltada para o regime pluvial, como fator determinante para sua lavoura.

Em termos de zoneamento agroclimático, segundo ALVIM (1975), o cacauetei se adapta, como cultura comercial, numa estreita faixa entre as latitudes 15°N e 15°S, sendo excepcionalmente encontrada em latitudes maiores como por exemplo no estado de São Paulo. Outros autores, citados por ALMEIDA (1986), e mesmo ALVIM (1987) ampliaram esta faixa potencialmente produtiva situando-a entre as latitudes 18 a 20°N e 18 a 20°S expandindo-a, da mesma maneira, excepcionalmente, até as latitudes 21 a 23°S, para ajustar às pequenas áreas de produção do estado de São Paulo, embora ALVIM (1987) classifique essas áreas como marginais para o cultivo do cacau, em razão das produtividades pouco convincentes.

Apresentar-se-á a seguir a interação do cacauetei com os diversos elementos meteorológicos e edáficos. Entretanto, há que alertar para o fato de que a alteração, introdução ou retirada de algum elemento meteorológico, altera os efeitos estudados de outros elementos, potencializando-os ou minimizando-os, ou ainda, provocando ou subtraindo outros efeitos, que, ao menos em princípio, não estariam diretamente no bojo de determinado assunto.

1.2.2.1. Irradiância solar

Em termos anatômicos, os estômatos do cacauetei situam-se na parte inferior das folhas (NAKAYAMA et al., 1996). Conclui-se, que isto seja parte da evolução genética da planta, de modo a evitar a excessiva radiação solar incidente na sua região de origem, utilizando para a fotossíntese a parcela da radiação denominada difusa.

Segundo Okali & Owusu (1975), citados por SOUZA & DIAS (2001) e, posteriormente, corroborado por RAJA HARUN & HARDWICK (1987a), o ponto de saturação luminosa do cacauetei, planta de ciclo C₃, estaria situado ao redor de 400 $\mu\text{mol f\acute{o}tons.m}^{-2}.s^{-1}$ (Figura 1.2). Por outro lado, AUGUSTO (1997) determinou diferentes pontos de saturação luminosa para plantas com e sem irrigação. Essas taxas fotossintéticas são crescentes com a intensidade luminosa. Na ausência de irrigação alcançou um máximo ao redor de 3,4 $\mu\text{mol CO}_2.m^{-2}.s^{-1}$ para

¹ Inicialmente os europeus não acreditaram que fosse dessa maneira e, julgando que os aquarelistas nativos não haviam observado a planta com o devido cuidado, passaram a reproduzi-la em ilustrações e gravuras reposicionando os frutos para os galhos menores.

250 $\mu\text{mol f\u00f3tons.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Para cacauzeiros irrigados, o valor m\u00e1ximo da taxa fotossint\u00e9tica chegou a 5,6 $\mu\text{mol CO}_2.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ para 600 $\mu\text{mol f\u00f3tons.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

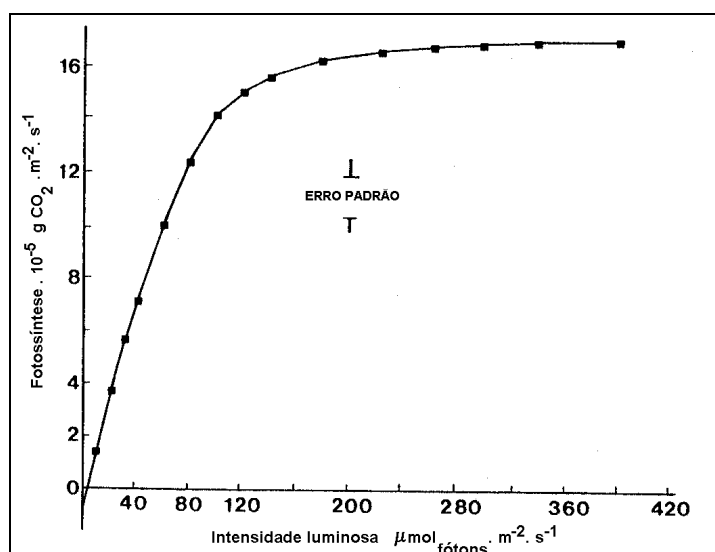


Figura 1.2. Curva de resposta fotossint\u00e9tica de uma folha madura de cacau \u00e0 intensidade luminosa (RAJA HARUN & HARDWICK, 1987a).

Do ponto de vista meteorol\u00f3gico, num dia t\u00edpico de ver\u00e3o, em regi\u00f5es tropicais, a intensidade luminosa pode atingir 2000 $\mu\text{mol f\u00f3tons.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, o que leva \u00e0 conclus\u00e3o de que o cacauzeiro seria uma planta de sombra, corroborado pelas estruturas anat\u00f4mica e morfol\u00f3gica das folhas, que s\u00e3o glabras (sem pelos) ou quase glabras, t\u00edpicas de plantas tropicais de sombra (Cuatrecasas (1964), citado por SOUZA & DIAS (2001)), al\u00e9m do j\u00e1 mencionado posicionamento dos est\u00f4matos nas folhas.

Citando diversos autores, ALVIM (1975) aponta que a taxa de assimila\u00e7\u00e3o (ou absor\u00e7\u00e3o) l\u00edquida (TAL) do cacauzeiro \u00e9 relativamente baixa, quando comparada com outras culturas. Cuidados devem ser tomados ao proceder-se essa avalia\u00e7\u00e3o porque esses dados, de maneira geral, n\u00e3o foram obtidos em condi\u00e7\u00f5es de campo, e sim com mudas de cacauzeiro, extrapolando-os para condi\u00e7\u00f5es de campo. Em m\u00e9dia, o valor de TAL, para o cacauzeiro, varia de 5 a 20 mg de mat\u00e9ria seca por dec\u00edmetro quadrado por dia, contra 30 a 100 $\text{mg.dm}^{-2}.\text{d}^{-1}$ para outras culturas. Em corrobor\u00e7\u00e3o a esses dados, quando utilizada a t\u00e9cnica de an\u00e1lise de fluxo gasoso encontrou-se valores de fotoss\u00edntese l\u00edquida variando de 7 a 27 $\text{mg CO}_2.\text{dm}^{-2}.\text{d}^{-1}$, que representam de 10 a 30% dos observados para milho, batata, ma\u00e7\u00e3 e outras culturas.

RAJA HARUN & HARDWICK (1987a) concluem, enfaticamente, no seu trabalho que o cacau \u00e9 uma planta de sombra, n\u00e3o estando adaptada a utilizar integralmente a luz em altas intensidades. Para eles, altas intensidades de luz resultam na fotoinibi\u00e7\u00e3o da fotoss\u00edntese e foto-oxida\u00e7\u00e3o de pigmentos que podem levar a planta, eventualmente, \u00e0 morte (Figura 1.3). Deve ser anotado que em seu experimento, como a maioria dos conduzidos com vistas ao estudo da fotoss\u00edntese, as plantas utilizadas eram mudas, ainda que as folhas utilizadas fossem "maduras", e n\u00e3o plantas adultas em condi\u00e7\u00f5es de campo. AUGUSTO (2002)², ao relatar seus trabalhos na amaz\u00f4nia brasileira, \u00e9 enf\u00e1tico em considerar o cacauzeiro como uma planta de sombra.

Em estudos versando sobre os efeitos da intensidade luminosa sobre a taxa fotossint\u00e9tica em folhas isoladas, Lemee (1965), citado por ALVIM (1975), observou um incremento de 7 a 22 $\text{mg CO}_2.\text{dm}^{-2}.\text{d}^{-1}$ quando elevou-se a intensidade luminosa de 2 a 25% da insola\u00e7\u00e3o no grau m\u00e1ximo. Entretanto, incrementos acima de 100% na ilumina\u00e7\u00e3o provocaram aumentos muito pequenos na taxa de fotoss\u00edntese. No seu texto, ALVIM (1975), ainda que enfatizando que grandes erros poderiam ser cometidos na extrapola\u00e7\u00e3o, acredita ser razo\u00e1vel a estimativa do valor m\u00e9dio de TAL entre 7 e 10 $\text{mg de mat\u00e9ria seca.dm}^{-2}.\text{d}^{-1}$ para o dossel

² AUGUSTO, S.G. (2002) Comunica\u00e7\u00e3o pessoal.

como um todo. Considerando um valor médio de índice de área foliar igual a 5, levou-o a estimar a produção primária de matéria seca equivalente a 12,8 a 18,2 toneladas por hectare por ano.

No que tange às perdas de água, a Figura 1.4 apresenta a variação da resistência do mesofilo foliar, expresso em termos percentuais considerando a resistência inicial como base de comparação, em função do tempo de exposição à luz, considerando-se diferentes intensidades luminosas, em percentagem da intensidade considerada de saturação lumínica.

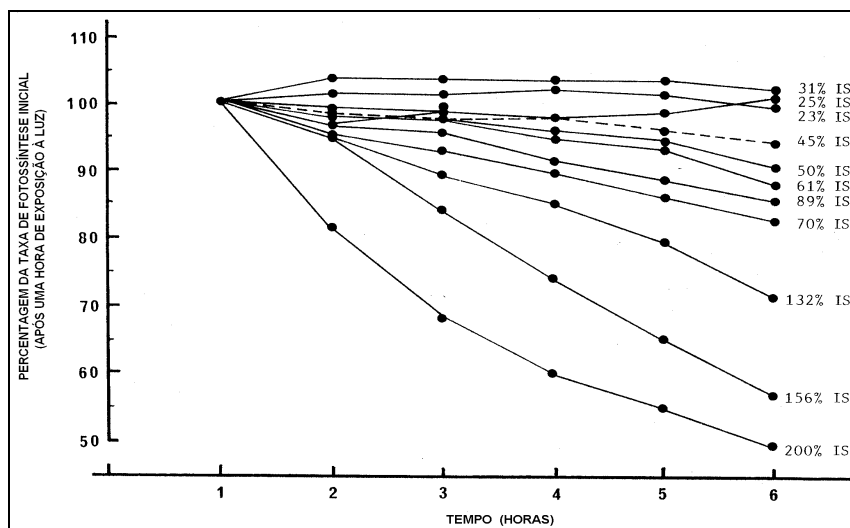


Figura 1.3. Efeitos da exposição temporal de folhas maduras de cacauero a diferentes intensidades luminosas nas taxas fotossintéticas. As intensidades luminosas estão em percentagem da intensidade luminosa de saturação (IS), bem como as taxas de fotossíntese estão representadas em termos percentuais em relação à taxa fotossintética com uma hora de exposição (RAJA HARUN & HARDWICK, 1987a).

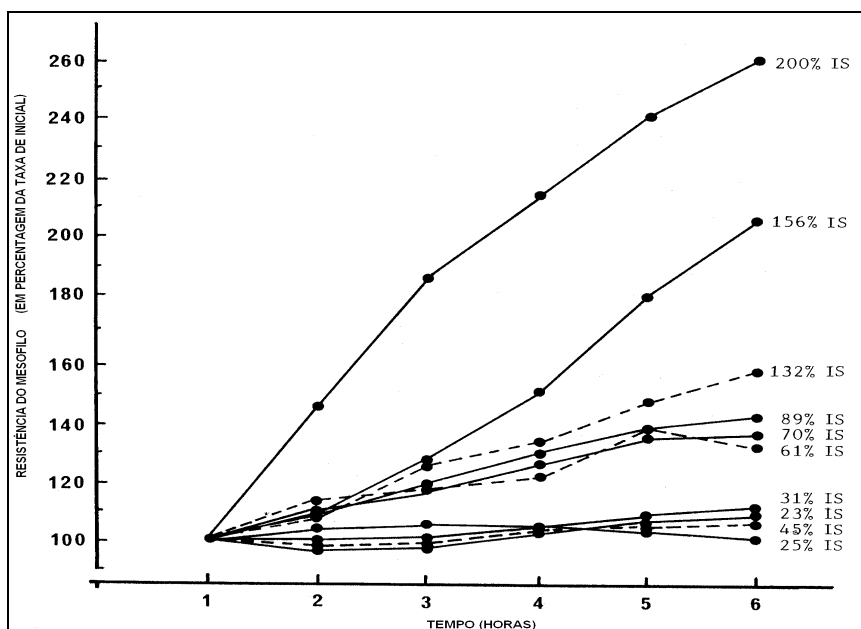


Figura 1.4. Efeitos da exposição temporal de folhas maduras de cacauero a diferentes intensidades luminosas na resistência do mesofilo foliar. As intensidades luminosas estão em percentagem da intensidade luminosa de saturação (IS), bem como as resistências do mesofilo estão representadas em termos percentuais em relação à resistência apresentada com uma hora de exposição (RAJA HARUN & HARDWICK, 1987a).

1.2.2.1.1. Sombreamento

Desde já, diga-se, a polêmica do cacauzeiro ser ou não uma planta de sombra, ainda não está totalmente esclarecida. Pode-se adotar, com fortes evidências experimentais, qualquer um dos pontos de vista.

Essa controvérsia não é de importância menor, pois remete aos princípios fundamentais do manejo a ser adotado pelo produtor, no cacauzeiro, de modo a maximizar economicamente a produtividade. A questão prática não é a definição, de imposição meramente antrópica, se o cacauzeiro é ou não uma planta de sombra; e sim, se existe ou não a necessidade da inclusão de plantas que promovam o sombreamento do cacauzeiro.

Para ALVIM (1975), o cacauzeiro comporta-se como uma planta de sombra quando jovem, nos primeiros 2 a 3 anos. Ele afirma, categoricamente, que em muitos locais, seria, virtualmente impossível iniciar uma cultura comercial de cacau sem sombreamento. Entretanto, com o passar do tempo, essa necessidade desaparece com o aumento da área foliar do cacauzeiro, em razão do autossombreamento. O mesmo autor cita diversas fontes mostrando que após a fase juvenil o próprio dossel é capaz de prover as plantas de autossombreamento. A partir daí a produtividade aumenta, quando a nutrição das plantas é satisfatória, sob condições de não sombreamento.

Morfologicamente, merece destaque o fato de que o tamanho e a longevidade das folhas do cacauzeiro variam em função da quantidade de luz interceptada, sendo maiores aquelas sombreadas. Essa variação no tamanho equaliza, ao menos em parte, as taxas fotossintéticas das folhas. Müller & Biehl (1993), citados por SOUZA & DIAS (2001) relatam que a longevidade média de uma folha sob sombra é de 450 dias, enquanto sob condições de alta luminosidade é de 250 dias.

De acordo com ALVIM (1975) a intensidade luminosa interceptada a diferentes níveis, dentro do dossel do cacauzeiro, pode ser expresso por uma equação derivada da conhecida Lei de Beer:

$$I = I_0 \cdot e^{-K \cdot IAF \cdot h}$$

em que I é a intensidade luminosa dentro do dossel em um nível h , tomando-se o plano do ápice da planta como referência posicional, I_0 é a intensidade luminosa interceptada no topo do dossel, IAF é o índice de área foliar e K , o denominado *coeficiente de extinção*. Menciona que o valor de K varia de 0,57 a 0,67, sendo 0,62 o valor médio. Valores do IAF variariam de 3,7 a 5,7 para cacauzeiros cultivados na Bahia. Aponta que maior número de experimentos deveriam ser realizados para confirmar esses resultados. A forma descrita por essa função matemática parece ser corroborada pelos dados apresentados, graficamente, por HADFIELD (1979a).

Sobre esse ponto, entretanto, ALVIM (1975) enfatiza que o valor de K não seria uniforme no interior do dossel, decrescendo nas camadas superiores. Presumivelmente, segundo ele, tais variações nos valores de K devem-se à arquitetura do dossel, diferenças nos ângulos das folhas. Relata inclusive que esse ângulo variaria de $42,6^\circ \pm 18$ acima de 3,5 metros de altura, à partir do solo; $31,5^\circ \pm 15$ entre 2,5 e 3,5 metros e $26,2^\circ \pm 3$ abaixo de 2,5 metros. Quanto mais horizontalmente estiverem posicionadas as folhas, evidentemente, maior o coeficiente de extinção, K .

Observações do efeito do sombreamento - com diferentes níveis de sombra e materiais sombreadores - sobre a taxa fotossintética mostraram que os valores variaram de 4,5 a 15,2 mg de matéria seca.dm⁻².d⁻¹ quando a intensidade luminosa subiu 5 a 60% da iluminação total pelo sol, aparentemente, estabilizando a partir daí. Deve-se considerar que esses resultados foram obtidos com folhas individuais e plantas jovens, sendo temerário a extrapolação para plantas adultas na sua totalidade, sob sombreamento ou a pleno sol.

SOUZA & DIAS (2001) mencionam que, em recente comunicação pessoal, Paulo de Tarso Alvim sustenta a posição afirmando que o cacauzeiro é uma planta tolerante à sombra, mas não especificamente de sombra.

Enquanto ALVIM (1975) e Alvim (1988), citado por LEITE & VALLE (2000), procura demonstrar que a produtividade do cacauzeiro aumenta quando cultivado em situações de maior iluminação, sem sombreamento, por outro lado, aparentemente, os altos níveis de produtividade não são mantidos estáveis quando a cultura é conduzida sem sombreamento.

Aparentemente, essa controvérsia, do ponto de vista fisiológico, deixa de ter razão de existência, se a questão for avaliada pelo lado agrônomo. Sendo ou não uma planta de sombra ou de sol, o sombreamento, ao menos parcial, tem se mostrado útil, inclusive explicando a queda da produtividade ao longo do tempo, quando o sombreamento é radicalmente reduzido.

Parece que a maior longevidade das plantações sob condições de sombreamento não se deve, exclusivamente ao sombreamento *per se*, mas ao fato de que as plantas usadas não modificariam apenas as condições de iluminação, ou a incidência da irradiância solar. Modificariam, na realidade, todo o microclima, funcionando, também, como quebra-ventos, reduzindo, assim, a circulação do ar, o que minimizaria as oscilações da umidade e temperatura do ar no interior do dossel, quando comparado com o ar externo ao dossel e abrandaria a temperatura das folhas, estabilizando, dessa maneira, a taxa de evapotranspiração num patamar mais baixo, prevenindo as plantas de estresses hídricos (RAJA HARUN & HARDWICK, 1987a).

Existe, também, uma tendência de se acreditar que o sombreamento reduziria a incidência de uma doença chamada "vassoura-de-bruxa", causada pelo fungo *Crinipellis perniciosa*. SOUZA & DIAS (2001) afirmam que sobre essa interação existe ainda pouca informação. Entretanto, argumentam que o sombreamento, por manter estáveis a temperatura e umidade do ar, reduziria a produção de esporos do fungo, bem como, atenuaria os picos de lançamento foliar, floração e frutificação do cacaueteiro. Como todas essas partes da planta são suscetíveis à infecção do patógeno, uma planta sombreada teria menos estruturas a serem atacadas. Todavia, enfatiza que não se conhece qual o nível de sombreamento que promoveria essa redução de infecção.

Um sério problema ocorre quando se promove uma drástica remoção das árvores de sombra, ou quando ocorrem severos ataques de doenças e insetos. As folhas do cacaueteiro, não adaptadas à alta incidência de irradiância solar, caem. Esse fenômeno é conhecido como "die back". O cacaueteiro torna-se, então, progressivamente emponteirado tendendo a senescer.

1.2.2.2. Temperatura

Sobre este elemento meteorológico, ALVIM (1975) relata que o cacaueteiro exige, para a cultura comercial, temperaturas médias anuais entre 22,4° a 26,7°C, tolerando amplitudes térmicas mensais variando de 18,8°C nos meses mais frios a 27,9°C nos mais quentes. Temperaturas médias mensais inferiores a 22°C inibiriam a formação de gemas florais, com reflexos negativos na produção, cinco a seis meses após. Com relação a essa temperatura restritiva, houve confirmação por ALMEIDA et al. (1987).

O crescimento vegetativo também se reduz nessas condições. No trabalho de Erneholt (1948), citado por ALVIM (1975), comparando os extremos de temperatura em regiões cacaueteiras concluiu-se que a temperatura média das mínimas para a cultura não deve ser inferior a 15°C, e a menor temperatura mínima absoluta não situar-se abaixo de 10°C. Estes são os limites freqüentemente mencionados na literatura como os fatores que definem os limites de altitude e latitude para a cultura. Entretanto, o mesmo ALVIM (1975) menciona evidências experimentais contrariando a tolerância do cacaueteiro a esses limites térmicos. Cita como exemplo o estado de São Paulo, com temperatura média anual ao redor de 22,5°C e as temperaturas mínimas absolutas freqüentemente situa-se entre 4° e 6°C. Esse autor relata danos não irreversíveis mesmo quando houveram temperaturas abaixo de zero na região de Ribeirão Preto, São Paulo.

Outro aspecto da temperatura que deve ser levado em consideração, para HARDY (1960), é a amplitude diária. Têm-se constatado correlações positivas entre as amplitudes diárias superiores a 9°C e o excesso de brotação de gemas vegetativas, em detrimento da produção.

Em seu trabalho, LEITE & VALLE (2000) concluíram que o comportamento anual do ciclo da produção de cacau caracteriza-se pela evolução da biologia de crescimento e produção do cacaueteiro, estando estreitamente associada à variação da temperatura do ar ao longo do ano (ciclo anual climato-sazonal), tendo duração de 24 meses, desde o início do lançamento foliar em outubro de um ano até o final da colheita da safra temporã em setembro do ano seguinte. Numa perspectiva de 12 meses, o cacaueteiro desempenharia duas funções fisiológicas simultâneas: a primeira, de geração da produção de um dado ano e a segunda, a da liberação – colheita – dos frutos da produção do ano anterior.

1.2.2.3. Precipitação atmosférica

ALVIM (1975, 1977) considera o regime pluvial da região como sendo um dos fatores mais importantes para a condução de uma cultura comercial do cacau. As precipitações pluviais devem situar-se entre 1400 e 2500 mm anuais, bem distribuídas durante o ano.. AUGUSTO (2002)² adverte para o fato de que esse intervalo é demasiado amplo, sustentando que o limite superior adequado situar-se-ia em torno de 1800 mm anuais. Esses valores devem exceder às perdas anuais por evapotranspiração (ALVIM, 1975). Segundo HARDY (1960), a ausência de uma estação seca bem definida, ou seja, com menos de 60 mm de chuvas, dois a três meses consecutivos durante o ano, é aceito como um índice de exigência mínima para o cacau.

Quando esses valores excedem 2500 a 3000 mm anuais a produção pode ser reduzida devido ao encharcamento do solo e ao desenvolvimento de doenças. Quando a precipitação pluvial anual é menor que 1200 mm é possível o desenvolvimento do cacau com a utilização da irrigação, como, por exemplo, no norte da Venezuela, onde as precipitações situam-se entre 700 e 800 mm anuais.

O cacau pode ser, entretanto, considerado uma planta resistente à estiagem, podendo ser cultivado em zonas com períodos de escassez de chuvas, desde que esses períodos coincidam com uma estação relativamente fria, quando é menor o consumo de água por evapotranspiração.

Um caso interessante de área de produção de cacau é encontrado no país Equador. Durante grande parte do ano, maio a dezembro, a precipitação é baixa, inferior a 50 mm por mês, enquanto as temperaturas médias desses meses situam-se, grosseiramente, entre 23 e 27 °C. Então, espera-se que as taxas de evapotranspiração suplantem os totais de precipitação. Provavelmente, num zoneamento agroclimático, essas áreas seriam consideradas inaptas, ou ao menos restritas, à cultura. Essa aparente incoerência é explicada pela baixa razão de insolação. Em média o número de horas de brilho solar, de junho a dezembro, é de 1,1 horas/dia. E é essa constante nebulosidade a redutora da taxa da evapotranspiração (HADFIELD, 1979b). É evidente, também, que nessa região não se recomenda a utilização de sombreamento.

De acordo com MIRANDA et al. (1994), a precipitação apresenta também um papel importante por estar associada à queda instantânea da temperatura e, também, ao aumento dos padrões de umidade do ar dentro do dossel da cultura, uma a duas horas mais tarde nos diferentes níveis da copa do cacau.

LEITE & VALLE (2000) concluíram que a sazonalidade da precipitação pluvial, em abril e maio no ano anterior ao das colheitas, são determinantes para safras anuais elevadas. Esses meses se situam, aproximadamente 12 meses antes do início da safra temporã, em abril do ano seguinte. No mesmo trabalho verificaram que as precipitações e a safra principal, de outubro a março, não apresentaram correlação. Os mesmos autores citam Alvim (1988) que considera que as colheitas podem ser influenciadas pela distribuição das chuvas ocorridas seis meses antes do seu início, relação esta válida para a Bahia, Gana, Costa do Marfim e Malásia.

1.2.2.4. Déficit de pressão de vapor e umidade relativa

Mesmo considerando-se que as produções de cacau provêm de regiões ditas de pequena variação nos elementos meteorológicos, variações diárias na temperatura determinam, em correspondência, flutuações na umidade relativa (UR) e, conseqüentemente, na déficit de pressão de vapor (DPV) na atmosfera.

RAJA HARUN & HARDWICK (1987b), trabalhando com mudas de 5 meses de idade, em casa de vegetação na Inglaterra, encontraram que a resistência estomática obtida foi relativamente alta devido à baixa intensidade luminosa utilizada. Entretanto, puderam observar que a resistência estomática aumenta, de maneira aproximadamente linear, à medida que o DPV se torna maior (Figura 1.5). O fechamento estomático devido ao aumento DPV, ou à

² AUGUSTO, S.G. (2002) Comunicação pessoal.

redução da umidade relativa é uma resposta hidroativa ao estresse hídrico da epiderme foliar. Por outro lado, as taxas de transpiração não variaram consideravelmente (Figura 1.6), ao contrário da resistência estomática, indicando que o mecanismo de fechamento estomático das folhas do cacauero não seria totalmente efetivo no controle de perdas de água, havendo perdas de água pela cutícula. O cacauero não teria, então, desenvolvido, do ponto de vista evolutivo, uma eficiente estratégia de resistir ao estresse imposto por uma atmosfera seca, condição essa, raramente, existente na floresta tropical de onde é originário. As taxas de fotossíntese, com o aumento do DPV, são decrescentes, no intervalo de temperatura foliar entre 20 e 30°C, em razão do aumento da resistência estomática, resultado do fechamento dos estômatos (Figura 1.7). Os autores concluem que com o fechamento estomático em resposta ao aumento do DPV, com conseqüente redução da taxa fotossintética, em locais muito ensolarados, não sombreados os resultados podem ser ainda mais deletérios com a fotodestruição da clorofila.

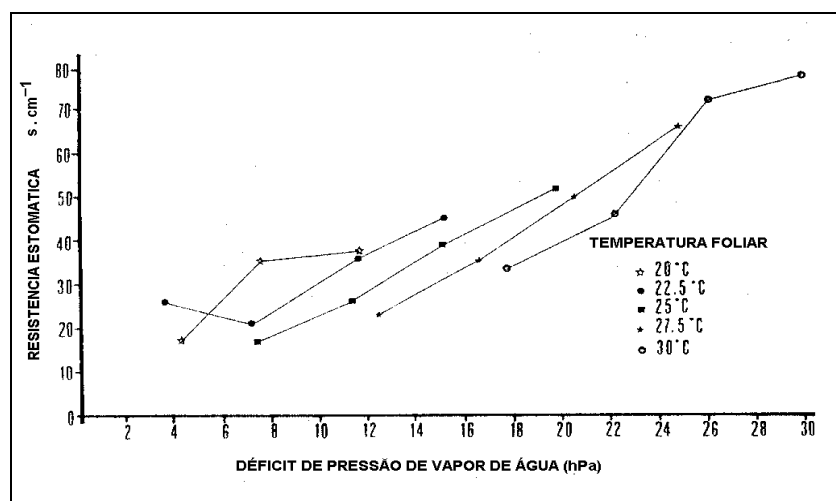


Figura 1.5. Efeitos de diferentes déficits de pressão de vapor sobre a resistência estomática de folhas com diferentes temperaturas (RAJA HARUN & HARDWICK, 1987b).

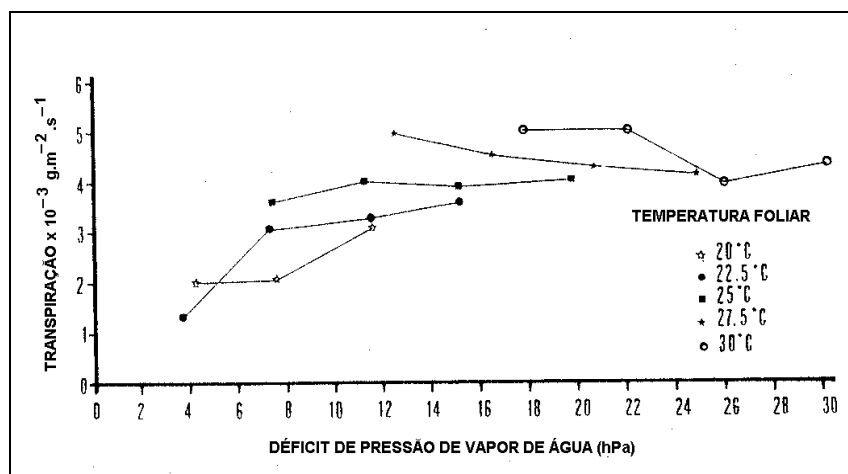


Figura 1.6. Efeitos de diferentes déficits de pressão de vapor sobre as taxas transpiratórias de folhas com diferentes temperaturas (RAJA HARUN & HARDWICK, 1987b).

1.2.2.5. Ventos

Os manuais sobre o cultivo do cacauero são unânimes em afirmar que a ocorrência de ventos é extremamente prejudicial ao cultivo, principalmente para plantas jovens. Para cacauais adultos, no entanto, essa exigência não é tão imperativa, principalmente, quando em áreas sombreadas, pois as plantas sombreadoras já oferecem proteção contra os efeitos do vento. Essas afirmações são corroboradas por ALVIM (1975), que em estudos realizados na

Bahia, com plantas transplantadas, verificou o aumento da área foliar e conseqüentemente o revigoramento das plantas, após um período de severa desfolha, em parcelas com quebra-ventos e desfolha seguida da morte de 72% das plantas sujeitas ao vento.

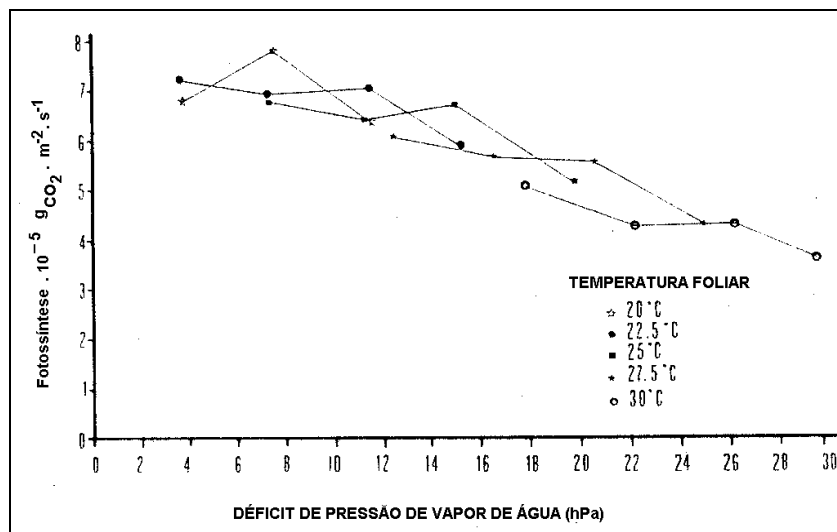


Figura 1.7. Efeitos de diferentes déficits de pressão de vapor sobre as taxas fotossintéticas de folhas com diferentes temperaturas (RAJA HARUN & HARDWICK, 1987b).

Para Sena Gomes & Kozlowski (1989), citado por SOUZA & DIAS (2001), a ação dos ventos dificulta a formação dos cacauais sendo as plantas jovens particularmente sensíveis. Os efeitos dos ventos, citados na literatura, são injúrias mecânicas, a exemplo das culturas em países africanos, que sofrem com os ventos vindos do Saara - denominado *harmattan* - entre dezembro e março; disseminação de doenças; desfolha ou queda prematura, decorrente das injúrias mecânicas e/ou aumento da taxa de perda de água.

Com relação à velocidade do vento, ALVIM (1975) relata que no caso de Linhares, no estado do Espírito Santo, é freqüente o desfolhamento pelo vento nos locais onde os cacauzeiros são cultivados sem ao menos um mínimo de sombreamento. No vale de Colatina, também no estado do Espírito Santo, região naturalmente protegida por montanhas, no entanto, nenhum cuidado particular com o vento tem sido recomendado. Completa mencionando que, embora, em ambos os locais do estado do Espírito Santo a média de precipitação pluvial seja similar (1200 a 1300 mm), enquanto em Colatina a velocidade média do vento situa-se ao redor de 1m/s, em Linhares é de 4m/s.

1.2.2.6. Aspectos fenológicos

1.2.2.6.1. Lançamento, atividade fisiológica e queda de folhas

O cacau apresenta ciclos periódicos nos quais apresenta períodos de lançamentos foliares alternados com períodos de descanso vegetativo. No geral, anualmente, ocorrem dois ou três intensos períodos de lançamentos, e períodos em que os lançamentos não são pronunciados, ocorrendo apenas em alguns ramos.

ALVIM (1975) menciona que diversos autores observaram que durante o período de estresse hídrico ocorre um aumento da queda das folhas. Suspeita-se que a competição interna por fotossintatos levem a indução da abscisão foliar. Como as folhas produzem inibidores internos de novos lançamentos foliares, estes somente ocorreriam com a queda das folhas mais velhas. Por outro lado, as folhas seriam fortes competidoras por nutrientes e/ou hormônios, acelerando a senescência das folhas mais velhas.

Neste aspecto merece um especial destaque o fato, mencionado na literatura, de um possível efeito benéfico do estresse hídrico. Após um período de estresse hídrico, e conseqüente queda de folhas mais velhas, precipitações ou irrigações subseqüentes,

provocariam, uma semana após, um aumento vigoroso na intensidade de lançamento novas folhas. O benefício apontado revela-se quando estudos mostram que as taxas fotossintéticas das folhas mais novas superam as taxas das mais velhas, provenientes de lançamentos foliares anteriores. JOLY (1987) relata que essas taxas fotossintéticas podem ser até quatro vezes maiores. A esse fenômeno denominou-se “hidroperiodicidade”.

Entretanto, a hipótese da hidroperiodicidade levantada por Alvim é contestada, ao menos em estudos com mudas de cacaueteiro, por HARDWICK et al. (1984). Os autores rejeitaram a hipótese da hidroperiodicidade, com base em um experimento bem controlado, no qual não observaram indicações dos efeitos dos estresses hídricos em qualquer fase do ciclo. Sugerem que as oscilações na disponibilidade de carboidratos podem ser a base do mecanismo de lançamento foliar, embora, talvez, mecanismos mais complexos, por exemplo, entre carboidratos e nitrogênio, possam estar envolvidos.

SCERNE (1988), correlacionando linearmente, a queda de folhas com elementos climáticos, encontrou valores de coeficiente de correlação (r) de 0,844 e $-0,694$, respectivamente, com temperatura média do ar e precipitação.

Assim, os eventos de queda de folhas e lançamento de folhas novas, antagônicos entre si, estariam intimamente ligados fisiologicamente.

Grosso modo, estresses de água no solo, dependendo, obviamente da intensidade, podem causar estresses de água nas folhas. Tais estresses podem decorrer de baixa umidade do solo, ou quando a taxa de evapotranspiração supera a densidade de fluxo máxima possível nas condições vigentes, de água do solo às raízes. MACHADO et al. (1979) encontraram, para plantas em vasos mantidos em casa de vegetação, valores de resistência estomática de até 18 s.cm^{-1} quando o potencial de água na folha situou-se ao redor de $-1,9 \text{ MPa}$ (aproximadamente, -19 bars). Para condições de campo, mesmo com o solo contendo diversos teores de água, não se observaram diferenças significativas nos valores de resistência estomática (ao redor de $3,5 \text{ s.cm}^{-1}$, ao meio dia). Os autores atribuem esses resultados ao fato de que em vasos o volume de solo explorado pelas raízes é muito menor que em condições de campo, além das condições climáticas de alta umidade do ar e precipitação atmosférica, que não favoreceram o desenvolvimento de pronunciado déficit hídrico no solo. Esses autores, também baseiam seus argumentos em Fordhan (1972) e Hutcheon (1976), por eles citados, que afirmam que a abertura estomática do cacaueteiro pouco se altera até que o potencial hídrico na planta alcance $-1,4 \text{ MPa}$ (aproximadamente -14 bars).

1.2.2.6.2. Floração e abortamento floral

No cacaueteiro, a floração é relativamente constante ao longo do ano, na maior parte dos locais onde é cultivado, por não apresentarem, de maneira geral, grandes variações sazonais dos elementos meteorológicos.

ALMEIDA *et al.* (1987), em um trabalho sobre a influência dos elementos meteorológicos sobre a floração do cacaueteiro, enumeram diversos autores que relatam que em locais onde ocorrem acentuadas variações de temperatura e na quantidade e distribuição das chuvas a floração pode ser reduzida durante os períodos secos e/ou relativamente frios. Em seu trabalho, propriamente dito, encontraram que a temperatura de 23°C funciona como um limite do ponto de vista de carga térmica (para o conceito de graus-dia). Acima deste valor o sistema reprodutivo é acionado, abaixo praticamente paralisado.

A exemplo da intensidade do lançamento foliar, a intensidade da floração também parece ser estimulada com a aplicação de água, após um período de estiagem. A defasagem encontrada por ALMEIDA *et al.* (1987), na Bahia, foi de três semanas e em Belém (PA), SCERNE (1988) encontrou dois meses ($r = -0,94$), em que o valor negativo de r corrobora a hipótese do efeito do estresse hídrico sobre a floração subsequente.

SCERNE (1988) correlacionando linearmente, a floração com elementos climáticos, encontrou valores de coeficiente de correlação (r) de $-0,694$, com precipitação, quando defasada em dois meses no tempo, e $0,629$, com a amplitude térmica. Registra, também, em sua revisão que tem sido aceito, entre os pesquisadores da área, que a competição interna entre frutos por fotossintezados tem maior efeito sobre a redução da floração do que propriamente a temperatura do ar.

1.2.2.6.3. Frutificação e frutos pecos

A questão da competição interna por fotossintetizados e hormônios, entre as diversas estruturas do cacaueteiro, aparentemente, vem ganhando evidência no meio acadêmico.

A frutificação é apresentada como tendo alta correlação com a produção. O número de flores emitidas é muito maior que o de frutos, havendo, portanto, grande índice de abortamento floral. Se não for polinizada num período de 8 a 10 horas após sua emergência, a flor cai (Alvim, 1984 citado por SOUZA & DIAS, 2001).

Mesmo quando a flor é polinizada e o fruto inicia seu processo de desenvolvimento, até 70 a 80 dias, não é certo que chegará à fase de colheita. Na Bahia, os frutos atingem a maturidade entre 150 e 200 dias, após a polinização. Parte dos frutos fenecem fisiologicamente, recebendo o nome de *pecos* (*cherelle*, em inglês).

Essa desordem fisiológica, segundo ALVIM (1975), seria similar a outras que ocorrem em outras culturas como citrus, abacate, manga, maçã, etc. Os sintomas são amarelecimento e subsequente murchamento, enrugamento e escurecimento dos frutos. A diferença é que, enquanto em outras culturas esses frutos mortos caem, no cacaueteiro ficam mumificados, presos à planta. O mesmo autor argumenta que, aparentemente, essa ocorrência seja devido a competições fisiológicas internas. Dois tipos de competições induziriam ao aparecimento dos pecos fisiológicos: (a) competição entre frutos em desenvolvimento e (b) competição entre folhas novas e frutos novos, indicando que a translocação de materiais para folhas novas é maior que para frutos novos.

Assim, condições que reduzem a produção de fotossintetizados e/ou sua translocação, causariam a ocorrência e a intensificação do número de pecos fisiológicos.

Essa seria uma explicação do porquê o evento seja severo quando ocorrem extensos períodos de estiagem. Por outro lado, o número de pecos diminui quando o sombreamento é reduzido, aumentando, assim, a potencialidade fotossintética.

SCERNE (1988) correlacionando linearmente, os frutos pecos com elementos climáticos, encontrou valores de coeficiente de correlação (r) de $-0,524$, com o excedente hídrico, calculado pelo método do balanço hídrico de Thornthwaite & Matter, de 1955 e $0,635$, com a amplitude térmica.

1.2.2.7. Estresse hídrico e irrigação

Nos itens precedentes foram discutidos vários aspectos dos efeitos do estresse hídrico, sob diversos aspectos, sejam eles benéficos ou deletérios. Entretanto, o como estudar o cacaueteiro em condições de campo nem sempre é factível, seja em razão da falta de infraestrutura nos locais de produção, geralmente situados em países de baixa utilização de tecnologia, seja porque as respostas fisiológicas dessa cultura sejam altamente complexas e, principalmente, os fatores envolvidos sejam interdependentes. Por estas razões, talvez, a maioria dos trabalhos foram conduzidos com mudas em condições controladas.

Práticas de irrigação são adotadas em alguns países, naqueles locais onde a água proveniente da precipitação atmosférica - tanto em quantidades totais quanto na sua distribuição ao longo do ano - não seja capaz de suprir a demanda evapotranspirométrica. Entretanto, ainda são poucos os trabalhos sobre o assunto, não se conhecendo as melhores alternativas para o manejo dessa cultura

Trabalhos interessantes, inclusive com irrigação foram desenvolvidos no país Equador, onde a precipitação é escassa durante boa parte do ano. Infelizmente, como já foi mencionado anteriormente, esse local é *sui generis*, pois se por um lado enfrenta secas prolongadas, por outro o grau de nebulosidade não gera grande demanda evaporativa, de modo que as plantas são capazes de suportar esses períodos de estresse hídrico, sem que tornem-se drásticos. Mesmo assim ORCHARD (1984) relata que no sul do Equador, região onde se irriga o cacaueteiro, as produções sejam significativamente maiores que onde não é irrigado.

ORCHARD (1984) menciona que os efeitos de prolongadas estações secas apresentam diferentes impactos na produção de cacau, nas diferentes regiões do mundo onde é cultivado, dependendo da demanda evaporativa e da capacidade de retenção e fornecimento de água pelo solo. Cita que em Malawi, a combinação de uma longa estação seca, acrescida

simultaneamente por ventos quentes e secos tornam obrigatória a utilização de irrigação para o cultivo do cacau.

Um alerta da mais alta relevância para o presente estudo é a afirmativa encontrada em ORCHARD (1984) de que a resposta do cacau não é homogênea a irrigação. Cita o exemplo de Gana, onde a irrigação promoveu um crescimento rápido e florescimento de plantas jovens, sem, contudo significar um efeito positivo, significativo, na frutificação. Em contrapartida, na Costa do Marfim, a irrigação por gotejamento, proporcionou um rápido desenvolvimento das plantas, precocidade e incremento na produção. Segundo ele, a inabilidade do cacauzeiro responder à irrigação pode ser devido a um desbalanço entre a absorção de água pelas raízes e as perdas por evapotranspiração devido a altas demandas atmosféricas. Isto causaria um estresse hídrico na planta, independentemente, do teor de água no solo.

Em um experimento com irrigação suplementar por gotejamento em Belize, na América Central, KHAN et al. (1987) encontraram indícios de que o decréscimo da água disponível do solo pode reduzir a área foliar total. Perceberam também que a taxa de fotossíntese decresceu significativamente apenas quando a água disponível do solo reduziu-se a níveis abaixo de 60 a 70%, tornando-se quase insignificante quando próximo do ponto de murchamento permanente. Com relação ao experimento com a irrigação fornecendo diversas lâminas de água, como percentuais da evapotranspiração potencial, os resultados não foram muito consistentes, variando de ano a ano, e dentro de cada ano. De maneira geral, produziram mais que a testemunha, não irrigada, exceto quando o estresse hídrico não foi pronunciado.

Outra informação, também da mais alta relevância pode ser encontrada em ORCHARD & SALTOS M. (1987) que relatam que embora a manutenção de adequadas condições hídricas no solo através de práticas de irrigação possa ser, ao menos do ponto de vista fisiológico, benéfico, por outro lado, pode ser economicamente impraticável. Recomendam, como alternativa, a aplicação de cobertura morta como forma de prevenir a evaporação direta da água do solo, reduzindo assim perdas desnecessárias, tendo ainda como efeitos benéficos servir de fonte de material orgânico e minerais, elevando os níveis de fertilidade, particularmente, nitrogênio e potássio que seriam nutrientes importantes envolvidos na utilização eficiente da água, desenvolvimento da planta, bem como no adequado funcionamento dos estômatos.

Do ponto de vista fisiológico, o cacauzeiro é bastante sensível ao estresse hídrico. Entretanto, como a cultura é conduzida em locais onde outras variáveis meteorológicas não apresentam, normalmente, grande amplitude de valores, o fator água, e suas irregularidades nas distribuições no espaço, apresenta conseqüente heterogeneidade nas épocas quando ocorrem as diversas fenofases; e no tempo, provoca oscilações nas produtividades. No oeste africano, por exemplo, onde a estação seca é relativamente longa, cerca de 80% da safra é colhida num período de dois a três meses. Na Bahia, por sua vez, a colheita é mais uniforme durante o ano, estendendo-se a colheita por um período de oito a dez meses. Esses intervalos variam, diga-se, conforme as oscilações na distribuição das precipitações (ALVIM, 1977).

AUGUSTO (1997), citando o relatório anual da ESFIP – Estação Experimental Filogônio Peixoto pertencente ao Centro de Pesquisas do Cacau (CEPEC), órgão de pesquisa da Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC), em Linhares, estado do Espírito Santo, de 1996, relata que no ano de 1988 choveu apenas 943 mm, ocorrendo precipitação superior a 5 mm em apenas 54 dias. Nesse ano a produtividade foi de 201 kg de cacau/ha. Em 1992, com precipitação de 1698 mm, e precipitações superiores a 5 mm em 98 dias, a produtividade atingiu 1120 kg de cacau/ha. Entretanto, para demonstrar os efeitos da má distribuição temporal das chuvas, menciona que no ano de 1995, o total de precipitação foi de 1167 mm. No entanto, como as precipitações superiores a 5 mm ocorreram em apenas 53 dias, a produtividade neste ano reduziu-se a 70 kg de cacau/ha, com o agravante da morte de 20% dos cacauzeiros. O mesmo autor reforça a ênfase que deve ser dada ao binômio (total de precipitação)/(distribuição ao longo do ano), atribuindo, ainda os baixíssimos níveis de produção de 1995, à época em que ocorreram os períodos de seca e chuvas.

Siqueira et al. (1987), citado por AUGUSTO (1997), relatam que o rendimento máximo para o cacauzeiro ocorreu quando o reinício das irrigações foram executadas com o solo, em que foi conduzido o experimento, apresentando 56,5% da água disponível. Entretanto, nesse mesmo estudo, não foram verificadas diferenças significativas entre os níveis de irrigação e produtividade. Num outro trabalho de Siqueira et al. (1996), também citado por

AUGUSTO (1997), utilizando microaspersão para suplementação hídrica até a capacidade de campo, verificou-se que a maior produtividade ocorreu quando a irrigação foi executada com a água do solo estivesse com um valor de potencial matricial ao redor de 0,3 MPa.

Outro aspecto que deve ser levado em consideração é que, do ponto de vista fisiológico, o estresse hídrico, para o cacaueteiro, não é uma ocorrência decisivamente indesejável. A literatura é farta em relatos indicando que após um período de estresse hídrico, fornecendo-se água a seguir, ocorre um forte estímulo à floração e lançamento de novas folhas. Demonstra-se, desta maneira, que a irrigação deve ser diferenciada em função dos estádios fenológicos da cultura.

1.2.2.8. Solos e distribuição radicular

Com relação aos solos, em razão da exigência hídrica da cultura, quando as chuvas são excessivas é inequívoca a importância da profundidade efetiva do sistema radicular, como uma característica essencial para o desenvolvimento do cacaueteiro definindo, inclusive, do ponto de vista do zoneamento edáfico, aqueles potencialmente aptos para a cultura. Os melhores são os profundos apresentando também boa drenagem natural. Segundo CADIMA Z. (1970) de 60 a 80% do sistema radicular se concentram nos primeiros 0,30 m de profundidade, 12 a 20% de 0,30 a 0,60 m e de 3 a 5% de 0,90 a 1,20 m.

Os solos rasos, mesmo os potencialmente férteis, do ponto de vista químico, apresentam limitações quanto ao suprimento de água para as plantas, principalmente durante os períodos prolongados de seca, devido à sua pequena capacidade total de armazenamento de água. Por outro lado, nos solos com lençol freático próximo à superfície, o sistema radicular não se aprofunda. Por conseguinte, nos períodos de estiagem o rebaixamento do nível freático e o ressecamento da camada superficial do solo, produzem déficits de água para as plantas, tornando estas áreas, ao menos, restritas para a cultura. Esta situação poderia ser contornada com a drenagem da área antes da instalação da cultura.

No estado do Espírito Santo a cacauicultura está estabelecida no município de Linhares (Figura 1.8, página 17), região do Baixo Rio Doce, onde 90% dos solos são aluviais, a precipitação pluvial média de 1.200 mm anuais variando bastante de ano a ano, 592 mm no ano de 1963 a 1699 mm em 1992 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – DNMET, 1992). A distribuição dessa precipitação é sazonal, caracterizada por uma estação seca bem definida, abril a setembro, e uma chuvosa, outubro a março, quando ocorrem cerca de 70% do total das chuvas.

1.2.3. Importância econômica do cacau

1.2.3.1. Uma breve visão do mercado

O cacau é considerado uma "commodity", e por isto, é negociado e tem seu preço definido nas bolsas de valores mundiais. No Brasil, os negócios são realizados na BM&F - Bolsa de Mercadorias e Futuros, localizada no Rio de Janeiro. Nos Estados Unidos da América, os contratos são negociados em Nova Iorque, na CSCE – Coffee, Sugar and Cocoa Exchange, enquanto na Inglaterra, as celebrações são assinadas em Londres, na LIFFE – London International Financial Futures and Options Exchange.

Sendo uma "commodity" negociada em âmbito mundial, visto de uma perspectiva ideal a cotação seguiria, adotando-se a visão de Adam Smith (HEILBRONER, 1996), as leis de oferta e procura do mercado. Em tese, então, a um acréscimo de oferta de uma "commodity" segue a queda de seu preço, e vice versa.

Entretanto, a visão idealista de Smith não corresponde à realidade do dia a dia das operações nas bolsas de valores. Essa abordagem poderia ser adotada, com menor margem de erro, se os atores, do teatro das operações do mercado, possuíssem a mesma capacidade de influência no jogo de forças desse mesmo mercado. Sabidamente, não o tem.

No caso específico do cacau, no palco das operações nacionais os atores são os produtores, os cacauicultores; os entes incorpóreos que são, genericamente, denominados, atravessadores e, por fim, os consumidores, representados, tanto pelos adquirentes do produto

final, como também a própria indústria de transformação dos produtos. O jogo de forças e interesses, de cada um desses atores, deveria ser mediado por um ente denominado governo ou Estado. Sob a óptica idealista de Adam Smith, não haveria a necessidade de intervenção do Estado pois o próprio mercado se autoregularia pelo mecanismo puro de oferta e procura. Entretanto, na realidade, avaliando especificamente o caso do cacau, têm-se os produtores como a “ponta mais fraca da corda” e a indústria tida como a “mais forte”.

No plano internacional, entram em cena, outros atores, como as diferentes nações, com suas políticas internas e externas próprias de comércio, e a OMC - Organização Mundial do Comércio, fórum criado na tentativa, muitas vezes frustrada, de mediar a composição de forças entre os diferentes países.

Como mencionado anteriormente, sendo negociado no mercado futuro, o preço do cacau não apenas está sujeito, unicamente, ao “volume” do produto disponível no mercado internacional, num determinado instante, mas também, nas projeções de sua disponibilidade futura, a produção mundial, e a contribuição de cada país produtor, em particular.

O cacau como outros produtos de ciclo longo sofre outros efeitos nas flutuações na produção e preços. Tem sido sugerido que as flutuações na receita dos países produtores e exportadores de produtos de culturas perenes decorrem, principalmente, das características estruturais de oferta desses produtos, sobretudo da defasagem relativamente longa, do plantio até a primeira colheita. Em vista disso, os países produtores e exportadores, freqüentemente, organizam-se com vistas a encontrar mecanismos que possibilitem a estabilização dos preços e das receitas desses produtos (DEVI, 1977).

Essa peculiaridade faz com que a oferta seja pouco sensível a variações de preço, no curto prazo. Contudo no longo prazo, a produção de culturas perenes é bastante sensível às variações de preço (BATEMAN, 1965; BEHRMAN, 1968 e WICKENS e GREENFIELD, 1973).

A instabilidade de produção e preços dos produtos de culturas perenes, no decorrer do tempo, resulta de uma combinação de fatores de tendência, cíclicos e aleatórios. Há, em geral, dois tipos de instabilidade cíclica na produção e preços dos produtos agrícolas. A primeira, determinada por *fatores climáticos*. A segunda, geralmente mais previsível, é o comportamento cíclico de produção decorrente da natureza biológica das plantas (LEMOS, 1983).

De um modo geral, quando os preços de um produto agrícola elevam-se e este crescimento aparenta ser de natureza permanente, os produtores rurais aumentam a produção nas safras subseqüentes, bem como novos produtores são motivados a produzir os produtos que estão com os preços em alta. Quando se trata de produtos de ciclo mais longo, como café, cacau e borracha natural de seringal cultivado, a produção é incrementada mediante novos plantios ou intensificação das lavouras pré-existentes. Eleva-se, dessa maneira, o suprimento desses produtos no mercado, dependendo da defasagem preço-produção. Como consequência disso os preços tendem a cair, desestimulando a produção em fase posterior. Nessa nova situação gera-se escassez do produto, que por sua vez eleva os preços. Assim, o processo continua, com alternância de períodos de excesso de oferta e preços baixos e períodos de excesso de demanda e preços elevados (LEMOS, 1983).

Há muito os economistas estão conscientes da existência desses ciclos de preços e quantidades comercializadas de produtos agrícolas. A explicação mais simples e popularizada deste fenômeno é o “teorema da teia de aranha”, atribuída originalmente a Ezequiel (1938), citado por LEMOS (1983). Este teorema descreve um modelo recursivo em que a quantidade oferecida depende de preços passados e a quantidade demandada corrente, dada a oferta, determina o preço.

Dessa maneira, é necessário que se avalie as distorções nas correlações de forças dos atores do mercado cacauero, para que se possa fazer uma tentativa de previsão da viabilidade econômica da irrigação do cacauero, tendo em vista que a literatura a este respeito é absolutamente escassa.

1.2.3.2. Panorama do cacau no Brasil e no mercado internacional

Como já foi mencionado, o cacau é considerado uma “commodity”, sendo uma daquelas com maiores variações nos preços. Sua história é marcada por ciclos, nos quais as flutuações dos preços apresenta magnitude bastante considerável. Para se estabelecer um padrão de comparação, o preço do cacau seco pago ao produtor brasileiro, na safra 1980/1981

situou-se ao redor de US\$ 50/arroba caindo a algo em torno de US\$ 10/arroba na safra 1999/2000 (SOUZA & DIAS, 2001). Ou seja, no prazo de duas décadas os preços reduziram-se em 80%. Entretanto, no momento atual, em que este texto está sendo escrito, os preços do cacau no mercado futuro internacional, subiram 58% apenas em 2002 (GAZETA MERCANTIL, 2002), tendo atingido as cotações mais altas dos últimos 15 anos, voltando, entretanto a cair novamente. Essa conjuntura será melhor descrita no item 1.2.3.4.2.

As divisas geradas pelo cacau, em 1979, da ordem de US\$ 1 bilhão de dólares, reduziram-se a US\$600 milhões anuais na década de 80, e a, algo em torno de, US\$ 300 milhões anuais na de 90. O Brasil que já foi o maior produtor de cacau ocupa, hoje, a quarta posição, produzindo menos do que produzia na década passada, possui o quinto maior parque chocolateiro mundial, passando, a partir de 1995, de exportador a importador do produto, para abastecer a indústria interna. Ainda assim ocupa uma posição de destaque na produção de cacau, embora aparentemente esta venha decrescendo, variando de 375 mil toneladas no biênio 1991/92 a 145 mil toneladas no biênio 1996/97 (Quadro 1.1). A cadeia produtiva do cacau no Brasil envolve atualmente, US\$ 1,3 bilhões, sendo US\$ 1 bilhão no setor primário (terras, culturas, benfeitorias). Essa cadeia produtiva envolve aproximadamente 300 mil empregos diretos e 3 milhões de indiretos, gerando divisas com sua exportação à partir, principalmente dos estados da Bahia e Espírito Santo (Quadro 1.2).

A maior produção de cacau do Brasil procede da área costeira chuvosa da Bahia, onde concentra-se cerca de 95% da produção brasileira de cacau. Nessa região, o clima apresenta temperatura média anual de 24°C e chuvas relativamente uniformes; a estação de colheita é bastante longa, começando em abril e estendendo-se até janeiro do ano seguinte. PERES FILHO (1999) apresenta dados da produção brasileira de cacau de 1998 como algo em torno de 175 mil toneladas, divididas nos seguintes percentuais: Bahia (82%), Espírito Santo (4%) e Amazônia Legal (14%).

PERES FILHO (1998), citando Ursulino Netto (1997), relata que a produção mundial de chocolate e derivados atingiu, em 1996, em números redondos, 5 milhões de toneladas, com negócios na ordem de US\$ 40 bilhões, sendo 69% nos mercados maduros e 31% nos emergentes, os quais embora contribuindo com pequena média de consumo *per capita* são os que possuem maior número de pessoas.

A Suíça é o maior consumidor mundial de chocolate, com 9,9 kg *per capita* por ano. No mesmo intervalo de tempo, nos Estados Unidos consome-se cerca de 4,6 kg *per capita*. No Japão, 1,7 kg e na Argentina, 3,8 kg. No Brasil o consumo passou de 0,43 kg *per capita* em 1970, para 1,8 kg em 1995. Dados parciais de 1996 mostram que o brasileiro consome mais chocolate sob a forma de bombons (48%) do que de tabletes (32,6%). No estado de São Paulo o consumo anual situa-se em torno de 2,7 kg *per capita* (FOLHA DE SÃO PAULO, 1996). PERES FILHO (1998) cita que nos mercados ditos “maduros” (Europa Ocidental, EUA, Japão, Austrália e Nova Zelândia), o consumo médio anual *per capita* situa-se na ordem de 9 kg de chocolate, e nos mercados “emergentes” (que inclui a América Latina, Caribe, Ásia, África e Europa Oriental) o consumo situa-se na faixa de 1 kg *per capita* por ano.

Com negócios envoltos nas cifras mencionadas, algumas questões que podem ser classificadas como intrigantes são: como e porque os preços internacionais do cacau despencaram em 80%? Porque o Brasil caiu de primeiro produtor mundial de cacau a quarto lugar (já ameaçado, adiante-se), passando de exportador a importador? Quais as saídas para a crise do setor, se é que existem? E também, a pergunta: a irrigação pode contribuir, de maneira economicamente viável, para o setor cacauzeiro?

1.2.3.3. A crise no setor cacauzeiro

Na década de 80, a produção mundial de cacau cresceu bastante, em decorrência do aumento das áreas de cultivo dos países produtores, estimulados pelos preços no mercado internacional que atingiu quase US\$ 55/arroba no período 1976/77 (MASCARENHAS et al., 1999). Por exemplo, a Costa do Marfim quase quadruplicou sua área cultivada. A Malásia multiplicou sua área cultivada por 16. A Indonésia por 40. No Brasil houve o PROCACAU, iniciado em 1976, que incentivou a expansão do plantio e, apesar de não atingir a meta de 700 mil toneladas/ano no prazo de quinze anos, conseguiu aumentar a produção em mais de 50% (Santos Filho (1995), citado por SOUZA & DIAS (2001)).

PERES FILHO (1998), a partir dos dados de 1997 da IOCCC (International Organization of Cocoa, Chocolate and Candies) aponta para



(a)

(b)

Figura 1.1. (a) Inserção dos frutos de cacau nos galhos maiores e (b) fruto aberto.

Quadro 1.1. Produção Mundial de cacau em amêndoas (em 1000 toneladas)

Região/País	1991/92	1992/93	1993/94	1994/95	1995/96	1996/97	1997/98
Costa Rica	3,5	3,0	3,0	3,0	4,0	4,0	4,0
Guatemala	2,0	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Honduras	3,5	3,9	3,0	2,1	2,1	2,1	2,1
México	36,9	43,5	34,0	38,5	40,5	41,0	42,0
Nicaragua	1,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
Panamá	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
America do Norte e Central	49,6	51,5	42,1	45,7	48,6	49,1	50,1
Cuba	2,1	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
Rep Dominicana,	42,3	50,8	58,7	58,8	58,0	54,5	57,0
Granada	2,0	0,9	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8
Haiti	2,0	2,1	2,6	4,5	3,3	3,5	3,5
Jamaica	2,0	2,2	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Trinidad e Tobago	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8
Outros (2)	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2
Caribe	52,4	60,1	68,7	68,9	69,0	65,6	68,0
Bolivia	2,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Brasil	375,0	330,0	281,0	228,4	220,8	148,0	152,0
Colômbia	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
Equador	104,0	76,0	80,0	82,0	95,0	105,0	85,0
Peru	10,0	11,0	11,0	13,0	15,0	15,0	15,0
Suriname	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Venezuela	16,5	16,1	17,1	16,7	17,0	17,1	17,0
America do Sul	568,1	496,7	452,7	403,6	411,4	345,7	332,6
Angola	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0
Camarões	100,0	97,0	98,0	107,0	130,0	120,0	120,0
Ilhas Comoro	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
Congo	0,4	0,3	0,2	0,3	0,8	0,5	0,5
Costa do Marfim(3)	804,2	700,0	850,0	873,0	1.218,4	1.130,5	1.180,0
Guiné Equatorial	5,5	5,7	4,0	2,6	4,5	4,5	4,5
Gabão	1,4	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Gana(3)	293,4	312,0	311,5	315,0	403,0	324,0	350,0
Liberia	2,0	0,1	0,1	0,0	0,7	0,7	0,7
Madagascar	2,5	3,0	3,2	2,5	2,6	2,6	2,6
Nigéria(4)	160,0	140,0	130,0	130,0	140,0	155,0	145,0
São Tomé & Príncipe	2,6	3,0	3,9	2,0	3,4	3,0	3,0
Serra Leoa	11,8	2,8	2,8	2,8	3,2	3,0	3,0
Tanzânia	2,5	2,0	0,8	2,7	2,5	2,5	2,5
Togo(5)	6,8	3,2	4,0	4,0	5,1	5,0	5,0
Uganda	0,6	0,8	0,7	0,7	1,0	1,0	1,0
Zaire	3,5	4,0	3,5	3,5	3,1	3,0	3,0
África	1.397,5	1.276,2	1.414,0	1.447,4	1.920,4	1.756,6	1.821,8
Índia	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Indonésia	165,0	240,0	280,0	257,0	305,0	322,0	325,0
Malásia	235,0	226,0	204,0	134,0	127,0	120,0	115,0
Filipinas	9,0	6,0	6,5	5,0	5,0	6,0	5,0
Sri Lanka	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Ásia	416,5	478,4	498,4	404,3	414,7	414,4	414,4
Fiji	0,3	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1
Papua Nova Guiné	34,0	38,8	31,0	29,0	35,0	36,0	28,0
Ilhas Salomão	4,7	4,5	3,6	2,7	4,0	4,0	4,0
Vanuatu	2,2	1,6	2,0	1,3	1,8	1,8	1,8
Samoa Ocidental	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Oceania	41,7	45,7	37,4	33,7	41,4	42,4	34,4
Produção Mundial	2.525,5	2.415,5	2.519,2	2.398,2	2.876,3	2.660,2	2.660,2

Nota: Os totais estão arredondados.

¹ Produção de outubro a setembro como sendo a anual

² Inclui Belize, Dominica, St. Lucia, Guadalupe e Martinica

³ Inclui o cacau comercializado de Gana

⁴ Inclui o cacau comercializado da Costa do Marfim

⁵ Inclui o cacau comercializado via Benin

Fonte: Outubro de 1986. Production Estimates and Crop Assessment Division. Foreign Agricultural Service. USDA, FAS-USDA.

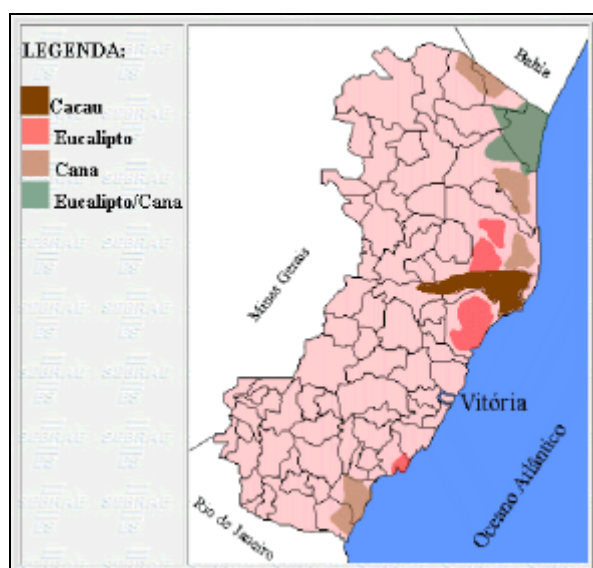


Figura 1.8. Áreas ocupadas com cacau, eucalipto e cana de açúcar no estado do Espírito Santo.

Quadro 1.2. Produção e exportação de cacau – Brasil – 1990 a 1999

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
BRASIL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Produção (mil t)	355,2	320,5	328,1	340,5	330,4	296,5	258,8	285,0	280,2	205,9
Área colhida (mil ha)	663,3	667,0	730,6	733,3	698,3	737,7	683,5	728,3	710,0	683,2
Rendimento (kg/ha)	535,8	480,5	449,1	464,3	473,1	401,9	375,8	391,4	394,7	301,4
Importações (t.)	...	971,5	1.621,1	2.198,0	1.037,8	5.255,8	62,5	14.842,8	11.847,7	75.330,4
Exportações (t.)	...	84.830,3	84.242,2	98.588,6	87.465,1	19.105,5	33.273,8	4.815,0	5.582,0	3.917,5
Produção dos Principais Estados (mil t.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bahia	288,0	259,8	283,5	277,7	271,8	245,4	204,2	204,2	234,8	158,2
Pará	29,1	28,1	29,4	33,1	34,5	29,4	32,3	32,3	32,2	31,2
Espírito Santo	6,5	7,5	12,3	6,6	6,9	3,9	4,5	4,5	4,5	6,5
Mato Grosso	1,7	2,1	1,6	2,2	0,7	0,4	0,5	0,5	0,8	0,9
Principais Importadores do BR(t.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em amêndoa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Estados Unidos	...	28.882,0	58.576,9	51.135,0	30.811,0	4.843,5	13.659,0	2.100,0	1.485,0	4,8
Japão	...	5.780,0	4.020,0	4.540,0	3.860,0	2.520,0	5.058,8	2.040,0	2.220,0	3.088,9
Argentina	...	4.530,2	1.428,0	2.014,9	3.312,0	2.358,0	987,0	285,0	222,0	144,0
Espanha	...	0,0	1.820,0	1.890,0	745,0	270,0	120,0	360,0	860,0	360,0
Países Baixos	...	19.959,9	2.880,0	9.195,0	23.780,1	3.828,8	10.020,0	30,0	880,0	285,0
Pasta de cacau	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Argentina	...	17.108,8	11.874,1	13.416,0	11.205,5	8.303,5	8.313,0	9.043,5	10.783,8	9.351,9
Chile	...	17,5	1.113,0	1.178,0	1.536,0	1.551,1	1.644,0	1.366,0	1.347,0	1.224,3
Estados Unidos	...	2.681,0	32.456,2	31.883,5	22.282,4	8.267,2	8.861,0	3.645,5	7.512,9	1.604,0
Uruguai	...	13,0	1.003,0	711,0	1.183,5	845,0	508,8	497,0	241,5	241,2
Manteiga de cacau	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Argentina	...	3.818,1	5.310,2	4.505,5	8.598,0	5.313,0	7.049,1	7.967,8	8.897,3	7.264,3
Canadá	...	1.881,0	3.482,6	1.893,8	3.140,0	1.340,0	2.780,0	1.200,0	500,0	1.094,0
Chile	...	1.068,0	1.943,6	1.504,0	2.040,0	1.862,0	1.894,0	1.200,0	1.492,0	1.287,0
Estados Unidos	...	25.906,4	28.678,0	25.399,0	10.502,6	5.417,0	9.987,0	5.000,0	5.697,9	5.140,0
Países Baixos	...	4.312,0	150,0	2.635,0	9.899,4	2.265,0	1.790,0	3.200,0	7.410,0	6.820,0

Fonte: Ministério da Agricultura e Abastecimento. Site na internet: www.agricultura.gov.br/Estatisticas/3113.htm copiado em 22 de novembro de 2000.

“um quadro atual preocupante e perspectivas pessimistas com relação à produção mundial futura do cacau, se medidas urgentes não forem tomadas. Praticamente, todos os sete países grandes produtores (Costa do Marfim, Gana, Indonésia, Brasil, Nigéria, Camarões e Malásia) apresentam sérios problemas, que põe em risco não só as possibilidades de aumento da produção, para atender ao crescimento da demanda, mas, o que é mais grave, até mesmo para manter os volumes atuais.

A Costa do Marfim, que responde por 40% da produção mundial, vem apresentando crescentes dificuldades, para encontrar novas áreas de expansão da cultura cacauífera. Gana obtém frutos de elevada qualidade, mas apresenta crescentes problemas com doenças, baixo uso de fertilizantes e defensivos agrícolas, bem como com o envelhecimento dos cacauais em produção. A Indonésia, sofre com uma praga denominada “broca-do-cacau” (cocoa per borer), de controle desconhecido. De qualquer modo, as estimativas da IOCCC indicam que, na melhor das hipóteses, o controle, uma vez conseguido, representará um aumento de 30% no custo de produção. A Nigéria conseguiu uma rápida recuperação de suas colheitas, a partir de meados dos anos 80, mas, apesar disso, a produção atual (153 mil toneladas em 1997) representa a metade do que o país produzia no início dos anos 70. A República dos Camarões mal consegue superar a marca de 130 mil toneladas, em conseqüência, principalmente das pragas e manejo deficientes das plantações. A Malásia, que produzia 243 mil toneladas no final dos anos 80, consegue colher 110 mil toneladas, em virtude do plantio de outros produtos, de maior rentabilidade e da explosão imobiliária.

Vale ressaltar que a análise dos países asiáticos foi realizada antes da crise econômica que se desencadeou no final de 1997.

Finalmente, o Brasil produzia cerca de 400 mil toneladas de cacau na metade da década dos 80, sendo que a indústria moageira da Bahia, que se implantou entre os anos 60 e 80, figurava entre as quatro maiores do mundo. Tudo isso fazia com que o Brasil deixasse de ser apenas exportador de matéria primas e passasse a fornecer produtos de cacau às principais indústrias chocolateiras do mundo (EUA, CEE, países do Leste Europeu, Japão e outros países da América Latina), além de atender às necessidades dos chocolateiros nacionais.

A partir do início da década dos 90, a situação sofreu profunda e dramática modificação condicionada por três fatores: (1) Baixa cotação internacional do cacau, entre 1989 e 1993; (2) Má distribuição de chuvas entre 1992 e 1997 e (3) predomínio da incidência da “vassoura-de-bruxa”, a partir de 1989.

Como conseqüência, a produção nacional caiu para 175 mil toneladas na safra 1996/97. (...) Em decorrência disso, praticamente metade das indústrias processadoras paralisaram suas operações ou transferiram seus parques industriais para fora do país. Até que, finalmente, a partir de 1995, o Brasil tornou-se importador de cacau.”

PERES FILHO (1998), na conclusão de seu texto, enfatiza que as ações sobre os efeitos negativos da “vassoura-de-bruxa” seriam aquelas que maiores esforços e recursos deveriam ser investidos.

Para SOUZA & DIAS (2001), os principais fatores da atual crise do setor cacauífera no Brasil são: (a) acentuada descapitalização dos cacauicultores, visto o baixo preço do produto no mercado internacional; (b) elevado endividamento dos agricultores para com os exportadores e indústria; (c) baixa competitividade do setor, com altos custos em função de lavouras velhas e decadentes; (d) acentuado desinteresse do Estado em busca de soluções da crise; (e) introdução da “vassoura-de-bruxa”; (f) incompetência da pesquisa em se lançar na busca de genótipos resistentes de modo a antecipar-se à chegada da “vassoura-de-bruxa” e (e) ocorrência de estresse hídrico por mais de seis anos consecutivos na região da cacauicultura baiana que, até então, tinha distribuição adequada. A seca prolongada provocou a morte de cacauíferos e/ou depauperamento das plantações comprometendo a produção por vários anos.

1.2.3.4. Os atores e a correlação de forças

Para uma melhor compreensão do mercado cacauífera é importante mencionar alguns detalhes sobre a correlação de forças entre os participantes na cadeia produtiva do cacau.

1.2.3.4.1. A indústria

Anteriormente foi mencionado que com a alta da cotação do cacau no final da década de 70, instigou um incremento da produção mundial. De acordo com Santos Filho (1995) citado por SOUZA & DIAS, 2001 o ápice dos estoques mundiais ocorreu na safra 1990/91, equivalendo a oito meses do consumo mundial. Mesmo não assumindo integralmente a inocência e idealismo de Adam Smith, o aumento dos estoques mundiais, via aumento da produção mundial (não necessariamente, com aumento na produtividade), provocou a queda dos preços por excesso da oferta.

Dois outros fatores, dignos de registro, mostram como a indústria articulou-se para forçar mais ainda a queda dos preços da matéria prima. A adoção do sistema "just in time" que foi uma modificação da estratégia das indústrias, não apenas das vinculadas ao cacau, proporcionando a redução drástica dos estoques, num determinado instante, por parte dos compradores. Agregue-se, a isso, o fato de que a indústria chocolateira é oligopolista, quase com certeza, cartelizada, estando sob domínio por quatro ou cinco mega-indústrias.

1.2.3.4.2. Os produtores

Na "ponta mais fraca da corda" estão os produtores, que note-se, encontram-se em países de baixo nível de desenvolvimento. Conforme já mencionado, os sete países grandes produtores são: Costa do Marfim, Gana, Indonésia, Brasil, Nigéria, Camarões e Malásia.

Do ponto de vista dos custos de produção, MASCARENHAS *et al.* (1999), constataram que o cacau é uma lavoura intensiva em mão de obra, item que representava 67% do total dos custos. Os insumos respondiam por 18% e outras despesas, 15% (dados médios de 7 diferentes tecnologias no mês de junho de 1997, no estado da Bahia). Admitindo-se a ocorrência da "vassoura-de-bruxa" e considerando apenas a retirada dos galhos infectados, bem como a realização de práticas tradicionais, seria necessário uma produtividade de 15 arrobas de cacau por hectare (225 kg/ha) apenas para a cobertura dos custos. A aplicação do pacote tecnológico completo (incluindo todos os tratamentos culturais, controle da "vassoura-de-bruxa" e da podridão parda) só seria viável economicamente para um patamar de produtividade em torno de 58 arrobas/ha (870 kg/ha). O Quadro 1.3 mostra a produtividade na Bahia, em kg de amêndoas de cacau por hectare, entre as safras 1980/81 a 1997/98.

Quadro 1.3. Produtividade de amêndoas de cacau por hectare na Bahia

Safra	Produtividade (kg/ha)	Safra	Produtividade (kg/ha)
1980/1981	711	1989/1990	551
81/82	615	1990/1991	609
82/83	700	91/92	434
83/84	713	92/93	435
84/85	632	93/94	475
85/86	705	94/95	408
86/87	680	95/96	274
87/88	512	96/97	297
1988/1989	538	1997/1998	272

Fonte: MASCARENHAS *et al.* (1999).

O Quadro 1.4, mostra os níveis de produtividade nos principais estados brasileiros produtores de cacau entre 1990 e 1995.

Nota-se que em todos os casos a produtividade é baixa, quando comparada à necessária para a adoção de maiores níveis tecnológicos. Daí, concluir-se que a viabilidade econômica da irrigação do cacau para o produtor, no nível de capitalização em que se encontra no momento atual, mantidos os preços internacionais nos níveis médios atuais, ainda é uma opção inviável, principalmente levando-se em consideração os custos de implantação do sistema.

Quadro 1.4. Produtividade de cacau nos principais estados brasileiros, produtores de cacau

Unidades da Federação	Produtividade (kg de amêndoas de cacau/ha)					
	Anos					
	1990	1991	1992	1993	1994	1995
Acre	296	328	334	376	173	161
Amazonas	122	74	307	280	266	254
Bahia	543	477	433	457	466	393
Espírito Santo	307	354	583	313	328	182
Mato Grosso	565	470	450	593	420	348
Pará	593	544	572	597	637	554
Rondônia	491	525	467	464	430	458

Fonte: MASCARENHAS *et al.* (1999)

Do ponto de vista econômico e político, enquanto a indústria é um setor altamente organizado, sendo capaz de ditar os preços do mercado internacional, os produtores por sua vez, nem de longe têm a mesma capacidade organizacional.

Tampouco os países produtores possuem políticas e/ou capacidade de aliar-se em torno de interesses comuns. Três exemplos:

Em agosto de 1988 a Costa do Marfim, inconformada com a contínua queda dos preços, retirou-se do mercado por quatro meses, numa tentativa de forçar uma alta dos preços (perceba-se que esse país é o maior produtor, respondendo com uma fatia em torno de 40% da produção mundial). Além de, naquela ocasião, os estoques mundiais estarem em alta, o setor industrial tinha consciência que aquele país não poderia, solitariamente, resistir por longo tempo, haja visto que o cacau é um produto perecível e constitui-se no principal produto de exportação da Costa do Marfim. Passou a comprar o produto de outros países. Resultado: a atitude isolada fracassou (SOUZA & DIAS, 2001).

Num novo esforço, mais articulado, quatro países produtores – Gana, Nigéria, Camarões e Costa do Marfim, que juntos respondem por cerca de 70% da produção mundial – anunciaram que iriam destruir 250 mil toneladas de cacau numa tentativa de elevar os preços internacionais do produto (THE FOOD INSTITUTE REPORT, 2000).

Os resultados dessas e outras estratégias, segundo notícias veiculadas no jornal Gazeta Mercantil entre 19 de Novembro de 2001 a 04 de outubro de 2002, mostram que os preços voltaram a subir atingindo o patamar de US\$ 2.222,00/tonelada, ou o equivalente a, aproximadamente, US\$ 33,33/arroba de 15 kg, acumulando alta superior a 100% nos últimos 12 meses. Estas altas seriam resultantes do aumento da demanda por cacau não refletida no aumento da oferta. Segundo noticiado pelo jornal Gazeta Mercantil de 30 de setembro de 2002, a demanda mundial excedeu, nesta safra, a oferta em 112 mil toneladas, o segundo ano consecutivo de déficit.

Como mencionado anteriormente, o cacau é negociado em bolsas internacionais. A consequência mais evidente deste fato é que os preços são regidos por muitos fatores, sendo vários deles de previsibilidade muito difícil, não somente por parte dos efeitos meteorológicos, como ação de especuladores e até guerras civis em países produtores. A título de exemplo, conforme antecipado no item 1.2.3.2. Panorama do cacau no Brasil e no mercado internacional acompanhe-se as cotações e a conjuntura do mercado no período compreendido entre fins de agosto até o final de outubro de 2002 (Quadro 1.5).

Da seqüência de cotações e fatos, descritos no Quadro 1.5, depreende-se que mesmo os mais fortes atores formadores de preços, ainda que altamente cartelizados, nem sempre têm poder suficiente para decidir sobre os valores atribuídos a uma "commodity", mesmo que esta seja perecível.

No plano de políticas nacionais, no Brasil, em 1976 foi iniciado o PROCACAU, que se revelou um plano mais político do que técnico. SOUZA & DIAS (2001) fazem um longo relato das ações da CEPLAC junto aos produtores nacionais. Elogiam os feitos da empresa desde sua criação em 1957, quando do enfrentamento de uma das crises do setor, mas criticam, de maneira que pode ser considerada ácida, a atuação da mesma empresa no enfrentamento da crise atual. Em uma das vertentes dessa crítica merece destaque a constatação da incapacidade da instituição em organizar os produtores em torno de interesses

comuns e solidariedade, como o caso do cooperativismo, mantendo-os, ao invés, sob o manto de tutela e dependência da instituição, de modo que aqueles negligenciaram, por muito tempo, o papel da modernização das lavouras e das estratégias de gestão.

Quadro 1.5. Cotações e conjuntura do mercado de amêndoas de cacau no período de 29 de agosto a 29 de outubro de 2002

Data*	**Cotação na CSCE US\$/t (US\$/@)	Motivações do Mercado
29/08/2002	2.017,00 (30,25)	Informação por parte da Costa do Marfim (CM), repita-se maior produtor mundial de cacau, de que iria interromper, temporariamente, suas exportações.
19/09/2002	2.131,00 (31,96)	Apreensão do mercado internacional com as notícias da criação de obstáculos à exportação com a ocupação de tropas militares em Abidjã, principal ponto comercial da CM. Tropas rebeldes estariam barrando portos e estradas.
03/10/2002	2.222,00 (33,33)	Maior patamar em 16 anos. Preocupação com enfrentamentos de guerra civil na CM, o que reduz o ritmo da colheita da nova safra.
10/10/2002	2.362,00 (35,43)	Especulação.
11/10/2002	2.325,00 (34,87)	Especuladores estariam liquidando suas posições e realizando os lucros obtidos na semana.
16/10/2002	2.214,00 (33,21)	Recuo da cotação em razão do anúncio de um acordo entre o governo do país, CM, e a guerrilha.
17/10/2002	2.112,00 (31,68)	Anúncio da assinatura do acordo de cessar-fogo na CM. "Com a assinatura do acordo, os especuladores passaram a liquidar suas posições no mercado".
18/10/2002	1.916,00 (28,74)	Maior queda dos preços em 18 anos. A queda ainda refletia o acordo de paz assinado na quinta-feira anterior (17).
22/10/2002	1.966,00 (29,49)	O mercado acreditava que ainda haviam barreiras impedindo o escoamento da produção e também o fato dos imigrantes que trabalham na lavoura ainda não haviam retornado.
23/10/2002	2.036,00 (30,54)	Incertezas quanto ao abastecimento de amêndoas, ainda por problemas militares na CM.
25/10/2002	2.031,00 (30,46)	
28/10/2002	1.972,00 (29,58)	Baixa atribuída à situação de tranquilidade momentânea na CM, e "a realização de lucros por parte dos fundos e especuladores".
29/10/2002	1.889,00 (28,33)	Cotações mais baixas das últimas 10 semanas. As vendas por parte dos fundos e especuladores deram suporte às quedas nas cotações. Exportações voltando a fluir da CM.

Fonte: GAZETA MERCANTIL.

*As datas assinaladas sempre se referem ao dia útil anterior à circulação do jornal, tendo em vista referirem-se aos acontecimentos do dia anterior na CSCE.

**Cotações da amêndoa de cacau para contratos com vencimento em março/2003.

A doença "vassoura-de-bruxa" foi detectada no sul da Bahia em 1989. Em 1995, o governo Federal concedeu uma linha de crédito de R\$ 340 milhões a serem liberados em

quatro anos. Entretanto, até o final de 1997, apenas R\$ 127,4 milhões tinham sido contratados. Naquele ano técnicos e produtores concluíram que o método de controle fitossanitário recomendado – remoção e queima das partes afetadas das plantas e aplicação de fungicidas – não surtiam os efeitos desejados. Ao contrário, contribuíram para a destruição dos cacauais. O resultado foi a paralisação das linhas de financiamento e perda total dos recursos até então liberados. O programa foi então reformulado, com a adoção do sistema de renovação genética. O método se mostrou eficiente e em 1998, nova linha de financiamentos foi aberta. Entretanto, somente em 1999 começaram as liberações, e ainda assim, de pouquíssimos recursos, sendo estancadas as linhas de crédito para revisão das condições de financiamento e repactuação das dívidas já assumidas.³

Em 24 de agosto de 2001, foi editado um decreto federal criando o CDAC – Conselho de Desenvolvimento do Agronegócio do Cacau, integrado por representantes dos governos federal e estadual e do setor privado, cuja missão era propor um novo programa de desenvolvimento para o setor a ser implantado no sul da Bahia. *O programa, que integra o Plano Agrícola e Pecuário a partir de 2002, prevê a liberação de R\$ 489 milhões, em três anos, para renovação de 200 mil hectares de cacau. Segundo o Presidente da República Federativa do Brasil, do total a ser liberado, R\$ 307 milhões serão investidos na substituição de plantas por mudas de clones resistentes à "vassoura-de-bruxa" e adensamento. Em equipamentos de industrialização de subprodutos, que possam agregar valor e aumentar a renda do produtor, serão destinados R\$ 50 milhões. Mais R\$ 132 milhões irão para o custeio e manutenção de áreas clonadas.* O presidente admitiu que as metas do governo são "ousadas": *elevar a produtividade cacauzeira dos atuais 230 quilos por hectare para níveis superiores a 1,5 mil quilos/hectare e a produção brasileira acima das 300 mil toneladas/ano, formando excedentes em torno de 200 mil toneladas anuais. Com esses números o governo espera elevar as receitas cambiais, gerar 100 mil postos de trabalho, manter a produção de cacau auto-sustentável, com a preservação da Mata Atlântica e demais recursos naturais. (...) Em seu pronunciamento, (...) disse que viu o atual quadro desalentador de crise, que reduziu em 75% a produção cacauzeira. (...)*⁴

Em virtude da Costa do Marfim ter anunciado uma redução da oferta do produto (a safra 2002/03 a produção daquele país será de 1,17 milhão de toneladas, volume 4,1% inferior ao da safra anterior), estratégia que não é nova para tentar elevar os preços internacionais do cacau, no Brasil os preços subiram em média 229% nos últimos 12 meses, passando R\$ 31,00/arroba a R\$ 102,00/arroba. *Pari passu* a euforia gerada nos produtores em razão da elevação na cotação do cacau, atos de protesto marcaram a data do primeiro aniversário da assinatura do decreto federal já mencionado. Tais manifestações tiveram como objetivo mostrar o que consideraram como descaso do governo federal pelo atraso e não repasse das verbas anunciadas⁵.

1.2.3.5. A irrigação no contexto

Tendo em vista os problemas econômicos por que passam os produtores, sua cultura, muitas vezes extrativista, utilizando baixo nível tecnológico; problemas de gestão e não organização solidária; baixos preços do cacau, na história recente, no mercado internacional; presença de pragas e doenças, em especial a "vassoura-de-bruxa"; leva a uma falta de pressão social, por desconhecimento ou prioridade, na busca de soluções alternativas em que investimentos estejam envolvidos.

Na Venezuela, por exemplo, numa reunião técnica regional sobre o cacau, do "Proyecto buen cacao", realizada em Maracay, no início de 1998, procedeu-se a um levantamento, entre os participantes, das áreas prioritárias a reforçar. O resultado da ordem de importância, resumidamente, foi 20% para manejo agrônomo, 15% assistência técnica, 11% capacitação dos produtores, 9% comercialização, 9% melhoramento genético. A irrigação mostrou-se prioridade apenas para 1,2% dos pesquisados. Ou seja, apenas doze entre mil produtores de cacau, apontaram a irrigação como uma área de estudos a ser reforçada. Note-se que a Venezuela, é um dos países produtores de cacau que não apresentam precipitação suficiente para suprir as demandas evapotranspirométricas, a produtividade, apontada na

³ Gazeta Mercantil de 28 de Agosto de 2002.

⁴ Boletim Pecuário Ano I - No. 267 - Sábado, 25 de agosto de 2001.

⁵ Gazeta Mercantil de 30 de Agosto de 2002.

mesma reunião é de apenas 219 kg de cacau por hectare por ano, e, no mesmo documento está descrito que os canais de irrigação estão deteriorados.

1.2.3.6. Sobre a cadeia de agronegócios do cacau

O cacau, no seu todo, representa uma cadeia complexa de agronegócios. E como tal, merece uma abordagem que não seja restrita apenas à produção das plantações de cacauzeiros. Existe a necessidade da implantação e fomento de toda uma estrutura, com alta capacidade competitiva, diga-se, de modo a não sujeitar-se aos mandos de alguns atores.

Um exemplo é o complexo de agronegócios da Califórnia, encontrado em ROJAS et al. (2000), que é um dos mais sofisticados e eficientes do mundo, já que se encontra em uma região que é líder em produtividade agrícola, tecnologia de processamento, comercialização e distribuição, qualidade de alimentos e gestão ambiental. Uma das maiores conquistas desse complexo é a produção de bens de alta qualidade e alto valor agregado, com alta eficiência dos recursos naturais. A existência de fatores básicos ajudou em grande medida a formação desse complexo. Entretanto, a maioria dos incentivos foram criados por meio de políticas estatais e nacionais. As ações do governo local e nacional, juntamente com o apoio de associações e fornecedores locais, complementaram o sistema com aspectos como desenvolvimento de infraestrutura de irrigação, transporte, processamento, crédito, programas de P & D e programas de assistência técnica, financeira e comercial. O complexo californiano é um exemplo de sistema produtivo baseado na inovação, por meio da adoção e adaptação progressiva de novas tecnologias.

Tendo em vista a situação descrita se conclui-se que a cacauicultura está vivenciando uma profunda crise internacional. Hoje, a cacauicultura mostra-se economicamente inviável, ao menos, considerando um nível de agricultura tecnificada. Como visto, em parte este fato deve-se ao alto grau de organização, e cartelização, da indústria. Em parte, a problemas climáticos, edáficos, fitossanitários, nível educacional e tecnológico dos produtores, de gestão, etc.

Numa ordem mundial globalizada, altamente competitiva, exigente, e muitas vezes (senão a maioria delas) ainda viciadas com sistemas protecionistas, como por exemplo, reserva de mercado e práticas de subsídios, tornam-se imperativas políticas e estratégias de curto, médio e longo prazos, que viabilizem os setores produtivos nacionais, não apenas como fornecedores de matéria prima, mas também, agregando valor aos produtos e redistribuindo esses valores em toda a cadeia produtiva. Esforços e políticas devem ser exercidas de modo a agregar as forças produtivas e não fragmentá-las, pois a cadeia produtiva é um todo e não uma reunião casual de entes isolados.

1.3. Análise estatística multivariada e séries temporais

Em razão do presente estudo versar sobre as influências e efeitos de diversos elementos meteorológicos sobre o cacauzeiro, no *continuum* da dimensão temporal, as técnicas estatísticas utilizadas foram a análise multivariada e a análise das séries temporais. Enquanto as técnicas estatísticas de análise multivariada são utilizadas para estudos em que várias variáveis são consideradas simultaneamente, as técnicas de análise de séries temporais, como o próprio nome indica, foram desenvolvidas para o estudo comparativo de seqüências de dados de variáveis, tomados simultaneamente ou não, a certos intervalos de tempo.

Para uma melhor compreensão dessas estatísticas, a seguir procura-se descrever, de modo resumido, o embasamento subjacente às técnicas empregadas.

1.3.1. Análise estatística multivariada

Para muitos tipos de dados (biológicos, climáticos, etc.) é comum a correlação entre as variáveis. Assim, as informações providas por análises univariadas isoladas podem ser redundantes em se tratando de um complexo de variáveis. Ou seja, medidas das variáveis que caracterizam um indivíduo podem estar correlacionadas entre si. Essa correlação indica que algumas informações contidas em uma variável também estão contidas em algumas das outras variáveis.

Originalmente as técnicas estatísticas de análise multivariada foram desenvolvidas para resolver problemas nas áreas de Biologia e Psicologia. Entretanto, passaram a ser utilizadas, com sucesso, para resolver uma grande variedade de problemas nas mais diversas áreas do conhecimento. Abordagens detalhadas sobre o assunto são encontradas, dentre outros, em ANDERSON (1959), TATSUOKA (1971), HARRIS (1975), MORRISON (1990), JOHNSON e WICHERN (1992), MANLY (1994) e MARDIA et al. (1997).

Uma classificação sobre as técnicas de análise multivariada é apresentada por KENDALL (1980): (a) técnicas de avaliação de interdependência: análise de componentes principais, correlação canônica, análise de agrupamento, análise fatorial e análise de escala multidimensional; (b) técnicas de avaliação da dependência: análise de regressão, análise da relação funcional, análise da múltipla contingência e análise discriminante.

1.3.1.1. Correlação canônica

A correlação simples, ou correlação de Pearson, representa uma medida do grau de associação entre um par de variáveis. Para estimar a associação entre uma variável, considerada dependente, meramente, do ponto de vista matemático, e um conjunto de duas ou mais variáveis, consideradas matematicamente – não necessariamente estatisticamente – independentes, tem-se a correlação parcial. E, para conhecer a correlação entre dois conjuntos de variáveis, este estudo é feito pela **correlação canônica**.

Desenvolvida por Hotelling em 1935, citado por MORRISON (1990), a correlação canônica representa o processo de maximização da correlação entre duas funções lineares de dois grupos de variáveis aleatórias. Uma função linear de um grupo de variáveis aleatórias, ponderadas de modo a que as variáveis intra-grupo sejam ortogonais entre si, é denominada **variável canônica**.

Assim, a correlação canônica pode ser descrita como uma generalização da correlação de Pearson. É um procedimento estatístico multivariado que permite o exame da estrutura de relações existentes entre dois grupos ou conjuntos de variáveis (ABREU e VETTER, 1978). As correlações canônicas referem-se às correlações entre pares de variáveis canônicas ou seja, entre combinações lineares de variáveis, de tal modo que a correlação entre essas combinações seja máxima. Ao par de combinações lineares que gerem o maior valor de correlação dá-se o nome de *primeiro par canônico*. O *segundo par canônico* é encontrado de tal forma, que a correlação entre as novas combinações lineares seja máxima entre todas as combinações lineares não correlacionadas, ou ortogonais, com o primeiro par canônico. O procedimento continua até que um novo conjunto de coordenadas seja inteiramente especificado.

Conforme TIMM (1975), o objetivo da correlação canônica é encontrar dois grupos de variáveis ou características com vetores ponderados, sujeito à restrição da ortogonalidade de cada variável canônica, ou seja, da não correlação entre as combinações lineares prévias, de modo a maximizar a correlação entre cada par canônico.

O mais importante desta técnica é que ela utiliza um expediente de redução de dados. Dado um grande número de variáveis, pode-se encontrar algumas poucas combinações lineares de variáveis em cada grupo a fim de estudar as inter-relações entre variáveis canônicas e, assim, simplificar a análise em um sistema de coordenadas que permitem clarear as inter-relações (TIMM, 1975).

A metodologia não faz distinção entre os dois grupos de variáveis, do ponto de vista de definir, *a priori*, qual grupo de variáveis, ou seja qual variável canônica constitui-se em uma, matematicamente, dependente e qual a independente. A correlação canônica é meramente uma ferramenta para examinar as inter-relações entre dois grupos de variáveis (DUNTEMAN, 1984).

MIRANDA et al. (1988) estimaram as correlações canônicas entre variáveis agrônomicas e físico-químicas de raízes tuberosas da batata-doce. O primeiro grupo de variáveis, as agrônomicas, foi constituído pelo peso, comprimento e largura da raiz e o segundo, as características físico-químicas, pela percentagem de sólidos totais, proteínas, amido, açúcares totais, fibras, cinzas e brix. Evidenciaram a importância dos sólidos totais e brix sobre o peso das raízes tuberosas.

CORREIA (1993), no estudo de relações entre conjuntos de características do solo e a produtividade do eucalipto, bem como a verificação da interdependência das diferentes

profundidades do solo, concluiu que a análise de correlação canônica foi adequada para o estudo das relações das características do solo entre si e a produtividade do eucalipto. Por meio da correlação canônica, observou-se que a capacidade de troca catiônica do solo é reduzida à medida que aumenta o teor de areia nas maiores profundidades. A análise permitiu ainda concluir que, nas maiores profundidades, a tendência ao amarelecimento do solo correlacionou-se positivamente com o teor de alumínio trocável. Mostrou, também, a diminuição do carbono orgânico com a inclinação da superfície do solo.

Para avaliar a qualidade da madeira de eucalipto para a produção de carvão vegetal, TRUGILHO et al. (1997) aplicaram a análise de correlação canônica entre dois grupos de variáveis, um grupo formado pelas características do carvão vegetal e outro pelas características da madeira. Concluíram que as madeiras que apresentam alta densidade básica, baixo teor de cinzas, alto teor de lignina e que possuem fibras celulares mais espessas são responsáveis pela qualidade e produção do carvão vegetal.

Sob a ótica prática, a técnica da análise de correlação canônica é de grande valia em estudos exploratórios. A partir de um conjunto grande de variáveis, pode-se estudar somente umas poucas combinações lineares de variáveis desse conjunto, quais sejam, aquelas combinações lineares cuja correlação sejam as mais elevada. Uma característica importante da análise de correlação canônica é sua insensibilidade à escala das variáveis, contrariamente à análise dos componentes principais, problema que será descrito no item sobre este segundo tipo de análise.

1.3.1.1.1. Análise de correlação canônica

A análise de correlação canônica caracteriza-se por avaliar as relações entre dois complexos influenciados, no mínimo, por duas características. De maneira genérica, considera-se que o primeiro complexo é estabelecido por p características e o segundo, por q . O número de correlações canônicas é igual ao menor número de características que constitui um dos complexos (p ou q). Assim, considerando dois grupos com p e q variáveis, respectivamente (sendo $p < q$), são estabelecidas p correlações canônicas. Sua magnitude sempre decresce com a ordem em que são estimadas. Entretanto, o primeiro coeficiente é sempre maior ou igual, em valor absoluto, a qualquer coeficiente de correlação simples ou múltipla, entre as características do primeiro e do segundo grupo (CRUZ & REGAZZI, 1997).

Como mencionado rapidamente no item anterior, a análise de correlação canônica baseia-se na determinação de combinações lineares ortogonais, ou seja independência, no caso, em cada conjunto de variáveis. Se esta condição não for satisfeita de início, será necessário descartar as variáveis que são combinações lineares das demais, por encontrar-se redundância de informações em variáveis distintas.

Na análise de correlação canônica tem-se dois grupos de variáveis X e Y , definidos como sendo:

$$X' = [X_1, X_2, \dots, X_p] = \text{vetor das medidas de } p \text{ caracteres que constituem o grupo I}$$

e

$$Y' = [Y_1, Y_2, \dots, Y_q] = \text{vetor das medidas de } q \text{ caracteres que constituem o grupo II}$$

O problema estatístico consiste em estimar a máxima correlação entre as combinações lineares de caracteres do grupo I e do grupo II, bem como estimar os respectivos coeficientes de ponderação das variáveis em cada combinação linear.

Calculando-se U_i e V_i como a $i^{\text{ésima}}$ combinação linear, entre os caracteres dos grupos I e II, tem-se

$$U_i = a_{i1}X_1 + a_{i2}X_2 + \dots + a_{ip}X_p \quad (1.3.1.1)$$

$$V_i = b_{i1}Y_1 + b_{i2}Y_2 + \dots + b_{iq}Y_q \quad (1.3.1.2)$$

Estas combinações lineares são ordenadas em pares (U_i e V_i), em que U_i está relacionado ao conjunto das variáveis de X' e V_i ao conjunto das variáveis de Y' . Estas novas variáveis (U_i e V_i), resultantes do processo, são denominados de **pares canônicos**.

Segundo CRUZ & REGAZZI (1997), dentro dos grupos, cada combinação linear é ponderada por coeficientes que expressam a sua importância naquela associação, chamados coeficientes de ponderação, ou autovetores, a_{ij} e b_{ij} para os dois grupos.

Define-se a primeira correlação canônica como sendo aquela que maximiza o primeiro par canônico (U_1, V_1) , ou seja, a que apresenta o maior coeficiente de correlação de Pearson entre U_1 e V_1 . A segunda correlação canônica possui o segundo maior coeficiente de correlação de Pearson e assim sucessivamente.

A correlação canônica entre as combinações lineares é dada por:

$$r_i = \frac{\text{Cov}(U_i, V_i)}{\sqrt{\text{Var}(U_i) \cdot \text{Var}(V_i)}} \quad (1.3.1.3)$$

em que,

$\text{Cov}(U_i, V_i)$ a covariância entre U_i e V_i ;

$\text{Var}(U_i)$ e $\text{Var}(V_i)$ as estimativas das variâncias de U_i e V_i , respectivamente.

Conforme descrito anteriormente tem-se que:

$$r_1 \geq r_2 \geq \dots \geq r_p \quad (1.3.1.4)$$

Na forma matricial os parâmetros da equação 1.3.1.3 são dadas pelas expressões:

$$\text{Cov}(U_i, V_i) = a_i^t S_{12} b_i \quad (1.3.1.5)$$

$$\text{Var}(U_i) = a_i^t S_{11} a_i \quad (1.3.1.6)$$

$$\text{Var}(V) = b_i S_{11} b_i \quad (1.3.1.7)$$

em que,

S_{12} = matriz $p \times q$ de covariâncias entre as características dos grupos I e II;

S_{11} = matriz $p \times p$ de covariâncias entre as características do grupo I;

S_{22} = matriz $q \times q$ de covariâncias entre as características do grupo II.

a_i = autovetor ou vetor característico ou uma matriz $p \times 1$, contendo os p coeficientes para cada autovalor λ_i correspondente às combinações lineares U_i ;

b_i = autovetor ou vetor característico ou uma matriz $q \times 1$, contendo os q coeficientes para cada autovalor λ_i correspondente às combinações lineares V_i ;

$$a_i = \begin{bmatrix} a_{i1} \\ a_{i2} \\ a_{i3} \\ \vdots \\ a_{ip} \end{bmatrix} \quad b_i = \begin{bmatrix} b_{i1} \\ b_{i2} \\ b_{i3} \\ \vdots \\ b_{iq} \end{bmatrix}$$

a_i^t e b_i^t = matrizes transpostas de a_i e b_i , respectivamente.

Para os casos de se utilizarem variáveis normalizadas, a matriz gerada é a matriz de correlações, R , portanto, têm-se que $S_{12} = R_{12}$, $S_{11} = R_{11}$ e $S_{22} = R_{22}$.

A matriz de correlação, R , gerada da união dos dois grupos de variáveis tem a seguinte estrutura:

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix}$$

em que, R_{21} a matriz transposta de R_{12} ($R_{21} = R_{12}^t$)

MORRISON (1990) relata que a análise de correlação canônica visa encontrar combinações lineares (equações 1.3.1.1. e 1.3.1.2) de tal forma que a função $r_i^2(U_i, V_i)$ seja maximizada.

Pelas equações 1.3.1.3, 1.3.1.5, 1.3.1.6 e 1.3.1.7 tem-se que:

$$r_i^2(U_i, V_i) = \frac{(a_i^t R_{12} b_i)^2}{(a_i^t R_{11} a_i)(b_i^t R_{22} b_i)} \quad (1.3.1.8)$$

Para as estimativas dos vetores a_i e b_i , a maximização da função r_i^2 está sujeita às restrições

$$a_i^t R_{11} a_i = b_i^t R_{22} b_i = 1$$

Estas restrições são necessárias para prover estimadores únicos de a e b e indicam

que cada combinação linear tem variância unitária (CRUZ & REGAZZI, 1997).

Formulado o problema, a sua resolução é realizada pela aplicação dos *multiplicadores de Lagrange*, para obtenção dos vetores \mathbf{a}_i e \mathbf{b}_i . A resolução apresentada aqui é uma transcrição de (CRUZ & REGAZZI, 1997). Para o caso de variáveis normalizadas

$$W = (\mathbf{a}_i^t \mathbf{R}_{12} \mathbf{b}_i)^2 + \lambda_i (1 - \mathbf{a}_i^t \mathbf{R}_{11} \mathbf{a}_i) + \delta_i (1 - \mathbf{b}_i^t \mathbf{R}_{22} \mathbf{b}_i) \quad (1.3.1.9)$$

em que, \mathbf{l} e \mathbf{d} = multiplicadores de Lagrange.

Resolvendo as derivadas parciais da equação 1.3.1.9 em relação a \mathbf{a}_i e \mathbf{b}_i , resulta em

$$(\mathbf{a}_i^t \mathbf{R}_{12} \mathbf{b}_i) \mathbf{R}_{12} \mathbf{b}_i - \lambda_i \mathbf{R}_{11} \mathbf{a}_i = \Phi \quad (1.3.1.10)$$

$$(\mathbf{a}_i^t \mathbf{R}_{12} \mathbf{b}_i) \mathbf{R}_{21} \mathbf{a}_i - \delta_i \mathbf{R}_{22} \mathbf{b}_i = \Phi \quad (1.3.1.11)$$

em que, Φ = vetor nulo de dimensão $\mathbf{p} \times 1$ ou $\mathbf{q} \times 1$.

Pré-multiplicando-se 1.3.1.10 por \mathbf{a}_i^t e 1.3.1.11 por \mathbf{b}_i^t , respeitando-se as restrições definidas anteriormente, e lembrando que para ser independente ou ortogonal, $\mathbf{a}_i^t = \mathbf{a}_i^{-1}$ e $\mathbf{b}_i^t = \mathbf{b}_i^{-1}$ ter-se-á

$$\mathbf{l}_i = \mathbf{l} = \mathbf{d}_i = \mathbf{d} = (\mathbf{a}_i^t \mathbf{R}_{12} \mathbf{b}_i)^2 \quad (1.3.1.12)$$

Assim, sob as restrições descritas, a raiz quadrada do multiplicador de Lagrange \mathbf{l} , ou \mathbf{d} , medirá a máxima correlação entre as combinações lineares das variáveis dos dois conjuntos.

A partir de (1.3.1.10) e (1.3.1.11), obtém-se:

$$\lambda_i \mathbf{a}_i = \mathbf{R}_{11}^{-1} \mathbf{R}_{12} \mathbf{b}_i (\mathbf{a}_i^t \mathbf{R}_{12} \mathbf{b}_i) \quad (1.3.1.13)$$

e

$$\delta_i \mathbf{b}_i = \mathbf{R}_{22}^{-1} \mathbf{R}_{21} \mathbf{a}_i (\mathbf{a}_i^t \mathbf{R}_{12} \mathbf{b}_i) \quad (1.3.1.14)$$

Tomando as equações (1.3.1.12), (1.3.1.13) e (1.3.1.14), obtém-se

$$(\mathbf{R}_{22}^{-1} \mathbf{R}_{21} \mathbf{R}_{11}^{-1} \mathbf{R}_{12} - \lambda_i \mathbf{I}) \mathbf{b}_i = \Phi \quad (1.3.1.15)$$

$$(\mathbf{R}_{11}^{-1} \mathbf{R}_{12} \mathbf{R}_{22}^{-1} \mathbf{R}_{21} - \lambda_i \mathbf{I}) \mathbf{a}_i = \Phi \quad (1.3.1.16)$$

em que, \mathbf{I} = matriz identidade de dimensão $\mathbf{p} \times \mathbf{p}$.

Assim, tem-se que: (a) a $i^{\text{ésimo}}$ correlação canônica (r_i) entre a combinação linear dos caracteres dos grupos I e II é dada por:

$$r_i = \sqrt{\lambda_i} \quad (1.3.1.17)$$

em que, $\mathbf{l}_i = i^{\text{ésimo}}$ autovalor da matriz $\mathbf{R}_{11}^{-1} \mathbf{R}_{12} \mathbf{R}_{22}^{-1} \mathbf{R}_{21}$, seguindo a ordem dada em (1.3.1.4)

e (b) o $i^{\text{ésimo}}$ par canônico é dado por $U_i = \mathbf{a}_i X$ e $V_i = \mathbf{b}_i Y$,

em que:

$\mathbf{a}_i = i^{\text{ésimo}}$ autovetor, ou coeficiente de ponderação, associado ao $i^{\text{ésimo}}$ autovalor da matriz $(\mathbf{R}_{11}^{-1} \mathbf{R}_{12} \mathbf{R}_{22}^{-1} \mathbf{R}_{21})$

$\mathbf{b}_i = i^{\text{ésimo}}$ autovetor, ou coeficiente de ponderação, associado ao $i^{\text{ésimo}}$ autovalor da matriz $(\mathbf{R}_{22}^{-1} \mathbf{R}_{21} \mathbf{R}_{11}^{-1} \mathbf{R}_{12})$

Quando obtidos os autovetores \mathbf{b}_i , os autovetores \mathbf{a}_i , podem ser obtidos pela equação:

$$\mathbf{a}_i = \frac{1}{\sqrt{\lambda_i}} \mathbf{R}_{11}^{-1} \mathbf{R}_{12} \mathbf{b}_i \quad (1.3.1.18)$$

e analogamente, quando obtidos os autovetores \mathbf{a}_i , os autovetores \mathbf{b}_i , podem ser calculados por:

$$b_i = \frac{1}{\sqrt{\lambda_i}} R_{22}^{-1} R_{21} a_i \quad (1.3.1.19)$$

Os autovalores podem ser calculados a partir de duas equações características distintas (equações 1.3.1.15 e 1.3.1.16), a partir de duas matrizes diferentes, uma de ordem p e outra de ordem q . Se $p=q$, bem como as variáveis X_1, X_2, \dots, X_p , assim como as variáveis Y_1, Y_2, \dots, Y_q sejam linearmente independentes, existirão $p=q$ autovalores, l_i não-nulos e $p=q$ pares canônicos. Entretanto, se, $p \neq q$, existirão $|p-q|$ autovalores nulos da matriz $R_{22}^{-1} R_{21} R_{11}^{-1} R_{12}$ e p pares canônicos, se $p < q$, ou q pares canônicos, se $q < p$.

1.3.1.1.2. Teste de significância

A significância da hipótese de que todas as correlações canônicas são nulas, isto é,

$$H_0: \rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_s = 0, \quad s = \text{mínimo}\{p, q\}$$

pode ser avaliada pelo teste aproximado de Chi-quadrado, χ^2 , que segundo Dunteman (1984) citado por CRUZ & REGAZZI (1997), é dado por:

$$\chi^2 = -t \cdot \ln \left(\prod_{i=1}^s (1 - r_i^2) \right) \quad (1.3.1.20)$$

em que,

$$t = [n - 0,5(p+q+3)]$$

n = número de observações experimentais para cada variável.

Esta estatística está associada a pq graus de liberdade. Se a hipótese for rejeitada, testa-se uma nova hipótese de nulidade:

$$H_0: \rho_k > 0 \text{ e } \rho_{k+1} = \rho_{k+2} = \dots = \rho_s = 0$$

por meio da expressão

$$\chi^2 = -t \cdot \ln \left(\prod_{i=k+1}^s (1 - r_i^2) \right) \quad (1.3.1.21)$$

que está associada a $(p-k)(q-k)$ graus de liberdade.

1.3.1.2. Componentes principais

A análise de componentes principais é uma técnica de análise multivariada que consiste em transformar um conjunto original de variáveis em outro conjunto, os *componentes principais*, de dimensões equivalentes, porém com algumas propriedades importantes que adiante serão discutidas.

Segundo JEFFERS (1972), a técnica de componentes principais possui os seguintes propósitos: (i) examinar as correlações entre as variáveis estudadas; (ii) resumir um grande conjunto de variáveis em um outro menor e de qualidade equivalente; (iii) avaliar a importância de cada variável e promover a eliminação daquelas que contribuem pouco, para a variância total, no grupo de indivíduos avaliados; (iv) construir índices que possibilitem o agrupamento de indivíduos; (v) permitir o agrupamento de indivíduos com o mais alto grau de similaridade, mediante exames visuais em dispersões gráficas no espaço bi ou tridimensional.

Se algumas variáveis que caracterizam um indivíduo estão correlacionadas entre si, então, existem informações contidas em uma variável que também estarão contidas em outras variáveis. A análise de *componentes principais* procura transformar a quantidade de variáveis originais correlacionadas na mesma quantidade de variáveis não-correlacionadas, ou seja, componentes ortogonais. Segundo KIM (1975), os componentes principais podem ser considerados transformações matemáticas exatas e ortogonais dos dados originais. Os componentes principais são combinações lineares de todas as variáveis originais, sendo independentes entre si, e estimados com o propósito de reter o máximo das informações contidas nos dados originais, em termos da variância total.

Entretanto, a análise dos componentes principais não visa, necessariamente, a redução de um grande número de variáveis originais em um pequeno número de variáveis transformadas. Se as variáveis originais não são correlacionadas entre si, a análise é absolutamente nula, em termos de redução do número de variáveis. Segundo MANLY (1994), os melhores resultados são obtidos quando as variáveis originais são altamente correlacionadas, positiva ou negativamente, entre si. Se esta situação desejável ocorrer, os componentes principais adquirem maior importância. Também será de grande valor verificar a existência de redundância nos efeitos medidos pelas variáveis originais. Neste caso, é perfeitamente aceitável que um grande número de variáveis originais sejam representadas por dois ou três componentes principais.

Em um trabalho com o objetivo de avaliar a distribuição de áreas com adoção de plantio direto em diferentes regiões do estado do Paraná, SILVA (2001), correlacionou – entre outras técnicas multivariadas, a análise de componentes principais – dados meteorológicos, médias de 2 períodos do ano (outono/inverno e primavera/verão) e características de perfis e posições na paisagem de solos de 42 localidades. Concluiu que (i) localidades com clima Cfa (classificação de Köppen) podem ter áreas com plantio direto no máximo até 20% do total do estado, principalmente no período primavera/verão; (ii) os locais com clima Cfb podem ter área com plantio direto acima de 20% do total do estado, principalmente no período primavera/verão; e (iii) as condições climáticas, na maioria dos casos, suplantam as características do solo para a utilização do plantio direto em determinada área.

1.3.1.2.1. Análise dos componentes principais

A análise dos componentes principais consiste em encontrar-se os denominados *autovalores* e correspondentes *autovetores* de uma matriz de variâncias-covariâncias. Nessa matriz simétrica, os elementos da diagonal principal são as variâncias das variáveis e os demais elementos, os valores de covariâncias entre pares de variáveis.

Seja uma matriz na qual se tem um conjunto de p variáveis observadas ($X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_p$) para cada indivíduo i , perfazendo um total de n indivíduos. Esta será, então, uma matriz de ordem $n \times p$:

		VARIÁVEIS					
		X_1	X_2	\dots	X_j	\dots	X_p
INDIVÍDUOS	1	X_{11}	X_{12}	\dots	X_{1j}	\dots	X_{1p}
	2	X_{21}	X_{22}	\dots	X_{2j}	\dots	X_{2p}
	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
	i	X_{i1}	X_{i2}	\dots	X_{ij}	\dots	X_{ip}
	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
n	X_{n1}	X_{n2}	\dots	X_{nj}	\dots	X_{np}	

Percebe-se que quanto maior o número de variáveis, mais difícil a comparação entre indivíduos baseando-se diretamente nos valores destas variáveis. Esta dificuldade aumenta quando existem correlações entre as variáveis, caso muito comum quando se estuda variáveis biológicas ou climáticas. Quando o estudo enfoca variáveis não são correlacionadas entre si, apenas uma ou duas delas apresentando grande variância e as demais com pequenas variâncias, pode-se descartar estas últimas variáveis, com pequenas variâncias e comparar-se apenas os indivíduos com as variáveis que apresentem as maiores variâncias. Porém, este caso é hipotético dificilmente é encontrado na prática.

Do ponto de vista matemático-estatístico a análise dos componentes principais busca transformar o conjunto original das variáveis observadas ($X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_p$) em um novo conjunto de variáveis, denominados componentes principais, ($Y_1, Y_2, \dots, Y_i, \dots, Y_p$), que obedeça as seguintes propriedades:

a) se Y_i é um componente principal, então Y_i é uma combinação linear de X_j

$$Y_i = a_{i1}X_1 + a_{i2}X_2 + \dots + a_{ip}X_p \quad (1.3.1.22)$$

De modo análogo para outro componente Y_i

$$Y_i = a_{i1}X_1 + a_{i2}X_2 + \dots + a_{ip}X_p \quad (1.3.1.23)$$

sujeitos à restrição:

$$\sum_{j=1}^p a_{ij}^2 = \sum_{j=1}^p a_{i'j}^2 = 1 \quad (1.3.1.24)$$

A equação (1.3.1.22), que define o componente principal (Y_i), representa todas as p possibilidades de a_{ij} que satisfazem a restrição (1.3.1.24). Neste caso os coeficientes de ponderação a_{ij} seriam semelhantes aos pesos de ponderação da contribuição da variável X_j no componente principal Y_i .

Em notação matricial,

$$|Y| = |a| \cdot |X|$$

b) os componentes principais Y_i e $Y_{i'}$ não sejam correlacionados entre si, ou descrito de outra forma, sejam independentes:

$$\text{Cov}(Y_i, Y_{i'}) = 0 \quad (1.3.1.25)$$

ou ainda, o que vem a ser o mesmo, para os componentes principais Y_i e $Y_{i'}$

$$\sum_{j=1}^p a_{ij} a_{i'j} = 0 \quad (1.3.1.26)$$

c) Dentre todos os componentes, o maior valor de Y_i é o que apresenta a maior variância. O segundo maior valor de Y_i , a segunda maior variância, e assim sucessivamente, ou seja:

$$\text{Var}(Y_1) \geq \text{Var}(Y_2) \geq \dots \geq \text{Var}(Y_p) \quad (1.3.1.27)$$

e

d) Existindo p componentes principais, o somatório das variâncias de cada componente principal (Y_i) é igual ao somatório das variâncias de cada variável original (X_j).

$$\sum_{i=1}^p \text{Var}(Y_i) = \sum_{j=1}^p \text{Var}(X_j) \quad (1.3.1.28)$$

Com base nessas propriedades, o problema pode ser resolvido a partir da matriz de variâncias-covariâncias, denominada \mathbf{S} , chamada de *matriz de dispersão*, ou a partir da *matriz de correlação*, \mathbf{R} , entre as variáveis.

O procedimento estatístico consiste em estimar os coeficientes de ponderação, a_{ij} , das variáveis em cada componente, de modo que a *variância a elas associada seja maximizada*, observadas as propriedades citadas.

1.3.1.2.1.1. Solução com base na matriz de covariância

Dado um conjunto de variáveis (X_1, X_2, \dots, X_p), a matriz de variância-covariância, \mathbf{S} , será dada por:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} \text{Var}(X_1) & \text{Cov}(X_1, X_2) & \dots & \text{Cov}(X_1, X_p) \\ \text{Cov}(X_1, X_2) & \text{Var}(X_2) & \dots & \text{Cov}(X_2, X_p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Cov}(X_1, X_p) & \text{Cov}(X_2, X_p) & \dots & \text{Var}(X_p) \end{pmatrix}$$

Sendo \mathbf{S} uma matriz simétrica de variâncias e covariâncias, de dimensão $p \times p$, com termos a_{ij} , de onde os autovalores (λ_i) e os autovetores (\mathbf{a}_i) serão extraídos, a solução é obtida resolvendo-se o sistema:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \text{Var}(X_1) & \text{Covar}(X_1, X_2) & \dots & \text{Covar}(X_1, X_j) & \dots & \text{Covar}(X_1, X_p) \\ \text{Covar}(X_1, X_2) & \text{Var}(X_2) & \dots & \text{Covar}(X_2, X_j) & \dots & \text{Covar}(X_2, X_p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Covar}(X_1, X_j) & \text{Covar}(X_2, X_j) & \dots & \text{Var}(X_j) & \dots & \text{Covar}(X_j, X_p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Covar}(X_1, X_p) & \text{Covar}(X_2, X_p) & \dots & \text{Covar}(X_j, X_p) & \dots & \text{Var}(X_p) \end{pmatrix}}_{\mathbf{S}} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} a_{i1} \\ a_{i2} \\ \vdots \\ a_{ij} \\ \vdots \\ a_{ip} \end{pmatrix}}_{\mathbf{a}_i} = \lambda_i \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} a_{i1} \\ a_{i2} \\ \vdots \\ a_{ij} \\ \vdots \\ a_{ip} \end{pmatrix}}_{\mathbf{a}_i}$$

Ou, descrito de outra forma:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \text{Var}(X_1) & \text{Covar}(X_1, X_2) & \dots & \text{Covar}(X_1, X_j) & \dots & \text{Covar}(X_1, X_p) \\ \text{Covar}(X_1, X_2) & \text{Var}(X_2) & \dots & \text{Covar}(X_2, X_j) & \dots & \text{Covar}(X_2, X_p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Covar}(X_1, X_j) & \text{Covar}(X_2, X_j) & \dots & \text{Var}(X_j) & \dots & \text{Covar}(X_j, X_p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Covar}(X_1, X_p) & \text{Covar}(X_2, X_p) & \dots & \text{Covar}(X_j, X_p) & \dots & \text{Var}(X_p) \end{pmatrix}}_{\mathbf{S}} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} a_{i1} \\ a_{i2} \\ \vdots \\ a_{ij} \\ \vdots \\ a_{ip} \end{pmatrix}}_{\mathbf{a}_i} - \lambda_i \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}}_{\text{Matriz Identidade}} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} a_{i1} \\ a_{i2} \\ \vdots \\ a_{ij} \\ \vdots \\ a_{ip} \end{pmatrix}}_{\mathbf{a}_i} = \mathbf{0}$$

$$(\mathbf{S} - \lambda_i \mathbf{I}) \mathbf{a}_i = \mathbf{0} \quad (1.3.1.29)$$

em que,

λ_i = raízes características (ou autovalores) da matriz \mathbf{S} . Existirão p autovalores correspondentes às variâncias de cada um dos p componentes principais;

\mathbf{I} = matriz identidade de dimensão $p \times p$;

\mathbf{a}_i = autovetor ou vetor característico ou uma matriz $p \times 1$, contendo os p coeficientes para cada autovalor λ_i correspondente ao componente principal Y_i ;

$$\mathbf{a}_i = \begin{pmatrix} a_{i1} \\ a_{i2} \\ a_{i3} \\ \vdots \\ a_{ip} \end{pmatrix}$$

que deve obedecer à propriedade já mencionada:

$$\sum_{j=1}^p a_{ij}^2 = 1, \text{ tal que } a_{ij} \neq 0 \quad (1.3.1.30)$$

ou o mesmo que $\mathbf{a}_i^t \cdot \mathbf{a}_i = 1$, em que, \mathbf{a}_i^t = matriz transposta de \mathbf{a}_i .

Do exposto, \mathbf{F} deve, necessariamente, ser um vetor nulo, de dimensão $p \times 1$.

Como a solução do sistema (1.3.1.29) deve ser tal que $\mathbf{a}_i \neq \mathbf{0}$, impõe-se a condição de que o determinante de $(\mathbf{S} - \lambda_i \mathbf{I})$ seja nulo [$\text{Det}(\mathbf{S} - \lambda_i \mathbf{I}) = 0$] para que o sistema se torne indeterminado e a solução possa ser escolhida dentre aquelas que satisfaçam à restrição $\mathbf{a}_i^t \cdot \mathbf{a}_i = 1$.

Resolvido o sistema, obtém-se os p autovalores ou raízes características, λ_i . A soma destes autovalores deverá ser igual à soma dos termos da diagonal da matriz \mathbf{S} , ou seja, a soma das variâncias das variáveis X_j . Lembrando que $\text{Var}(Y_i) = \lambda_i$:

$$\sum_{i=1}^p \text{Var}(Y_i) = \sum_{i=1}^p \lambda_i = \sum_{j=1}^p \text{Var}(X_j) \quad (1.3.1.31)$$

Encontrados os autovalores, l_i , substituindo-os na equação (1.3.1.29) e resolvendo, obtém-se para cada autovalor, l_i , os autovetores correspondentes, \mathbf{a}_i , ou seja, os próprios componentes principais, \mathbf{Y}_i (equação 1.3.1.22).

MORRISON (1990) define o **primeiro componente principal**, \mathbf{Y}_1 , como uma combinação linear das variáveis estudadas cujos coeficientes de ponderação (com $\mathbf{i}=\mathbf{1}$) - vetor característico (\mathbf{a}_1) - \mathbf{a}_{1j} ($j=1, 2, \dots, p$) estão associados à maior raiz característica, l_1 , da matriz de covariância (ou correlação) das variáveis.

Se $\mathbf{a}_1^t \cdot \mathbf{a}_1 = 1$ (em que, \mathbf{a}_1^t é a matriz transposta de \mathbf{a}_1), então l_1 é interpretado como a *variância amostral do primeiro componente*. Note-se que para satisfazer a essa condição, a matriz $\mathbf{a}_1^t = \mathbf{a}_1^{-1}$ (ou seja a matriz transposta, \mathbf{a}_1^t , de \mathbf{a}_1 , é igual à matriz inversa, \mathbf{a}_1^{-1} , de \mathbf{a}_1), indicando que os componentes de \mathbf{a}_1 e \mathbf{a}_1^t são ortogonais, ou seja independentes entre si.

DUNTEMAN (1984) e MORRISON (1990) demonstram que a variância associada a cada componente principal é estimada pelas raízes características (l_i) da matriz \mathbf{S} e os coeficientes de ponderação (\mathbf{a}_{ij}), pelos elementos dos vetores característicos correspondentes.

Então, por definição, os autovalores, l_i , são ordenados com magnitudes decrescentes

$$l_1 \geq l_2 \geq \dots \geq l_p$$

1.3.1.2.1.2. Solução com base na matriz de correlação

Mutatis mutandi a análise de componentes principais pode ser executada com base na *matriz de correlação* (\mathbf{R}), ao invés da *matriz de variâncias-covariâncias* (\mathbf{S}). Ressalte-se que ao se realizar duas análises de componentes principais, com os mesmos dados, utilizando a matriz \mathbf{S} ou matriz \mathbf{R} , os resultados serão diferentes.

Um problema é que os coeficientes dos componentes principais são dependentes das magnitudes das medidas associadas a cada variável. Esse aspecto é discutido por DUNTEMAN (1984) e MARDIA et al. (1997). É aconselhável, então, que as variáveis estudadas possuam a mesma ordem de grandeza e dimensões não muito discrepantes – ou seja, variâncias com semelhantes ordens de magnitude. Como na maioria das vezes isto não ocorre, recomenda-se utilizar as variáveis reduzidas, ou seja, variáveis normalizadas com média nula e variância igual à unidade, ou ainda, variáveis normalizadas apenas com a variância igual a unidade. Isto significa que a matriz de covariância, \mathbf{S} , será transformada em uma matriz de correlações, \mathbf{R} , antes que a análise de componentes principais seja conduzida.

$$Z_{ij} = \frac{(X_{ij} - \bar{X}_j)}{s_j} \quad (1.3.1.32)$$

em que,

Z_{ij} = $j^{\text{ésima}}$ variável normalizada da $i^{\text{ésima}}$ observação,

X_{ij} = $i^{\text{ésima}}$ observação da $j^{\text{ésima}}$ variável original,

\bar{X}_j = média das observações da $j^{\text{ésima}}$ variável,

s_j = desvio padrão das observações da $j^{\text{ésima}}$ variável.

Caso contrário, a variável com a maior variância possuiria maior peso na estimação dos componentes, sendo este peso mormente em função das magnitudes de medida do que propriamente da estrutura básica das observações. A padronização das variáveis assegura que todas elas possuam, inicialmente, igual peso na análise (MANLY, 1994).

Como a matriz de correlação, \mathbf{R} , das variáveis X_j é igual a matriz de covariâncias das variáveis normalizadas, \mathbf{S}_z , então esta solução é equivalente aos procedimentos anteriormente demonstrados, mas não necessariamente idêntica nos resultados finais, em termos numéricos.

Neste caso algumas observações simplificadoras podem ser observadas:

Como a variância das variáveis normalizadas, $\text{Var}(Z_j)$ é unitária, as correlações entre as variáveis (Z_j) e seus respectivos componentes (Y_i) (equação 1.3.1.22) podem ser avaliadas à partir das magnitudes de seus coeficientes de ponderação ($\mathbf{a}_{11}, \mathbf{a}_{12}, \dots, \mathbf{a}_{1p}$).

Daí, depende-se que o somatório das variâncias será igual à quantidade de variáveis em análise:

$$\sum_{i=1}^p \lambda_i = p \quad (1.3.1.33)$$

É importante, novamente, ressaltar que ao serem realizadas duas análises de componentes principais, com os mesmos dados, uma utilizando a matriz **S** e outra utilizando a matriz **R**, haverá resultados diferentes. Portanto, esta técnica não é univariante com a mudança da escala.

Seja **R** a matriz de covariâncias entre as variáveis normalizadas ($Z_1, Z_2, \dots, Z_i, \dots, Z_p$), ou matriz de correlações entre as variáveis com base nos dados originais (X_1, X_2, \dots, X_p), tem-se então

$$\mathbf{R} = \begin{vmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1p} \\ r_{12} & 1 & \dots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{1p} & r_{2p} & \dots & 1 \end{vmatrix}$$

De modo análogo à equação (1.3.1.29) o sistema para calcular os autovalores, λ_i , da matriz de correlação, é o mesmo descrito para a matriz **S**, apenas, substituindo-a por **R**, ou seja

$$(\mathbf{R} - \lambda_i \mathbf{I}) \mathbf{a}_i = \mathbf{F} \quad (1.3.1.34)$$

Em termos geométricos, o primeiro autovalor, λ_1 , representa o vetor de maior comprimento; o segundo autovalor, um segundo vetor em comprimento, estando situado ortogonalmente em relação ao primeiro, e assim sucessivamente, num espaço multidimensional.

Do mesmo modo, os elementos de cada um dos autovetores, \mathbf{a}_{ij} , encontrados, são simplesmente coeficientes de equações lineares que transformam os dados originais em contagens (escores) indicativas da respectiva "carga" sobre os eixos correspondentes. Desse modo, utilizando-se da multiplicação da matriz de dados originais pela matriz dos autovetores, \mathbf{a}_{ij} , obtém-se uma matriz de dados transformados que representam projeções dos pontos, no espaço multidimensional, sobre os diversos componentes principais.

A importância relativa de um componente será, então, avaliada pela percentagem da variância total que ele explique. A soma dos k primeiros autovalores dividida pela soma de todos os autovalores $(\lambda_1 + \dots + \lambda_k) / (\lambda_1 + \dots + \lambda_p)$ representará, desta forma, a proporção da variância total explicada pelos primeiros k componentes principais, ou seja a proporção da informação retida na redução de p para k dimensões (MORRISON, 1990).

O problema de quantos componentes são necessários para explicar satisfatoriamente a variância do sistema, ou que parte da variância total de um sistema deveria ser explicado, é uma questão, ainda, não resolvida. De modo geral, a literatura sobre a utilização de componentes principais nas diversas áreas de aplicação, mostra que para interpretar os dados com sucesso, é bastante escolher os k primeiros componentes que acumulem uma percentagem de variâncias explicada igual ou superior a 70%. Para CRUZ & REGAZZI (1997), em estudos sobre divergência genética entre cultivares é desejável que a variância acumulada nos dois primeiros componentes principais exceda a 80%.

Uma regra prática para desconsiderar os componentes de menor importância é eliminar os componentes principais com variância inferior à variância média das variáveis originais.

$$\text{Variância média} = \frac{\sum_{i=1}^p \lambda_i}{p} \quad (1.3.1.35)$$

Esse procedimento, quando os componentes principais são obtidos a partir da matriz de correlação, equivale a desconsiderar os componentes associados a autovalores (λ_i) inferiores a 1, pois nesse caso, tem-se que, como

$$\sum_{i=1}^p \lambda_i = p \quad (1.3.1.33)$$

a variância média será igual a

$$p/p = 1 \quad (1.3.1.36)$$

A importância de cada componente principal, Y_i , poderá, então, ser avaliada pela sua correlação com cada variável Z_j , ou seja:

$$r_{z_j, y_i} = a_{ij} \frac{\sqrt{\text{Var}(Y_i)}}{\sqrt{\text{Var}(Z_j)}} = \sqrt{\lambda_i} \frac{a_{ij}}{\text{Var}(Z_j)} \quad (1.3.1.37)$$

1.3.1.2.2. Eliminação de variáveis

Em algumas situações, algumas das p variáveis podem ser eliminadas examinando as correlações definidas pela equação (1.3.1.37). Se uma variável não tem correlação significativa com um determinado componente principal, infere-se que essa variável não contribui significativamente na variância desse componente. Então, eliminando-se tal variável, a fração da variância explicada por esse componente principal seria, em tese, muito pouco alterada. Entretanto, o risco que se corre é que esta variável pode estar significativamente correlacionada com algum outro componente principal e neste caso sua eliminação diminuiria a variância explicada por esse outro componente principal. Por estas razões, geralmente são eliminadas somente aquelas variáveis que não estão correlacionadas com os componentes principais retidos para análise, ou seja, aqueles cuja somatória da contribuição para a variância total ultrapasse o limite preestabelecido.

Outra maneira de analisar a questão é baseada no princípio de que a importância ou a variância dos componentes principais decresce do primeiro para o último. Tem-se, pois, que os últimos componentes são responsáveis pela explicação de uma fração muito pequena da variância total. Assim, as variáveis que apresentam as maiores correlações com os componentes principais de menor importância – componentes de menores variâncias ou menores autovalores, λ_i – provavelmente sejam as menos importantes na explicação da variância total, podendo-se dessa forma serem eliminadas.

JOLLIFFE (1972, 1973), avaliando dados reais e simulados, com quatro métodos de descarte de variáveis, conclui que no caso de serem utilizados os componentes principais, os resultados serão mais satisfatórios se o número de variáveis rejeitadas for igual ao número de componentes cujas variâncias sejam inferiores a 0,7. Este critério é estabelecido para os casos em que os dados sejam padronizados e, assim sendo, estimam-se os autovetores a partir da matriz de correlações, e sua soma corresponde ao total de variáveis analisadas.

1.3.1.2.3. Rotação em componentes principais

Para que a análise dos componentes principais seja de utilidade máxima, é necessário que seja possível associar-se um significado físico a esses componentes. Isto é, o componente principal deve ter significado representativo em termos do problema que analisado.

Para ajudar na interpretação dos componentes principais é, às vezes, desejável fazer uma transformação ortogonal na matriz de fatores de carga na esperança de produzir uma matriz de fatores de carga que tenha a propriedade de aprimorar os significados dos componentes principais (HAAN, 1977).

O propósito da rotação em componentes principais é interpretar a estrutura de um conjunto de dados multivariados a partir da respectiva matriz de variâncias-covariâncias. Essa técnica parte do procedimento básico em que os fatores de carga são transformados matematicamente de forma que os eixos, ortogonais, dos autovetores dos componentes principais sejam rotacionados com o objetivo de maximizar os maiores valores dos fatores de

carga e, por outro lado, minimizar os valores mais baixos dos fatores de carga, possibilitando com essa técnica obter resultados mais facilmente interpretáveis.

Os fatores de carga, que atuam de maneira similar aos pesos de ponderação aplicados às médias ponderadas, são os próprios coeficientes de correlação entre cada variável e os componentes principais (equação 1.3.1.37), sendo por isso a rotação em componentes principais também conhecida por **análise fatorial**.

Na análise dos componentes principais é importante destacar que cada variável original apresenta uma contribuição para a formação de cada fator, ou componente, a qual é quantificada a partir dos autovalores, que resulta no grau de correlação, denominado fator de carga entre cada variável e cada fator ou componente principal (ACOSTA, 1997).

O primeiro passo do procedimento desta técnica consiste em calcular o ângulo de rotação (q) dos componentes principais de forma, já mencionada anteriormente, que os maiores fatores de carga de cada componente principal seja maximizado e os menores sejam minimizados, permitindo uma maior clareza na análise de identificação de grupos.

HARMAN (1968) apresenta dois métodos de cálculo do ângulo de rotação dos fatores, “*quartimax*” e “*varimax*”, sendo este último uma modificação do primeiro. O método *varimax* será descrito a seguir.

De acordo com McBOYLE (1973), o método de rotação *varimax* é o que fornece resultados mais satisfatórios em estudos climáticos. Em estudos de classificação climática, após terem testados vários outros métodos, MARTINS (1991) e ANDRADE (1995) adotaram o método *varimax* de rotação ortogonal.

Inicialmente, os fatores de carga de cada variável X_j do par de componentes principais, que serão submetidos ao critério *varimax* de rotação, devem ser “normalizados” gerando os fatores de carga x_j e y_j . Lembrando que cada vetor x_j ortogonal ao x_j' , temos que a rotação entre dois componentes principais representa a movimentação dos eixos x e y no plano de referência, mantida a origem dos eixos (Figura 1.9).

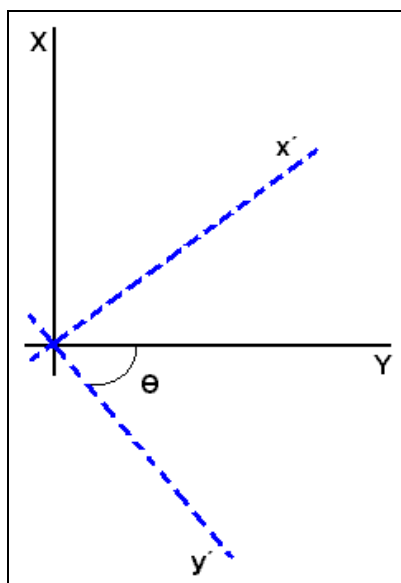


Figura 1.9. Ilustração da rotação dos eixos X e Y em x' e y' segundo um ângulo q .

Quando a rotação é realizada entre três componentes principais essa movimentação dos eixos, X , Y e Z ocorre no espaço tridimensional. Pode ser imaginado como um cubo que, mantido fixo um dos seus vértices, é movimentado segundo dois ângulos q e w . Acima de 4 componentes a rotação não pode mais ser visualizada, embora seja matematicamente perfeitamente aceitável. Na terminologia recente seria denominada rotação no hiperespaço (KAKU, 1998).

Determinado os ângulos das rotações tem-se então a matriz ortogonal T de transformação dos fatores de carga originais, cuja estrutura para dois componente principais é:

$$T = \begin{vmatrix} \cos \phi & -\text{sen } \phi & 0 & \dots & 0 \\ \text{sen } \phi & \cos \phi & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{vmatrix} \quad (1.3.1.38)$$

A matriz de transformação T possui a mesma dimensão da matriz L , ou seja $p \times p$. A matriz L dos fatores de carga, contém as correlações entre as variáveis originais e os componentes principais.

Observe-se que o produto $T.T^t = I$, indicando que são ortogonais.

A matriz L , dos fatores de carga, é a matriz que contém as correlações entre as variáveis originais e os componentes principais. L pode ser rotacionado pela matriz ortogonal T de forma que as correlações entre as variáveis e os componentes sejam alteradas.

Conforme é demonstrado por HAAN (1977), basicamente a rotação *varimax* envolve cálculos com a matriz ortogonal de rotação T , produzindo uma matriz de fatores de carga rotacionados L^* , tal que $L^* = LT$. Esta operação, cujo objetivo já foi citado anteriormente, visa maximizar as correlações mais elevadas e minimizar as correlações mais baixas entre as variáveis e os componentes principais. Isto simplifica a interpretação dos componentes principais ou as suas associações. Uma vez calculada a matriz dos fatores de carga rotacionados L^* , por sua vez os componentes principais rotacionados Y_i^* podem ser calculados por

$$Y_i^* = Z_{ij} R^{-1} L^* D_\lambda^{1/2} \quad (1.3.1.39)$$

em que,

Z_{ij} = matriz das variáveis Z_{ij} padronizadas;

R^{-1} = inversa da matriz de correlação R das variáveis originais;

D_λ = matriz diagonal $p \times p$, cujos elementos são os autovalores I_i ou raízes características da matriz R .

Os procedimentos de obtenção da matriz R e dos autovalores I_i são os mesmos apresentados no item 1.3.1.2.1. Análise dos Componentes Principais.

1.3.2. Análise de séries temporais

Fisicamente pode-se interpretar um evento como sendo parte de uma série, ou em um caso particular - a culminação - de um ou mais acontecimentos. Numa analogia ao cone de luz de HAWKING (1988) a ocorrência e, ou existência de um evento E numa estrutura espaço-temporal tridimensional - duas espaciais e uma temporal - poder-se-ia representar o passado, juntamente com os acontecimentos que determinaram a existência do evento E , no presente, quando ocorre o evento E , e o futuro, juntamente com os acontecimentos que de maneira mais, ou menos, direta dependem da ocorrência do evento E , conforme a Figura 1.10. Observe-se que nessa figura os eventos P_1 , P_2 e P_3 não estão ligados ao evento E . Assim, E é totalmente independente, estatisticamente é denominado ortogonal, de P_1 , P_2 e P_3 , embora nada se possa afirmar sobre a ortogonalidade entre P_1 , P_2 e P_3 .

Daí decorre que todo e qualquer evento é condicionado, mais, ou menos, vigorosamente, por uma série de acontecimentos ligados a seu passado. Neste trabalho nem de longe se tem a pretensão de discutir a dimensão tempo do ponto de vista físico. Detalhes podem ser encontrados em DAVIES (2002). Para os propósitos deste estudo é plenamente satisfatória a visão newtoniana da mecânica clássica, na qual o tempo tem passagem contínua e é dissociada das dimensões espaciais. Se for acompanhada a evolução de uma variável ao longo da chamada "flecha do tempo", os dados, ordenados na seqüência de sua ocorrência, comporão uma **série temporal**. Ou seja, uma seqüência cronologicamente ordenada dos valores assumidos por uma variável, coletados ao longo do tempo em intervalos, não necessariamente - ainda que preferencialmente - regulares é denominada *série temporal*, que pode ser representada por:

$$y_1, y_2, y_3, \dots, y_{t-2}, y_{t-1}, y_t, y_{t+1}, y_{t+2}, \dots$$

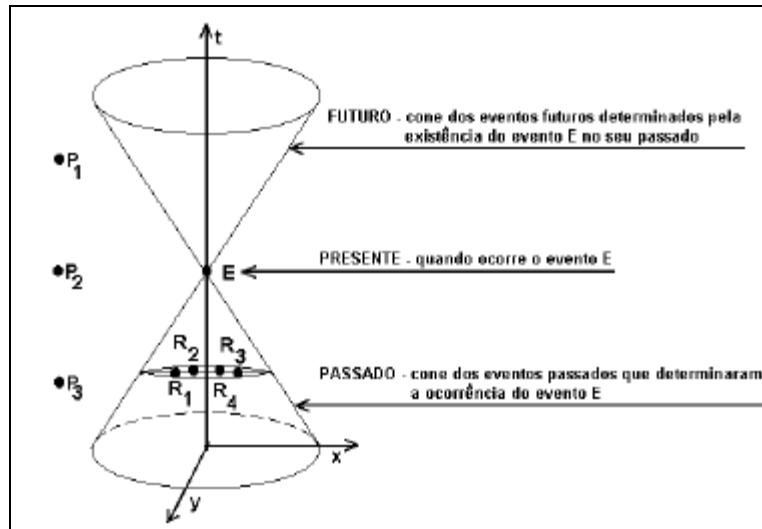


Figura 1.10. Representação esquemática do passado, presente e futuro em uma estrutura espaço-tempo tridimensional.

A Figura 1.11 representa um exemplo de série temporal, na qual estão apresentadas as temperaturas médias mensais no período de janeiro/1989 a dezembro/1995, para a Estação Experimental Filogônio Peixoto (ESFIP) no município de Linhares, ES.

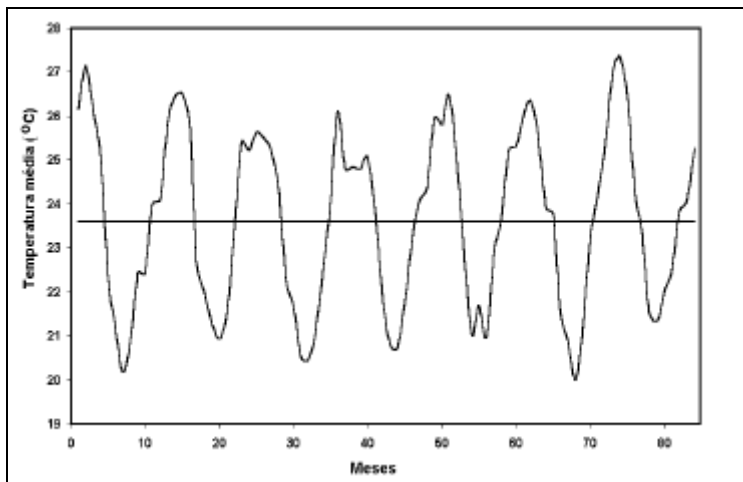


Figura 1.11. Temperaturas médias mensais no período de jan/89 a dez/95 para Linhares, ES.

Essa série temporal pode ser finita ou infinita dependendo da variável e da escala temporal em que esteja sendo avaliada. Por exemplo, a série temporal da variável altura de uma planta, a rigor será sempre finita, pois o intervalo máximo de tempo da avaliação compreenderá o intervalo entre a emergência e a morte dessa planta. Entretanto, obviamente, terão magnitudes muito distintas as avaliações da altura de uma planta de alface e uma sequóia.

A série pode ser composta de dados coletados de maneira discreta no tempo, de valores médios, ponderados ou não, em intervalos de tempo; ou registrados continuamente.

Restringindo-se o universo de eventos aos acontecimentos na Terra, poder-se-ia considerar como sendo uma série infinita, por exemplo, os valores das observações da variável temperatura da sua superfície.

Não distinguindo serem finitas ou infinitas, às séries temporais completas dá-se o nome de **PROCESSO**.

Se, ao invés de avaliar-se uma variável ao longo de todo o período em que ela ocorre, observar-se apenas durante um certo intervalo de tempo contido na duração total de

tempo de ocorrência da variável, será obtida uma série temporal, que denomina-se **REALIZAÇÃO**.

Nos exemplos citados, poder-se-ia considerar como realizações as medidas da alturas da alface desde a emergência até 10 dias após esse acontecimento; a seqüóia teria sua altura avaliada durante 10 anos, a temperatura da superfície da Terra mensurada durante 100 anos, etc.

Uma outra técnica utilizada na estatística é tomar medidas de variáveis em certos momentos, ou seja, em *cortes transversais do tempo*. Podem ser várias medidas de um mesmo indivíduo ou local de observação ou ainda em diferentes indivíduos ou locais. Essa técnica denominada **repetição** não será detalhada neste texto. Na Figura 1.10 apresenta-se um exemplo de medidas de uma variável em 4 repetições (R_1, R_2, R_3 e R_4). Essas 4 medidas são **AMOSTRAS** de todos os pontos ou indivíduos, a **POPULAÇÃO**, em um *corte transversal do tempo*.

Pode-se, então, estabelecer uma paridade no jargão das duas técnicas estatísticas: o **processo** representaria nas séries temporais aquilo que a **população** representaria na estatística descritiva em um corte transversal do tempo. Por outro lado a **realização** representaria nas análises das séries temporais o mesmo que a **amostra** representaria na estatística descritiva.

Nos estudos de séries temporais também pode existir a possibilidade de serem executadas “repetições” das medidas que compõem a série, a rigor, desde que obtidas simultaneamente. Ao conjunto de realizações, da mesma variável, de uma mesma série temporal, tomadas simultaneamente ou não, denomina-se “**ensemble**” (agrupamento) (Figura 1.12).

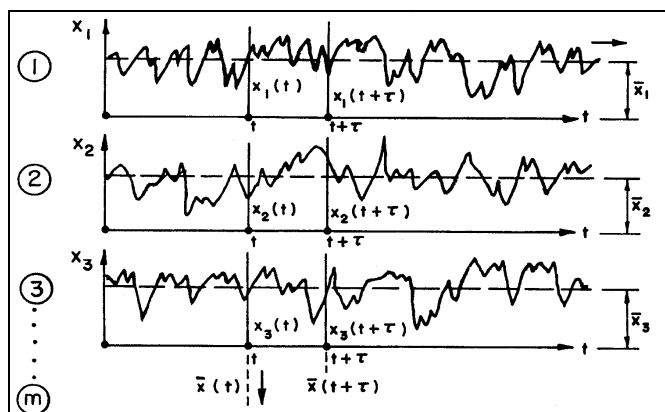


Figura 1.12. Exemplo hipotético de um “ensemble” com várias realizações de um processo estocástico.

Uma série temporal pode ser composta apenas por eventos determinísticos, ou apenas por eventos estocásticos (aleatórios, probabilísticos) ou ainda, por uma combinação de ambos. De uma maneira genérica, a série temporal seria a composição de elementos estocásticos superpostos a um componente determinístico. Novamente, vale aqui o exemplo da temperatura, agora a média, do ar de um certo local, que pode conter as variações sazonais (componente determinístico), acrescido dos desvios aleatórios (componente estocástico) desses valores sazonais (Figura 1.11).

Os **componentes determinísticos** podem ser classificados em: de *tendência*, *cíclicos*, *cíclicos sazonais* e *casuais ou aleatórios* (Figura 1.13).

A análise de cada um desses modelos engloba a identificação e a medição de cada um desses elementos e, em alguns casos, remoção de certos elementos da série, utilizando um procedimento denominado *pré-filtragem*. Isso corresponde, por exemplo, à remoção do componente sazonal da série temporal (LEMOS, 1983).

As séries temporais podem ser analisadas no *domínio do tempo* ou no *domínio da frequência*, maneira esta mais usual. Do ponto de vista histórico, primeiro surgiu a análise no domínio do tempo que tem por significado o estudo de modelos autorregressivos, sem a utilização do espectro da série. A utilização da análise no domínio do tempo é

significativamente maior nos estudos econômicos. A análise das séries temporais no domínio da frequência, utilizando as transformações de Fourier, tem maior utilização, e são mais bem adaptadas, em problemas de previsão e controle (HANNAN, 1970).

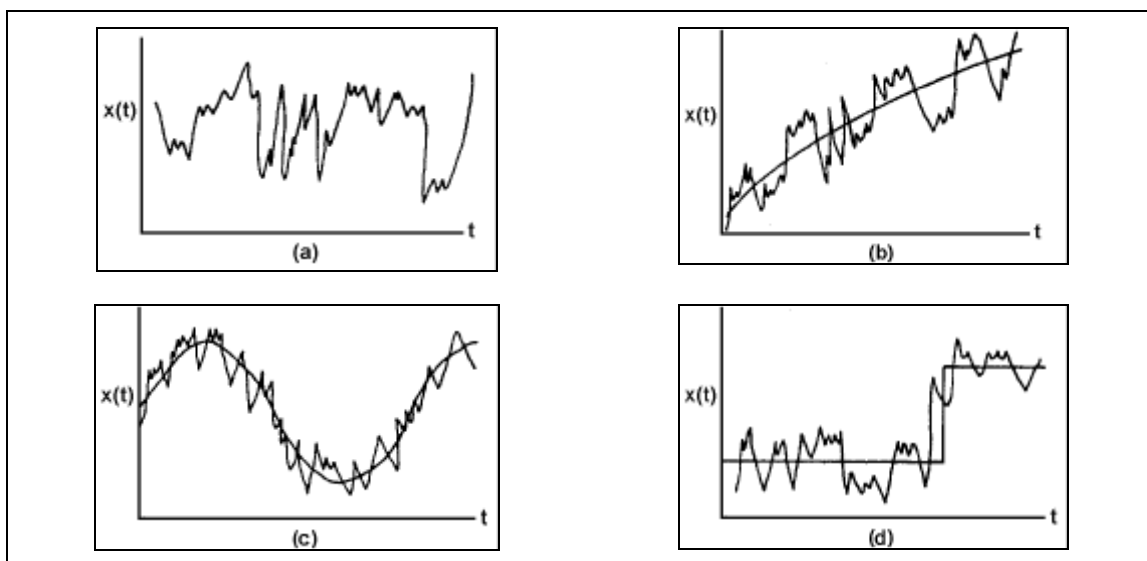


Figura 1.13. Séries temporais hipotéticas contendo elementos estocásticos, ou aleatórios, e diversos tipos de componentes determinísticos. (a) processo estocástico puro, (b) processo estocástico com tendência, (c) processo estocástico com periodicidade e (d) processo estocástico associado a um componente determinístico do tipo degrau de escada.

No *domínio do tempo* estudam-se eventos em que interessam suas magnitudes de ocorrências cronológicas. Ou seja, o acompanhamento cronológico dos acontecimentos. A abordagem é, por isto, dita determinística. Um exemplo poderia ser os valores assumidos pela variável temperatura máxima diária do ar ao longo do ano.

No *domínio da frequência* estudam-se eventos em que interessa a probabilidade da repetição de certa magnitude de um evento em um dado intervalo de tempo. Ou seja, a abordagem é probabilística, ou estocástica, pois o interesse reside na distribuição de probabilidades dos valores assumidos por uma variável. Um exemplo poderia ser a precipitação total diária. Neste caso, no domínio da frequência, o estudo poderia visar a probabilidade de ocorrência de um valor limite de um evento extremo, mínimo - veranico ou seca -, ou máximo - inundação - em um intervalo de tempo, por exemplo, um mês.

Como exemplo em HAAN (1977), encontra-se o estudo da série temporal do deflúvio superficial, dados mensais, da bacia hidrográfica Cave Creek, no estado de Kentucky, EUA. Parte dos dados estão representados na Figura 1.14(a). Da realização datada do período de outubro de 1953 a setembro de 1970 obteve-se a *função autocorrelação*, mostrada na Figura 1.14(b) e a *função densidade espectral*, na Figura 1.14(c). É fácil perceber que tanto o *autocorrelograma* quanto a densidade espectral mostram que o deflúvio superficial mensal da bacia apresenta um ciclo anual bem definido. As Figuras 1.14(a) e 1.14(b) são representativas do domínio do tempo e a Figura 1.14(c) do domínio da frequência.

Os dados, talvez na maioria dos casos, são obtidos no domínio do tempo e, adicionalmente, de modo discreto (i.e., não contínuo). No entanto, as variáveis a que se referem esses dados, também na maioria das vezes, são de natureza contínua, no tempo e no espaço.

Desta maneira, torna-se necessário transformar, ou, pelo menos aproximar, esses dados discretos numa função contínua. Para esse intento utiliza-se a análise de Fourier.

Na análise de séries temporais, resultante de processos estocásticos, o objetivo básico é o de aproximar uma função do tempo por uma combinação linear de harmônico (componentes senoidais). Em muitas aplicações busca-se encontrar alguma periodicidade nos dados observados, que possam estar “escondidos” nas observações (MORETTIN, 1999).

A análise de Fourier clássica é usada para estudar funções ou sinais determinísticos, no domínio do tempo e frequência, sendo apropriada para **processos estacionários**. Para MORETTIN (1999), outros processos seriam os não-estacionários ou com características especiais. Para esses casos o autor argumenta que podem ser úteis a utilização das ondaletas (*wavelets*, em inglês e *ondelette*, em francês, que seriam ondinhas ou ainda, ondículas, numa tradução livre para o português, sem muito rigor), especiais para os domínios do tempo e escala e as funções de Walsh-Fourier, estas para ondas do tipo quadradas, cujos valores assumidos pela função sejam exclusivamente -1 e $+1$. O mesmo autor argumenta no prólogo de seu livro que para séries não-estacionárias as metodologias existentes são razoavelmente precárias. Aponta, também, que para analisar as séries não estacionárias, uma tentativa é a utilização da transformada janelada de Fourier (*windowed Fourier transform* ou *short-time Fourier transform*).

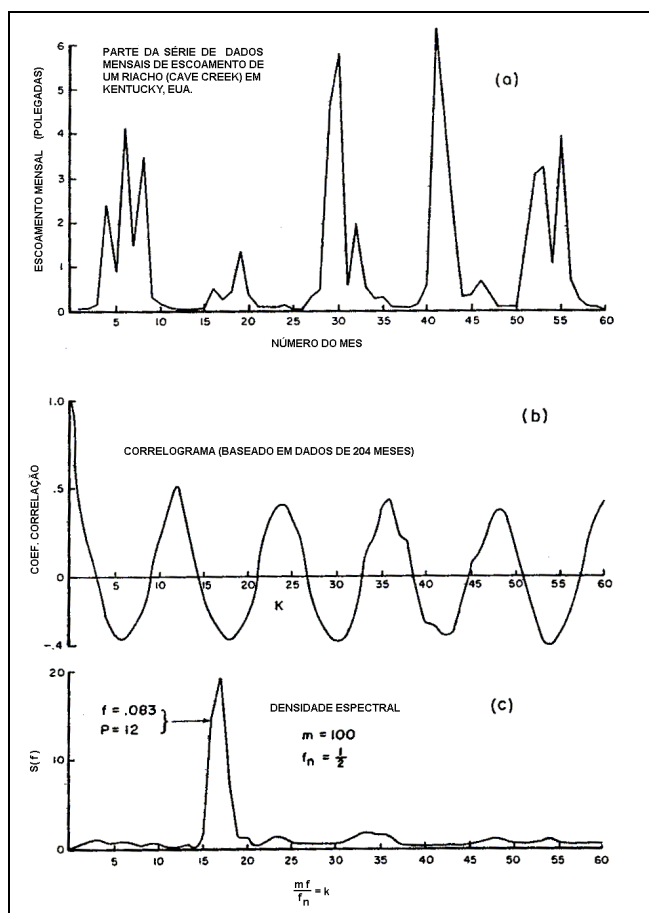


Figura 1.14.

- (a) Exemplo de uma série temporal estudada no domínio do tempo,
- (b) via autocorrelograma
- e
- (c) no domínio da frequência, via análise espectral.

No parágrafo anterior, mencionou-se que a análise clássica de Fourier adapta-se aos processos ditos estacionários. Esses processos caracterizam-se pela ausência, ou prévia remoção, do componente de tendência e apresentam variância constante (SEDIYAMA⁶, 2001). Uma **série estacionária periódica** é definida quando as flutuações em torno da média repetem-se a dado intervalo de tempo (Figura 1.15.a).

Um caso especial de série estacionária periódica é $Y(t)=\text{constante}$, ou $Y(t)=Y_{\text{médio}}$, na Figura 1.15, que é uma série temporal constante. Neste caso a periodicidade é infinita, o ciclo é ausente, frequência nula e período tendendo ao infinito.

Uma **série temporal é periódica com tendência na média** quando os valores assumidos pela função oscilam em torno de um ponto médio crescente ou decrescente

⁶ SEDIYAMA, G.C. Disciplina ENG-611 - Métodos quantitativos em climatologia dos programas de pós-graduação em Meteorologia Agrícola e Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola.

(Figura 1.15.b). Uma **série temporal é periódica com tendência na variância**, quando o acréscimo dos valores assumidos pela função apresentam acréscimo ou decréscimo nas amplitudes (Figura 1.15.c). Uma série temporal periódica também pode ser representada por uma combinação de uma ou mais séries periódicas (Figura 1.15.d)

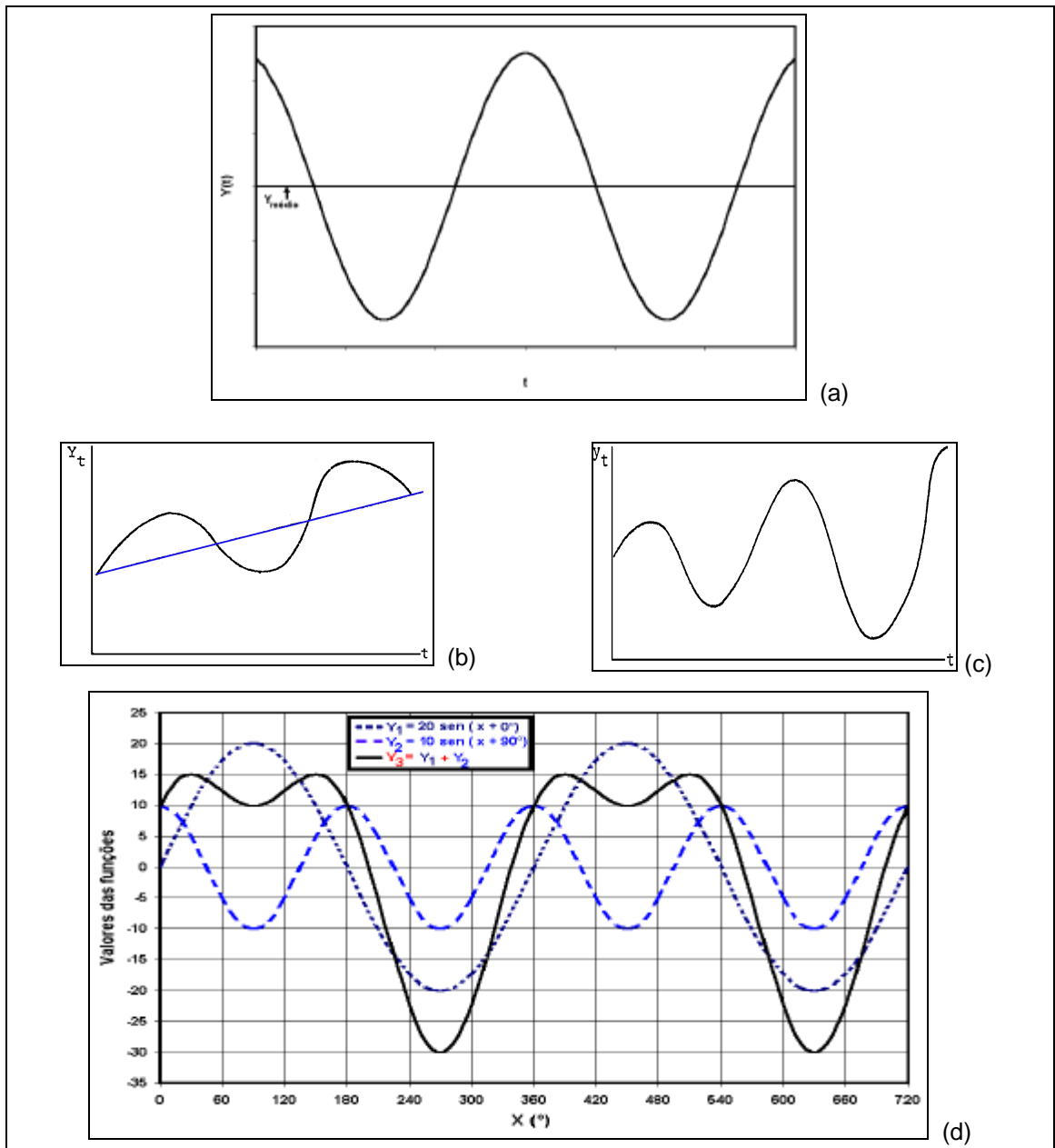


Figura 1.15. Séries temporais fictícias: (a) sem tendência, (b) com tendência na média, (c) com tendência na variância e (d) somatória de séries temporais periódicas.

1.3.2.1. Análise harmônica de Fourier

A análise harmônica de Fourier tem como objetivo básico aproximar a função $f(t)$ - original ou a seqüência suavizada dos dados da variável, coletados e ordenados cronologicamente - numa combinação linear de componentes trigonométricos, senoidais e cosenoidais, cada uma delas com uma dada freqüência. O conjunto $\{g_n(t) = e^{int}, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$ de funções ortogonais, de período necessariamente igual a 2π , forma a base para a análise de Fourier, ou harmônica. Na realidade, esse conjunto é gerado por dilatações de uma única função, $g_n(t) = e^{it}$, ou seja, $g_n(t) = g(nt)$ para qualquer n inteiro. O fato básico é que toda função periódica, de período 2π , de quadrado integrável, é gerada por uma superposição de dilatações inteiras da função $g(t)$ (MORETTIN, 1999).

A função de Euler

$$e^{int} = \cos(nt) + isen(nt) \quad (1.3.2.1)$$

relaciona o sistema das exponenciais complexas com o sistema

$$\{\cos(nt), \text{sen}(nt), n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots\} \quad (1.3.2.2)$$

de senos e cossenos.

Uma função $f(t)$, $t \in \mathfrak{R}$, é *periódica*, de período P , se para todo $t \in \mathfrak{R}$

$$f(t) = f(t+cP) \quad (1.3.2.3)$$

para $c = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ No que segue que $p \neq 0$. Diz-se que $f(t)$ é um *harmônico de freqüência angular l* e amplitude A , l e A positivos, se

$$f(t) = A \cdot \cos(\lambda t) \quad \text{ou} \quad f(t) = A \cdot \text{sen}(\lambda t) \quad (1.3.2.4)$$

Como, para todo c inteiro, $\cos[l(t+2\pi c/l)] = \cos(lt+2\pi c) = \cos(lt)$, o mesmo valendo para o seno, verifica-se que um harmônico de freqüência l tem período $P = 2\pi/l$. A freqüência angular l dá o número de ciclos completos em 2π por unidade de tempo. Pode-se, também, considerar a freqüência em ciclos por unidade de tempo, f , que se relaciona com a freqüência angular l através de $l=2\pi f$. Segue-se que $P = 1/f$.

A Figura 1.16 ilustra o harmônico

$$f(t) = Y(t) = A \cdot \cos(\lambda t + \phi), \quad -\infty < t < +\infty \quad (1.3.2.5)$$

em que, f é denominado **ângulo fase**, e mostra o deslocamento da onda em relação à origem.

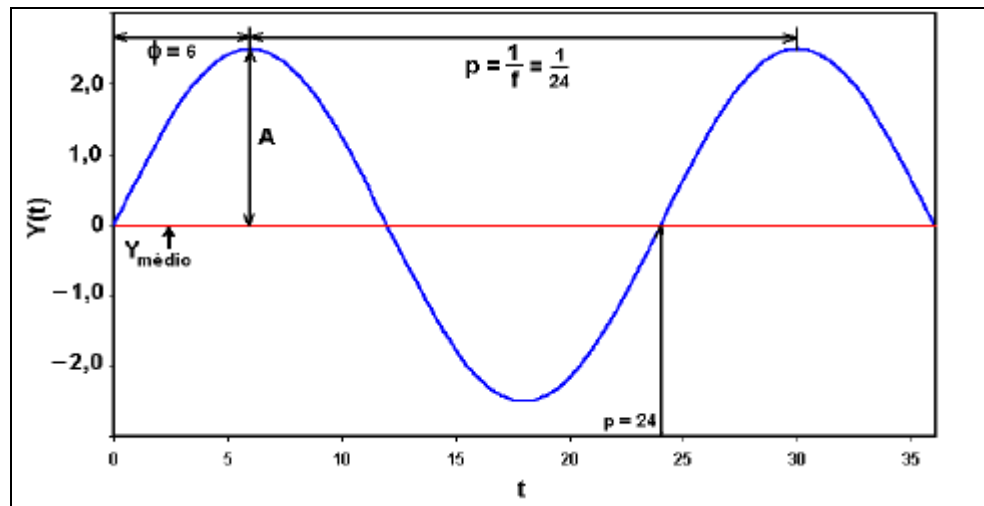


Figura 1.16. Harmônico com $A=2,5$, $l=2\pi/24$, $f = 6$ unidades de tempo ($f = 1,571$ rad), $p=24$ e $f=1/24$. Na figura, P = período, então $Y(t) = Y + c \cdot P$ para $c = 1, 2, \dots, n$, ou seja o mesmo valor de $Y(t)$ deve repetir-se a cada múltiplo inteiro de P ; A = amplitude da onda; $f = P^{-1}$ = freqüência, para todo $P \neq 0$ e f = fase (distância entre o pico e o ponto em que $t = 0$)

Denominando

$a = A \cdot \cos \phi$ e $b = -A \cdot \text{sen} \phi$ a equação (1.3.2.5) torna-se:

$$f(t) = a \cdot \cos(\lambda t) + b \cdot \text{sen}(\lambda t) \quad (1.3.2.6)$$

Sob suposições diversas sobre seu comportamento, uma função $f(t)$, $t \in \mathfrak{R}$, pode ser expressa na forma

$$f(t) = \sum_{\lambda} [a_{\lambda} \cdot \cos(\lambda t) + b_{\lambda} \cdot \text{sen}(\lambda t)] \quad (1.3.2.7)$$

na qual o símbolo de somatória pode representar uma série finita ou infinita, ou mesmo uma integral. Diz-se que (1.3.2.7) é uma **representação espectral de f(t)**.

Numa forma genérica pode-se escrever a função **série de Fourier** como

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(nt) + b_n \sin(nt)] \quad (1.3.2.8)$$

em que a_n e b_n são os *coeficientes harmônicos da série*, com n , inteiro maior que zero. Quando $n=0$ a função $f(t)$ torna-se igual a $a_0/2$, que é o equivalente a $Y_{médio}$ da Figura 1.15.a. Logo, nota-se que o termo $a_0/2$ é igual à média da série, em torno do qual os valores oscilarão.

Tomando-se alguns artifícios matemáticos, pode-se calcular os coeficientes harmônicos a_n e b_n , como

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cdot \cos(nt) \cdot dt \quad b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cdot \sin(nt) \cdot dt \quad (1.3.2.9)$$

A inserção do termo ângulo fase, f , já aludido na equação (1.3.2.5), surge da possibilidade de a função $f(t)$ ser do tipo par ou ímpar. Uma função é denominada *par*, se

$$f(x) = f(-x)$$

como é o caso da função $\cos(\alpha) = \cos(-\alpha)$. Por outro lado, será denominada *ímpar* se

$$f(x) = -f(-x)$$

como no caso da função $\sin(\alpha) = -\sin(-\alpha)$.

O produto entre funções pares e ímpares podem ser de um tipo ou do outro, dependendo de que tipos de funções estão sendo multiplicadas:

uma	multiplicada por uma	gera como Produto uma
Função Par	Função Par	Função Par
Função Par	Função Ímpar	Função Ímpar
Função Ímpar	Função Par	Função Ímpar
Função Ímpar	Função Ímpar	Função Par

e,

$$\int_{-a}^a f(x) dx = \begin{cases} 0 & \text{se } f(x) \text{ for ÍMPAR} \\ 2 & \text{se } f(x) \text{ for PAR} \end{cases} \quad (1.3.2.10)$$

Logo se $f(t)$ for PAR,

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cdot \cos(nt) \cdot dt = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(t) \cdot \cos(nt) \cdot dt \quad b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cdot \sin(nt) \cdot dt = 0 \quad (1.3.2.11)$$

A equação (1.3.2.8), ou seja a série de Fourier será exclusivamente composta por termos em cossenos, pois o produto $[f(t) \cdot \cos(nt)]$, será o produto de duas funções par, que, como visto resulta numa função par, cuja integral, entre os limites $-\pi$ e π , difere de zero. Os termos em seno serão anulados, porque o produto $[f(t) \cdot \sin(nt)]$, terá como produto uma função ímpar, cuja integral, entre os limites $-\pi$ e π , será nula.

Mutatis mutandi, se $f(t)$ for ÍMPAR, ocorrerá o inverso, ou seja, a série de Fourier será composta por termos em senos, pois, agora a integral da função produto $[f(t) \cdot \cos(nt)]$, será nula e a integral da função produto $[f(t) \cdot \sin(nt)]$, não (SPIEGEL, 1976).

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cdot \cos(nt) \cdot dt = 0 \qquad b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cdot \sin(nt) \cdot dt = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(t) \cdot \sin(nt) \cdot dt \quad (1.3.2.12)$$

A introdução do termo **ângulo fase**, f , dá-se para evitar esse conflito. Tendo-se em mente que da trigonometria

$$\begin{aligned} \cos(nx) &= \cos(x + \delta) = \sin(x - \delta) \\ \cos(x + \delta) &= \cos(\delta) \cos(x) - \sin(x) \sin(\delta) \\ \cos(x - \delta) &= \cos(\delta) \cos(x) + \sin(x) \sin(\delta) \\ \sin(x + \delta) &= \sin(x) \cos(\delta) + \sin(\delta) \cos(x) \\ \sin(x - \delta) &= \sin(x) \cos(\delta) - \sin(\delta) \cos(x) \end{aligned}$$

a série de Fourier (equação 1.3.2.8), seja em cosseno ou em seno, poderá ser decomposta, sempre ser apresentada como uma função em seno e cosseno, desde que se utilize do artifício de inserir o termo **ângulo fase**, f , representadas nas relações trigonométricas anteriores como d .

Denominando por A_n , como sendo, a *amplitude do n -ésimo harmônico*, f_n , o *ângulo fase da amplitude do n -ésimo harmônico* e redefinindo:

$$a_n = A_n \cos(d_n) = A_n \cos(f_n) \qquad b_n = A_n \sin(d_n) = A_n \sin(f_n) \quad (1.3.2.13)$$

Torna-se evidente que

$$A_n^2 = a_n^2 + b_n^2 \quad \text{ou} \quad A_n = (a_n^2 + b_n^2)^{1/2} \quad (1.3.2.14)$$

Por outro lado, dividindo-se b_n por a_n ter-se-á

$$b_n / a_n = \tan(f_n) \quad \text{ou} \quad f_n = \arctan(b_n / a_n) \quad (1.3.2.15)$$

1.3.2.1.1. Funções de autocovariância e autocorrelação

Já foi mencionado que o termo $a_0/2$ da equação (1.3.2.8) representa a média da função $f(t)$. A variância dos dados, ou de uma função é definida como sendo o momento de segundo ordem centrada na média

$$\text{Var}[f(t)] = E \left[f(t) - \overline{f(t)} \right]^2 \qquad \text{ou} \qquad \text{Var}[f(t)] = E \left[f(t) - \frac{a_0}{2} \right]^2 \quad (1.3.2.16)$$

ou seja

$$\text{Var}[f(t)] = \frac{\sum_{t=1}^N \left[f(t) - \frac{a_0}{2} \right]^2}{N} \quad (1.3.2.17)$$

Pode-se demonstrar que a variância de uma função série de Fourier será dada por

$$\text{Var}[f(t)] = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^{n-1} A_t^2 - A_n^2 \quad (1.3.2.18)$$

em que,

n = número de harmônicos possíveis, sendo no máximo igual à metade do número de dados que compõe a série (N).

A equação (1.3.2.18) é denominada **quadrado médio** ou **poder médio** (*average power*).

A variância total das séries temporais pode, portanto, ser decomposta numa combinação linear dos quadrados das amplitudes de cada componente periódico. Assim a análise harmônica da série de Fourier conduz a uma espécie de análise de variância amostral das séries temporais (SEDIYAMA⁶, 2001).

A **função autocovariância**, $g(t)$, de uma série temporal estacionária ($f(t)$), com média m e variância s^2 (considerando-se um processo) é definida como:

$$g(t) = E \{ [f(t) - m].[f(t+t) - m] \}; \quad t = 0, 1, 2, \dots \quad (1.3.2.19)$$

Observe-se que a função autocovariância, $\gamma(\tau)$, é definida apenas em função da *defasagem*, t , e não em função do instante, t , no tempo (LEMOS, 1983).

É evidente que a variância da função $f(t)$ é calculada como sendo $g(t)$ para $t = 0$, igualando-se, obviamente, à expressão (1.3.2.16).

Define-se a **função de autocorrelação**, $r(t)$, como sendo

$$\rho(\tau) = \frac{\gamma(\tau)}{\gamma(0)}; \quad \tau = 0, 1, 2, \dots \quad (1.3.2.20)$$

ou, o que é a mesma coisa

$$\rho(\tau) = \frac{\text{cov}[f(t), f(t + \tau)]}{\sqrt{\text{var}[f(t)]. \text{var}[f(t + \tau)]}} \quad (1.3.2.21)$$

Entretanto, se a série temporal for estacionária, obter-se-á $\text{Var}[f(t)] = \text{Var}[f(t+\tau)] = g(0)$, e a expressão (1.3.2.21) reduzir-se-á na equação (1.3.2.20).

Para uma **realização** ("amostra" de um processo) de um processo estocástico a função de autocovariância é definida como

$$c(\tau) = \frac{\sum_{t=1}^{N-\tau} [(f(t) - \bar{f})(f(t+\tau) - \bar{f})]}{N} \quad (1.3.2.22)$$

Observe-se que quando $t = 0$,

$$c(0) = \frac{\sum_{t=1}^N [(f(t) - \bar{f})]^2}{N} \quad (1.3.2.23)$$

que segundo LEMOS (1983) é um estimador viesado, ou tendencioso, da variância populacional, ou do processo, s^2 . Para retirar essa tendenciosidade, dividem-se as equações anteriores por $(N-t-1)$, ao invés de fazê-lo por N , o número de observações tomadas para a estimativa da média.

Devem ser observadas algumas propriedades da função de autocorrelação (Figuras 1.17(a) e 1.17(b)): (a) Se a série temporal for periódica a função de autocorrelação também o será e (b) A função de autocorrelação é capaz de mostrar o enfraquecimento da dependência temporal da série, à medida que a defasagem, t , aumenta.

⁶ SEDIYAMA, G.C. Notas de aulas da Disciplina ENG-611 - Métodos quantitativos em climatologia dos programas de pós-graduação em Meteorologia Agrícola e Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola.

1.3.2.1.2. Função de correlação cruzada

De modo similar à função de autocorrelação, em que uma série temporal é comparada consigo mesma defasada paulatinamente no tempo, também pode-se definir a função de **correlação cruzada** (*cross-correlation*), na qual duas séries temporais são comparadas, também defasando-as paulatinamente no tempo.

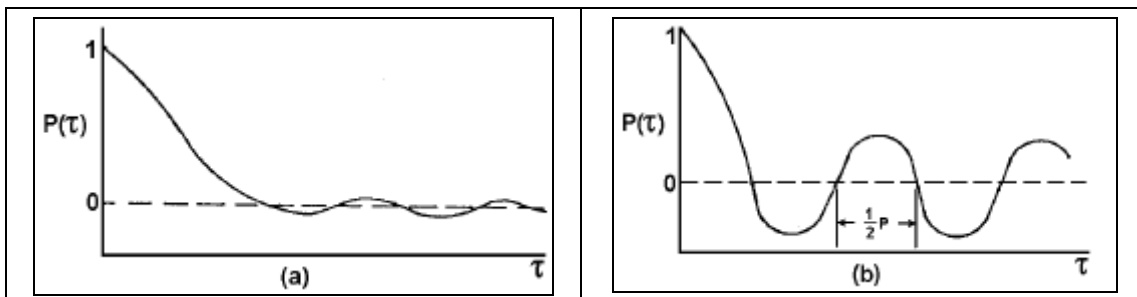


Figura 1.17. Autocorrelogramas hipotéticos. (a) Processo aleatório e (b) Processo aleatório superposto a um periódico.

De acordo com DAVIS (1986), duas informações surgem dessas comparações: (a) a força da inter-relação entre as duas séries temporais comparadas e (b) a duração temporal dos efeitos de uma série sobre a outra, bem como qual a defasagem temporal em que a máxima inter-relação será, se o for, encontrada. Em muitos casos, não é possível designar a "posição" da defasagem nula porque pode-se não se ter certeza de qual série lidera, qual série poderia, ser sob certo aspecto a causa, numa relação causa-efeito. Desde que as duas séries não são idênticas, o *correlograma cruzado* (*cross-correlogram*) não será simétrico em relação à posição central, ou seja defasagens em que a série 1 lidera a série 2, difere nos resultados em que a série 2 se antecipa à 1. Um fator complicador surgirá se ambas as séries não tiverem o mesmo "comprimento".

A equação para a correlação cruzada é a mesma do coeficiente de correlação linear, diferindo um pouco do coeficiente de autocorrelação. Se duas séries forem denominadas como sendo $f_1(t)$ e $f_2(t)$ e definir-se N como o número de posições sobrepostas entre ambas, o valor da correlação cruzada, $r(t)$, num dado instante t será dado por

$$r(t) = \frac{\sum_{t=1}^N [f_1(t) \cdot f_2(t)] - \sum_{t=1}^N f_1(t) \cdot \sum_{t=1}^N f_2(t)}{\sqrt{\left\{ \sum_{t=1}^N [f_1(t)]^2 - \frac{\left[\sum_{t=1}^N f_1(t) \right]^2}{N} \right\} \left\{ \sum_{t=1}^N [f_2(t)]^2 - \frac{\left[\sum_{t=1}^N f_2(t) \right]^2}{N} \right\}}} \quad (1.3.2.24)$$

ou de forma equivalente

$$r(t) = \frac{\text{COV}[f_1(t), f_2(t)]}{s_1 s_2} \quad (1.3.2.25)$$

1.3.2.2. Análise espectral

A análise espectral nada mais é do que a partição da variação de uma série temporal em componentes como a duração ou os intervalos dentro dos quais a variação ocorre. Isto é feito decompondo-se a série temporal em várias componentes, também séries temporais, mais simples. A soma desses componentes é igual à série original, bem como a soma das variações de todas elas também é igual à da série original (DAVIS, 1986). A análise espectral é realizada de várias maneiras, e algumas delas já foram razoavelmente discutidas nos sub-itens que trataram da autocovariância, autocorrelação e correlação cruzada as análises versaram no

domínio do tempo. No início do item 1.3.2 Análise de Séries Temporais foi mencionado que uma série, dependendo dos objetivos, poderia ser analisada no domínio do tempo ou no domínio da frequência.

No domínio da frequência será estudada a autoespectral, relacionada a uma série temporal em particular, e a espectral cruzada, que visa analisar duas séries temporais simultânea e inter-relacionadamente.

1.3.2.2.1. Análise autoespectral

Da mesma maneira como através da função de autocorrelação (equações (1.3.2.20) e (1.3.2.21)) é possível a visualização ou não da periodicidade da ocorrência de determinados eventos dentro de uma série temporal, a análise autoespectral também pode encontrar essa periodicidade, embora, tenha como ponto de partida para a avaliação a distribuição de probabilidades da ocorrência dos eventos.

Para a estimação do espectro supõe-se que a série temporal, seja estacionária e apresente distribuição normal. Supor-se-á, também, que os harmônicos da função de Fourier que representa essa série temporal, também tenham cada um deles distribuição normal. Para fins de simplificação supõe-se que o processo, transformando a função $f(t)$ em $f'(t) = f(t) - m$, seja Gaussiano, estacionário, com média zero:

$$f'(t) = f(t) - \overline{f(t)} = f(t) - \frac{a_0}{2} = \sum_{i=1}^N a_i \cos(w_i t) + \sum_{i=1}^N b_i \text{sen}(w_i t) \quad (1.3.2.26)$$

Admitindo que as frequências w_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) sejam discretas – tal que $0 \leq w_1 \leq w_2 \leq \dots \leq w_N \leq \pi$ e os parâmetros a_i e b_i , também tenham distribuição normal com média nula e variância σ^2 :

$$E(a_i a_j) = E(b_i b_j) = \begin{cases} 2\sigma_i^2 & \text{se } i=j, \quad i, j=1, 2, \dots, N \\ 0 & \text{se } i \neq j \end{cases}$$

$$E(a_i b_j) = 0 \quad \forall \quad i, j=1, 2, \dots, N$$

Note-se que quando $i = j$ trata-se da mesma onda, ou mesmo harmônico, que tem amplitude A e variância igual a $A_i^2/2$, logo $A_i^2 = 2\sigma^2$.

Considerando a integral

$$\frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} C(\tau) \cos(w_j \tau) d\tau = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} \left\{ 2 \sum_{i=1}^N \sigma_i^2 \cos(w_i \tau) \cos(w_j \tau) \right\} d\tau$$

$$= \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^N \sigma_i^2 \int_{-\pi}^{+\pi} \left\{ \cos(w_i \tau) \cos(w_j \tau) \right\} d\tau \quad (1.3.2.27)$$

em que $C(\tau)$ é a função de autocovariância (equação 1.3.2.22).

Para $w_i = w_j$ a integral 1.3.2.27 torna-se

$$\frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} C(\tau) \cos(w_j \tau) d\tau = \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^N \sigma_i^2 \pi = 2 \sum_{i=1}^N \sigma_i^2 \quad (1.3.2.28)$$

ou seja a integral iguala-se ao dobro da variância total de todos os elementos da série, ou seja o dobro da variância total da série temporal.

Para um único e específico harmônico i , tem-se

$$\frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} C(\tau) \cos(w_j \tau) d\tau = 2 \sigma_i^2 \quad \text{para } i = j \quad (1.3.2.29.a)$$

ou seja

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} C(\tau) \cos(w_i \tau) d\tau \quad (1.3.2.29.b)$$

Para $w_i \neq w_j$, a integral é nula.

Assim,

$$C(\tau) = 2 \sum_{i=1}^N \sigma_i^2 \cos(w_i \tau) \quad (1.3.2.30)$$

Porque a função cosseno é par as equações

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} C(\tau) \cos(w_i \tau) d\tau \quad \text{e} \quad \sigma_i^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{+\pi} C(\tau) \cos(w_i \tau) d\tau \quad (1.3.2.31)$$

são denominadas pares de transformadas de Fourier. Essas duas equações constituem o espectro da série associado com a i -ésima frequência, isto é a transformação cossênica de Fourier da função de autocovariância.

Para um processo estocástico estacionário, uma função representativa do espectro sobre todas as frequência é denominada **poder espectral** ou **função de densidade espectral**. Isto se deve ao fato de que toda *função de densidade de probabilidades* deve ter integral igual à unidade.

Pela transformação inversa de 1.3.2.29.b, obtém-se

$$C(\tau) = \int_{-\pi}^{+\pi} \sigma_i^2 \cos(w_i \tau) d\tau \quad (1.3.2.32)$$

Para o caso de $t = 0$; $C(0) = 1$ e $\cos(0) = 1$, logo

$$1 = \int_{-\pi}^{+\pi} \sigma_i^2 d\tau \quad (1.3.2.33)$$

que é a **variância normalizada da série**. Assim, s_i^2 pode ser visualizada como uma função de densidade de probabilidades que fornece a contribuição da variância total normalizada contida no intervalo de freqüência w_1 e w_2 .

Para dados discretos a equação 1.3.2.29.b pode ser escrita como

$$\hat{F}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \left[\hat{C}(0) + \sum_{i=1}^M \hat{C}(\tau) \cos\left(\frac{\pi\tau}{M}\right) \right] \text{ no intervalo de } [-\pi \text{ a } \pi],$$

ou

$$\hat{F}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \left[\hat{C}(0) + 2 \sum_{i=1}^M \hat{C}(\tau) \cos\left(\frac{\pi\tau}{M}\right) \right] \text{ no intervalo de } [0 \text{ a } 2\pi], \text{ pois a função é par.} \quad (1.3.2.34)$$

em que **M** é o número de defasagens empregadas na análise discreta. Torna-se assim, claro que o **poder espectral F(t)**, é medido apenas nas freqüências iguais ao número de defasagens escolhido (SEDIYAMA⁶, 2001).

1.3.2.2.2. Análise espectral cruzada

Da mesma maneira que em casos anteriores, nos quais é possível tanto avaliar uma única série temporal ou duas séries conjuntamente, este também é o caso da análise espectral. No estudo de duas séries temporais simultaneamente utiliza-se a **análise espectral cruzada**.

É de grande utilidade principalmente quando se deseja estudar: (a) séries cujas origens sejam idênticas e (b) séries supostamente causais sobre outras em um modelo de regressão dinâmica.

Na análise espectral cruzada a única exigência é que as séries temporais apresentem covariâncias conjuntas estacionárias. As funções de covariância entre duas séries temporais são definidas de maneira análoga à da estatística convencional.

A **função de covariância cruzada** (*cross-covariance*) amostral entre duas séries temporais é definida por

$$C_{xy}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-\tau} (X(t) - \bar{X})(Y(t+\tau) - \bar{Y}) \quad (1.3.2.35)$$

para $t = 1, 2, \dots, M$. Equação válida quando a série Y é que está defasada no tempo, e

$$C_{yx}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-\tau} (Y(t) - \bar{Y})(X(t+\tau) - \bar{X}) \quad (1.3.2.36)$$

para $t = 1, 2, \dots, M$. Equação válida quando a série X é que está defasada no tempo.

Nessas equações

$$\bar{X} = \frac{\sum_{t=1}^N X(t)}{N} \quad \text{e} \quad \bar{Y} = \frac{\sum_{t=1}^N Y(t)}{N} \quad (1.3.2.37)$$

⁶ SEDIYAMA, G.C. Notas de aulas da Disciplina ENG-611 - Métodos quantitativos em climatologia dos programas de pós-graduação em Meteorologia Agrícola e Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola.

A **função de densidade espectral cruzada** é obtida em duas etapas, utilizando-se a transformação de Fourier às funções de covariância cruzada devidamente ponderadas ou janeladas, cujas indicações serão

$$C_{xy}^W(\lambda) \quad \text{e} \quad C_{yx}^W(\lambda)$$

as quais possuem uma **parte real** e outra **parte imaginária** da função densidade.

A **parte real** denominada **coespectro** é definida por

$$P_{xy}(L) = \frac{1}{2\pi} \left\{ \sum_{L=0}^M \left[C_{xy}^W(L) + C_{yx}^W(L) \right] \cos \frac{\pi L \tau}{M} \right\} \quad (1.3.2.38)$$

para todo t.

O **coespectro** mede a covariância dos componentes, na fase da freqüência **f**, nos dois processos em estudo, sendo expresso por

$$\cos f(t+L) \cdot \cos f(t)$$

A parte imaginária é denominada **espectro de quadratura** sendo definida por

$$Q_{xy}(L) = \frac{1}{2\pi} \left\{ \sum_{L=0}^M \left[C_{xy}^W(L) - C_{yx}^W(L) \right] \operatorname{sen} \frac{\pi L \tau}{M} \right\} \quad (1.3.2.39)$$

para todo t. Esta é uma função ímpar por conter na sua definição a função seno, que é ímpar.

O **espectro de quadratura** mede a covariância das amplitudes dos componentes sendo expresso por

$$\cos f(t+L) \cdot \operatorname{sen} f(t)$$

Como a função cosseno lidera a função seno de $\pi/2$ rad, o espectro de quadratura mede os componentes de covariância de freqüência **f** que estão fora da fase em $\pi/2$ rad.

Para séries discretas devidamente ponderadas as equações tomam a forma

$$P_{xy}(L) = \frac{1}{2\pi} \left\{ C_{xy}(0) + 2 \sum_{L=1}^M \left[C_{xy}^W(L) + C_{yx}^W(L) \right] \cos \frac{\pi L \tau}{M} W\left(\frac{L}{M}\right) \right\} \quad (1.3.2.40)$$

$$Q_{xy}(L) = \frac{1}{2\pi} \left\{ C_{xy}(0) + 2 \sum_{L=1}^M \left[C_{xy}^W(L) - C_{yx}^W(L) \right] \operatorname{sen} \frac{\pi L \tau}{M} W\left(\frac{L}{M}\right) \right\} \quad (1.3.2.41)$$

em que, o termo **W(L/M)** um filtro, uma ponderação, e

$$C_{xy}(L) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T-L} \left[(X(t) - \bar{X}) (Y(t+L) - \bar{Y}) \right] \quad (1.3.2.42)$$

$$C_{yx}(L) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T-L} \left[(X(t+L) - \bar{X}) (Y(t) - \bar{Y}) \right] \quad (1.3.2.43)$$

sendo o termo **W(L/M)** a mesma filtragem utilizada anteriormente.

As quatro estatísticas que derivam da análise espectral cruzada são: (a) coerência, (b) ganho, (c) amplitude e (d) fase.

(a) Coerência

$$Co(\tau) = \frac{P_{xy}^2(\tau) + Q_{xy}^2(\tau)}{F_{xx}(\tau) F_{yy}(\tau)} \quad (1.3.2.44)$$

O **coeficiente de coerência** tem representação similar ao coeficiente de determinação (r^2) na análise de regressão múltipla, ou seja indica o grau de associação entre as freqüências de duas séries temporais.

(b) Ganho

$$G(\alpha) = \left[\frac{P_{xy}^2(\tau) + Q_{xy}^2(\tau)}{F_{xx}(\tau) F_{yy}(\tau)} \right]^{1/2} \quad (1.3.2.45)$$

O **coeficiente de ganho** tem interpretação similar ao coeficiente angular de um modelo de regressão simples. É o valor pelo qual devem ser multiplicados os valores da série de entrada para produzir os valores de saída *em dada freqüência*.

(c) Amplitude

$$A(t) = [P_{xy}^2(t) + Q_{xy}^2(t)]^{1/2} \quad (1.3.2.46)$$

O **coeficiente de amplitude** mede covariância entre as duas séries.

(d) Fase

$$\Phi(\tau) = \arctan \left[\frac{Q_{xy}(\tau)}{P_{xy}(\tau)} \right] \quad (1.3.2.47)$$

em que o ganho $F(t)$ é medido em radianos.

O **coeficiente de fase** mostra a diferença no tempo existente entre a série de entrada e a de saída. Isto é, mede a defasagem entre os picos de freqüência entre as duas séries.

De acordo com SEDIYAMA⁶ (2001) a defasagem t que produz os maiores valores de **coerência** e **ganho** indicam que as duas séries temporais estão relacionadas nesta freqüência particular e o período do ciclo associado (a) pode ser calculado, aproximadamente, por

$$\alpha \approx \frac{2M}{\tau} \quad (1.3.2.48)$$

A diferença de fase (b) entre as duas séries temporais será, aproximadamente, calculada por

$$\beta \approx \frac{\alpha \theta(\tau)}{2\pi} \quad (1.3.2.49)$$

⁶ SEDIYAMA, G.C. Notas de aulas da Disciplina ENG-611 - Métodos quantitativos em climatologia dos programas de pós-graduação em Meteorologia Agrícola e Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola.

2. Objetivos

hoc opus, hic labor est

Este estudo teve como objetivo analisar os efeitos dos elementos meteorológicos e da irrigação suplementar nos diversos estádios fenológicos da cultura do cacauzeiro. Para tanto, buscou-se trabalhar em duas vertentes: (a) determinar a interrelação entre o conjunto de variáveis meteorológicas e as fenológicas, por meio das técnicas de análise multivariada, particularmente, canônica e de componentes principais, quais os elementos meteorológicos com atuação mais expressiva na fenologia da cultura do cacauzeiro e (b) determinar, através de técnicas de análise de séries temporais, quais intervalos de tempo compõem as defasagens entre as ocorrências dos eventos meteorológicos – e irrigações suplementares – e suas conseqüências fenológicas.

3. Materiais e métodos

sublata causa, tollitur effectus?

Os resultados dos experimentos objeto deste trabalho foram coletados no período de setembro de 1989 a agosto de 1993, na quadra “S” da Estação Experimental Filogônio Peixoto (ESFIP), pertencente ao Centro de Pesquisas do Cacau (CEPEC), órgão de pesquisa da Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC). A estação experimental está localizada no Município de Linhares, Espírito Santo, a 21 metros de altitude, latitude 19°24' S e longitude 40°04' W.

Durante todo o período do experimento foram coletados, diariamente, na estação climatológica da ESFIP, os seguintes dados meteorológicos: temperaturas máxima e mínima, irradiância solar global, insolação, evaporação do tanque Classe A, velocidade do vento a 2m de altura e precipitação total (AUGUSTO, 1997).

O solo do local do experimento é do tipo aluvial, fase argilosa, de fertilidade natural média a alta, com profundidade média de 1,0 m até a camada de areia fina, e 1,33 m até a camada de areia grossa. As características físico-hídricas do solo estão apresentadas nos Quadros 3.1 e 3.2.

Quadro 3.1. Características físicas do solo da área experimental

Camada do solo (m)	Densidade do solo (kg.m ⁻³)	Areia Grossa (%)	Areia fina (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classificação textural
< 0,2	1300	21,6	24,1	9,4	44,9	Argila
0,2 - 0,4	1400	13,6	20,6	18,0	47,8	Argila
Média	1350	17,6	22,4	13,7	46,3	Argila

Quadro 3.2. Umidade do solo (% em massa) em função da tensão aplicada (MPa)

Camada do solo (m)	Potencial Matricial (MPa)						
	-0,010	-0,033*	-0,050	-0,100	-0,200**	-0,500	-1,500
	Umidade (% em massa)						
< 0,2	47,6	43,9	38,4	34,3	32,0	28,8	19,9
0,2 - 0,4	46,9	41,7	35,6	32,1	29,7	26,1	22,7
Média	47,3	42,8	37,0	33,2	30,8	27,5	21,3

* Potencial matricial da água à Capacidade de Campo.

** Limite inferior do potencial matricial da água para início da irrigação.

Utilizou-se de uma área experimental de 8.200m², contendo, inicialmente, 980 plantas, obtidas do cruzamentos de CATONGO x ICS 1, CATONGO x ICS 8, CATONGO x UF

677 e SIAL 325 x SIAL 108, plantadas em 1978, no espaçamento 3 x 3 m. Esses cruzamentos representavam relativamente bem o material genético cultivado na região à época do experimento.

Cada parcela constou de 35 plantas (7 linhas x 5 colunas), das quais foram utilizadas as linhas e colunas externas como bordaduras, ficando cada parcela útil com 15 plantas (5 linhas x 3 colunas), conforme croqui na Figura 3.1.

O delineamento estatístico utilizado foi o de blocos ao acaso, com 4 repetições, aplicando-se os seguintes tratamentos, esquematizados na Figura 3.2:

- Tratamento 1 (Trat.1) - Irrigação suplementar o ano todo
- Tratamento 2 (Trat.2) - Irrigação suplementar nos períodos de pico dos estádios de formação da almofada floral e floração (outubro a abril)
- Tratamento 3 (Trat.3) - Testemunha, sem irrigação.

As irrigações suplementares foram realizadas utilizando-se um sistema de microaspersão, com os emissores espaçados de 4 x 3 m, promovendo uma cobertura total da parcela útil. Adotou-se o limite inferior do potencial matricial da água no solo de $-0,20$ MPa, à profundidade de 0,235 m, para o reinício das irrigações dentro dos períodos estipulados para cada tratamento. As lâminas das irrigações foram calculadas tomando como base os dados do Quadro 3.2, de maneira a retornar o solo à capacidade de campo, considerando-a a um potencial matricial de $-0,033$ Mpa. A profundidade efetiva do sistema radicular foi considerada de 0,35m.

As avaliações fenológicas da cultura do cacauzeiro foram realizadas em quatro plantas por parcela, marcadas aleatoriamente, excessão feita ao controle de flores e folhas caídas, cujos coletores foram instaladas em duas dessas quatro plantas:

- Lançamento foliar - 10 ramos de cada uma das quatro plantas foram marcados, também aleatoriamente, sendo cinco no terço superior e cinco no inferior do dossel. Nesses ramos foram contados, quinzenalmente, o número de folhas novas surgidas. Foram consideradas apenas aquelas com limbo maior que 2 cm de comprimento.
- Intensidade da floração - realizada semanalmente a contagem do número de folhas caídas em dois coletores retangulares de $3,5 \text{ m}^2$, instalados no tronco de duas, tomadas aleatoriamente, das quatro plantas controle.
- Frutificação - contagem e marcação semanal dos frutos novos, maiores de 0,5 cm, surgidos até dois metros de altura nas quatro plantas marcadas como controle por parcela.
- Frutos pecos - desses frutos marcados nas contagens da frutificação, semanalmente, foram contados aqueles que morreram antes da colheita (pecos fisiológicos).

3.1. Análises estatísticas

As análises estatísticas dessas séries de dados de avaliações fenológicas visaram a identificação dos componentes principais, ou seja, aqueles elementos meteorológicos que se mostraram mais efetivamente influentes na fenologia da cultura por meio das técnicas de análise multivariada. Estabelecimento de quais variáveis fenológicas apresentam periodicidade e, a partir daí, qual a defasagem no tempo entre as ocorrências dos eventos meteorológicos - e irrigações suplementares - e as perceptíveis conseqüências fenológicas, utilizando as técnicas das análises de séries temporais, quais sejam: análises de autocorrelação, correlação cruzada, análises autoespectral e espectral cruzada.

As séries temporais comparadas foram compostas de valores médios, ou totais, mensais, dependendo do caso. Foram consideradas as séries das variáveis meteorológicas e das variáveis fenológicas no período de setembro de 1989 a agosto de 1993.

Os conjuntos de séries temporais foram os seguintes:

Conjunto das variáveis meteorológicas:

- Temperaturas médias mensais, (°C)
- Médias das temperaturas mínimas mensais, (°C)
- Médias das temperaturas máximas mensais, (°C)
- Médias mensais dos valores de umidade relativa, (%)
- Médias mensais da irradiância solar global, (MJ.m⁻².d⁻¹)
- Médias diárias da insolação, (horas)
- Duração do fotoperíodo, (horas)
- Precipitação total mensal, (mm)
- Velocidade média diária do vento, (m.s⁻¹)
- Precipitação total mensal + irrigação suplementar total mensal, (mm)
- Evapotranspiração "real" (ETR), (mm.d⁻¹), para cada um dos três tratamentos: considerou-se como a evapotranspiração de referência (ET_o) estimada pelo método de Penman-Monteith-FAO-1991, considerando o coeficiente de cultura, **K_c**, unitário, penalizada pelo valor do coeficiente de umidade do solo (K_s), segundo descrição em BERNARDO (1995), a partir dos valores da água disponível no solo:

$$ETR = K_s \cdot ET_o \quad (3.1.1)$$

Conjunto das variáveis fenológicas, para cada um dos 3 tratamentos:

- Lançamento foliar - número de folhas novas por planta (totais mensais)
- Número de folhas caídas por planta (totais mensais)
- Intensidade da floração - número de flores caídas/m² (totais mensais)
- Frutificação - número de novos frutos por planta (totais mensais)
- Número de frutos pecos por planta (totais mensais)

3.1.a. Estimação da Evapotranspiração Real média

A **evapotranspiração de referência (ET_o)** pelo método de Penman-Monteith-FAO-1991, média mensal, utilizada no cálculo de **ETR** (equação 3.1.1), foi estimada pela expressão (PEREIRA et al, 1997):

$$ET_o = \frac{\delta}{(\delta + \gamma^*)} \cdot (R_n - G) \cdot \frac{1}{\lambda} + \frac{\gamma}{(\delta + \gamma^*)} \cdot \frac{900}{(t + 275)} \cdot U_{2m} \cdot (e_s - e_d) \quad (3.1.a.1)$$

em que,

ET_o = evapotranspiração de referência, (mm.d⁻¹)

R_n = saldo de radiação, (MJ.m⁻².d⁻¹)

G = fluxo de calor no solo, assumido como nulo nestes cálculos (MJ.m⁻².d⁻¹).

t = temperatura média do ar, (°C)

U_{2m} = velocidade média do vento, medida a 2 metros de altura, no período de 24 horas, (m.s⁻¹)

e_s = pressão de vapor de saturação à temperatura média, (kPa)

e_d = pressão de vapor média diária, (kPa)

δ = declividade da curva de pressão de vapor de saturação, na temperatura t, (kPa.°C⁻¹)

γ = coeficiente psicrométrico, (kPa.°C⁻¹)

γ* = coeficiente psicrométrico modificado, (kPa.°C⁻¹)

λ = calor latente de evaporação à temperatura t, (MJ.kg⁻¹(vapor de água))

Para a estimação da evapotranspiração de referência (ET_o), equação (3.1.a.1.) utilizou-se as seguintes equações para a avaliação das variáveis enunciadas anteriormente:

R_n – Saldo da radiação

$$R_n = R_g \cdot (1 - r) \quad (3.1.a.2)$$

em que,

R_g = irradiância solar global, (MJ.m⁻².d⁻¹) – medida na estação meteorológica da ESFIP;
r = albedo, coeficiente de reflexão da irradiância solar global (=0,23, valor da definição da cultura hipotética de referência)

e_s – pressão de vapor de saturação

$$e_s = 0,61078 \cdot 10^{(7,5 \cdot t)/(237,3+t)} \quad (3.1.a.3)$$

em que, t = temperatura média do ar, (°C) – medida na estação meteorológica da ESFIP

e_d – pressão de vapor média diária, (kPa)

$$e_d = \frac{e_s \cdot UR(\%)}{100} \quad (3.1.a.4)$$

em que,

UR(%) = Umidade relativa, (%) – medida na estação meteorológica da ESFIP;
e_s = pressão de vapor de saturação à temperatura média, (kPa) – estimada pela equação (3.1.a.3).

d – declividade da curva de pressão de vapor de saturação, na temperatura t, estimação aproximada pela expressão

$$\delta = \frac{4098 \cdot e_s}{(t + 237,3)^2} \quad (3.1.a.5)$$

em que,

t = temperatura média do ar, (°C) – medida na estação meteorológica da ESFIP;
e_s = pressão de vapor de saturação à temperatura média, (kPa) – estimada pela equação (3.1.a.3).

g – coeficiente psicrométrico

$$\gamma = 0,0016286 \cdot \frac{P_{atm}}{\lambda} \quad (3.1.a.6)$$

em que,

P_{atm} = pressão atmosférica no local, (kPa). Os valores das pressões atmosféricas utilizadas foram as médias mensais obtidas em DEPARTAMENTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – DNMET (1992);

λ = calor latente de evaporação à temperatura t, (MJ.kg⁻¹(vapor de água)) – estimada pela equação (3.1.a.7).

l = calor latente de evaporação

$$\lambda = 2,501 - (0,002361 \cdot t) \quad (3.1.a.7)$$

em que, t = temperatura média do ar, ($^{\circ}\text{C}$) – medida na estação meteorológica da ESFIP.

g^* – coeficiente psicrométrico modificado

$$\gamma^* = \gamma \cdot (1 + 0,33 \cdot U_{2m}) \quad (3.1.a.8)$$

em que,

γ = coeficiente psicrométrico ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$) – estimado pela equação (3.1.a.6);

U_{2m} = velocidade do vento a 2 metros de altura, ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) – medida na estação meteorológica da ESFIP.

Os valores do coeficiente de umidade do solo (**K_s**), utilizado no cálculo de **ETR** (equação 3.1.1), segundo descrição em BERNARDO (1995), baseados nos resultados de Pierce, a partir dos valores da água disponível no solo em relação à conteúdo total de água disponível entre a capacidade de campo e o ponto de murchamento permanente, foram estimados pela expressão:

$$K_s = \frac{\text{Ln}((UA - \text{PMP}) + 1,0)}{\text{Ln}((CC - \text{PMP}) + 1,0)} \quad (3.1.a.9)$$

em que,

K_s = coeficiente de umidade do solo (adimensional);

UA = armazenamento real de água no solo ($\text{mm} \cdot \text{cm}^{-1}_{\text{solo}}$);

CC = armazenamento de água no solo à Capacidade de Campo ($\text{mm} \cdot \text{cm}^{-1}_{\text{solo}}$);

PMP = armazenamento de água no solo no Ponto de Murchamento Permanente ($\text{mm} \cdot \text{cm}^{-1}_{\text{solo}}$).

Para fins do experimento analisado considerou-se a capacidade de campo como a umidade de uma amostra de solo quando a água apresenta um potencial matricial de $-0,033$ MPa (aproximadamente $-0,33$ bars) e o ponto de murchamento permanente a umidade da amostra de solo quando o potencial matricial da água é de $-1,5$ MPa (aproximadamente -15 bars).

3.1.b. Estimação de outras variáveis

A variável duração do fotoperíodo (**N**) foi calculado como a média aritmética mensal das durações do fotoperíodo calculado para cada dia do mês. Seu cálculo foi executado segundo as equações encontradas em VAREJÃO-SILVA (2000):

$$N = \frac{(2 \cdot H + 0,83^{\circ})}{15^{\circ} \cdot \text{h}^{-1}} \quad (3.1.b.1)$$

em que,

N = duração do fotoperíodo diário, (horas)

H = ângulo horário do pôr do Sol, (graus).

O ângulo horário do pôr do Sol (**H**), sobre uma superfície plana, desprezados os efeitos de refração da atmosfera é dada por:

$$H = \arccos(-\text{tg}(\phi) \cdot \text{tg}(\delta)) \quad (3.1.b.2)$$

em que,

ϕ = ângulo da latitude do local, (graus);

δ = ângulo da declinação solar do dia considerado, (graus).

A declinação solar (d), ângulo formado pelo raio vetor Terra-Sol, em graus, pode ser aproximadamente calculado por (VAREJÃO-SILVA, 2000):

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \text{sen}\left(\frac{360^\circ}{365} (284 + dj)\right) \quad (3.1.b.3)$$

em que,

dj = dia do ano, considerando-se 1º/janeiro como $dj=1$ e 31/dezembro, $dj=365$ ou 366.

O valor $0,83^\circ$, constante na equação (3.1.b.1), representa uma correção porque a atmosfera exerce sobre a radiação solar incidente um desvio na trajetória desta. Em outras palavras, esse valor representa um refinamento no cálculo do fotoperíodo considerando os efeitos de refração da atmosfera, desprezada na equação (3.1.b.2).

3.1.1. Análise multivariada

Conforme mencionado nos objetivos deste trabalho, parte das análises estatísticas foram executadas utilizando-se técnicas das chamadas análises multivariadas, tendo-se em vista avaliar simultaneamente os conjuntos de variáveis meteorológicas e fenológicas. O banco de dados foi integralmente preparado utilizando-se o programa Microsoft Excel[®]. Procedeu-se, então, a comparação entre o conjunto de variáveis meteorológicas com o conjunto de variáveis fenológicas derivadas de cada um dos três tratamentos. Posteriormente, procedeu-se a análise de componentes principais, utilizando-se desses mesmos conjuntos de variáveis.

3.1.1.1. Análise de correlação canônica

As análises foram efetuadas segundo os procedimentos matemáticos descritos no item 1.3.1.1. correlação canônica, utilizando-se o programa SAEG – Sistema de Análises Estatísticas, gentilmente cedido pela Fundação Arthur Bernardes, na pessoa do Coordenador do Programa SAEG, professor Fernando Antônio Theodoro. Os procedimentos operacionais seguidos foram os descritos em RIBEIRO JÚNIOR (2001).

As séries de dados, como já mencionadas, foram divididas em dois conjuntos, quais sejam, das variáveis meteorológicas e o das variáveis fenológicas. Esses conjuntos de variáveis, individualizados entre si, sofreram uma transformação linear, com a restrição da ortogonalidade entre as variáveis intra-conjuntos, formando-se assim um par canônico (conforme equações 1.3.1.1 e 1.3.1.2). A seguir procedeu-se ao teste de significância da correlação canônica (equações 1.3.1.3, 1.3.1.20 e 1.3.1.21). A descrição dos procedimentos matemáticos encontram-se na totalidade do item 1.3.1.1. Correlação canônica. Conforme já mencionado, na análise canônica, por ser invariante em ordem de grandeza das variáveis, não é necessária a centralização ou a normalização das variáveis.

A seguir apresenta-se a descrição dos conjuntos de dados comparados.

3.1.1.1.1. Variáveis meteorológicas e variáveis fenológicas

Foram comparadas as séries das variáveis meteorológicas com as fenológicas de cada um dos três tratamentos. As variáveis e suas unidades foram descritas no *caput* do item 3.1.1. análise multivariada, de maneira que a descrição das variáveis no Quadro 3.3, é apresentada sob uma notação simplificada.

Não foram sujeitas a esta análise as variáveis duração do fotoperíodo médios mensais e as médias diárias da insolação pela razão de que estas informações, ao menos, teoricamente, estão integradas à irradiância solar global.

Assim, para o tratamento j ($j = 1, 2$ ou 3), o $i^{\text{ésimo}}$ par canônico genericamente descrito pelas equações (1.3.1.1) e (1.3.1.2) toma a forma:

$$U_i = a_{i2} \cdot Tx + a_{i2} \cdot Tn + a_{i3} \cdot Tm + a_{i4} \cdot UR + a_{i5} \cdot Rg + a_{i6} \cdot U2 + a_{i7} \cdot (PPT+IRR_j) + a_{i8} \cdot ETR_j \quad (3.1.1.1)$$

e

$$V_i = b_{i1} \cdot FLO_j + b_{i2} \cdot FOL_j + b_{i2} \cdot LAN_j + b_{i2} \cdot NOV_j + b_{i2} \cdot PEC_j \quad (3.1.1.2)$$

Quadro 3.3. Composição dos grupos de variáveis analisadas

Variáveis Meteorológicas (X')	Variáveis Fenológicas (Y')
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperaturas Máximas mensais (Tx) ▪ Temperaturas Mínimas mensais (Tn) ▪ Temperaturas Médias mensais (Tm) ▪ Umidades Relativas médias mensais (UR) ▪ Irradiância solar global (Rg) ▪ Velocidade do vento a 2 m de altura (U2) ▪ Precipitação + Irrigação suplementar aplicada, no tratamento em análise (PPT+IRR_j) ▪ Evapotranspiração real, do tratamento em análise (ETR_j) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Queda de flores (FLO_j) ▪ Queda de folhas (FOL_j) ▪ Lançamento foliar (LAN_j) ▪ Frutos novos (NOV_j) ▪ Frutos pecos (PEC_j)

Entretanto, para o objetivo deste trabalho, que trata das respostas fenológicas no tempo, o conjunto de variáveis meteorológicas foi comparado com o conjunto de variáveis fenológicas defasadas desde 0 até 12 meses, para cada tratamento. Buscou-se desta maneira verificar se as variáveis meteorológicas e as fenológicas manteriam sua correlação com o passar do tempo. A Figura 3.3 ilustra esse esquema de defasagens entre zero e dois meses.

Tempo	Variáveis		Tempo	Variáveis		Tempo	Variáveis	
	M	F		M	F		M	F
0	M ₀	F ₀	0	M ₀	F ₁	0	M ₀	F ₂
1	M ₁	F ₁	1	M ₁	F ₂	1	M ₁	F ₃
2	M ₂	F ₂	2	M ₂	F ₃	2	M ₂	F ₄
3	M ₃	F ₃	3	M ₃	F ₄	3	M ₃	F ₅
4	M ₄	F ₄	4	M ₄	F ₅	4	M ₄	F ₆
5	M ₅	F ₅	5	M ₅	F ₆	5	M ₅	F ₇
	·	·		·	·		·	·
	·	·		·	·		·	·
t-3	M _{t-3}	F _{t-3}	t-3	M _{t-3}	F _{t-2}	t-3	M _{t-3}	F _{t-1}
t-2	M _{t-2}	F _{t-2}	t-2	M _{t-2}	F _{t-1}	t-2	M _{t-2}	F _t
t-1	M _{t-1}	F _{t-1}	t-1	M _{t-1}	F _t	t-1		
t	M _t	F _t	t			t		
	(a)			(b)			(c)	

Figura 3.3. Esquema das defasagens, no tempo, dos conjuntos de variáveis canônicas. (a) Comparação entre os conjuntos de variáveis meteorológicas (M) e fenológicas (F) sem defasagem temporal; (b) comparação entre os conjuntos de variáveis M e F com defasagem de 1 mês e (c) comparação entre os conjuntos de variáveis M e F com defasagem de 2 meses.

Com a finalidade de comparar, simultaneamente, os conjuntos de variáveis fenológicas, procedeu-se as análises canônicas também entre os tratamentos. Considerando que não há, em princípio, sentido em comparar os conjuntos de variáveis fenológicas entre diferentes tratamentos no decorrer do tempo, ou seja, comparações tais como mostradas nas Figuras 3.3 (b) e 3.3 (c), o procedimento adotado foi estático temporalmente, considerando tão somente os conjuntos de variáveis pareado sem quaisquer defasagens. Visualmente o procedimento adotado restringiu-se ao esquematizado na Figura 3.3.a.

Assim, para a comparação entre o tratamento j com o tratamento k , o $i^{\text{ésimo}}$ par canônico genericamente descrito pelas equações (1.3.1.1) e (1.3.1.2) tomam a forma:

$$U_i = a_{i2} \cdot \text{FLO}_j + a_{i2} \cdot \text{FOL}_j + a_{i3} \cdot \text{LAN}_j + a_{i4} \cdot \text{NOV}_j + a_{i5} \cdot \text{PEC}_j \quad (3.1.1.3)$$

e

$$V_i = b_{i1} \cdot \text{FLO}_k + b_{i2} \cdot \text{FOL}_k + b_{i2} \cdot \text{LAN}_k + b_{i2} \cdot \text{NOV}_k + b_{i2} \cdot \text{PEC}_k \quad (3.1.1.4)$$

3.1.1.2. Análise dos componentes principais

Como pode ser verificado no amplo rol de variáveis meteorológicas a serem analisadas, e principalmente, com vistas a avaliá-las no decurso do tempo, em que se inscrevem as séries temporais, a análise de componentes principais visou reduzir o número de variáveis – estes procedimentos tiveram como objeto unicamente o conjunto de variáveis meteorológicas – procurando-se descartar aquelas redundantes, ou seja, cujas informações estivessem contidas em outras.

O procedimento matemático seguido foi o descrito no item 1.3.1.2 Componentes Principais e seus sub-ítem. Da mesma maneira que para a análise canônica, lançou-se mão do programa SAEG – Sistema de Análises Estatísticas, seguindo os procedimentos operacionais descritos em RIBEIRO JÚNIOR (2001).

As variáveis meteorológicas submetidas à análise dos componentes principais foram: Temperaturas Máximas mensais (Tx); Temperaturas Mínimas mensais (Tn); Temperaturas Médias mensais (Tm); Umidades Relativas médias mensais (UR); Irradiância solar global (Rg); Número de horas de brilho solar (n); Duração do fotoperíodo (Fotop); Velocidade do vento a 2 m de altura (U2) e as Precipitações (PPT).

Assim, partindo-se da expressão genérica do $i^{\text{ésimo}}$ componente principal, a equação 1.3.1.22 toma a forma:

$$Y_i = a_{i1} \cdot \text{Tx} + a_{i2} \cdot \text{Tn} + a_{i3} \cdot \text{Tm} + a_{i4} \cdot \text{UR} + a_{i5} \cdot \text{Rg} + a_{i6} \cdot \text{n} + a_{i7} \cdot \text{Fotop} + a_{i8} \cdot \text{U2} + a_{i9} \cdot \text{PPT} \quad (3.1.1.5)$$

A inclusão das variáveis médias diárias da insolação (**n**) e duração do fotoperíodo (**Fotop**) visou a confirmação de que as informações nelas contidas também o estão em outras variáveis. Considerando que a inclusão ou a exclusão de uma variável influenciaria a estrutura das contribuições das demais variáveis, optou-se pela inclusão da precipitação, como variável cujas informações, estatisticamente, poderiam estar contidas em outra variável, excluindo-se, entretanto, da análise as irrigações suplementares.

Tendo em vista a diferença nas ordens de grandeza assumida pelos valores das variáveis meteorológicas (Figura 3.4), e considerando que o estudo dos componentes principais, ao contrário da análise canônica, é sensível às magnitudes dos valores das variáveis, procedeu-se os cálculos após a padronização das variáveis, segundo a equação 1.3.1.32. Isto significa que o procedimento matemático assumido foi a solução com base na matriz de correlação (**R**), desenvolvida no sub-ítem 1.3.1.2.1.2. Solução com base na matriz de correlação.

Afim de maximizar os maiores fatores de carga dos componentes principais e minimizar os menores procedeu-se a rotação em componentes principais conforme procedimentos encontrados no item 1.3.1.2.3. Considerou-se apenas os componentes principais, em ordem crescente, cuja retenção da variância total fosse superior a 1, conforme descrito na equação 1.3.1.36.

Conforme descrito no item 1.3.1.2.2. Eliminação de variáveis, descartou-se as variáveis com menor correlação com os componentes principais mais importantes (equação 1.3.1.37), ou seja, aqueles que retêm maior percentual da variância total.

3.1.2. Análise das séries temporais

Tomando-se as variáveis meteorológicas retidas na análise de componentes principais procedeu-se o estudo das séries temporais, buscando relacionar as séries meteorológicas com as fenológicas. Conforme relatado no item 3.1.1.2, de maneira imperativa incluiu-se as irrigações suplementares nestas análises. A estratégia escolhida, de modo análogo à análise canônica, foi considerar o total de água fornecido à cultura, em cada um dos três tratamentos estudados, como uma nova variável, fictícia, compreendendo as precipitações totais mensais acrescidas das irrigações suplementares, quando houveram.

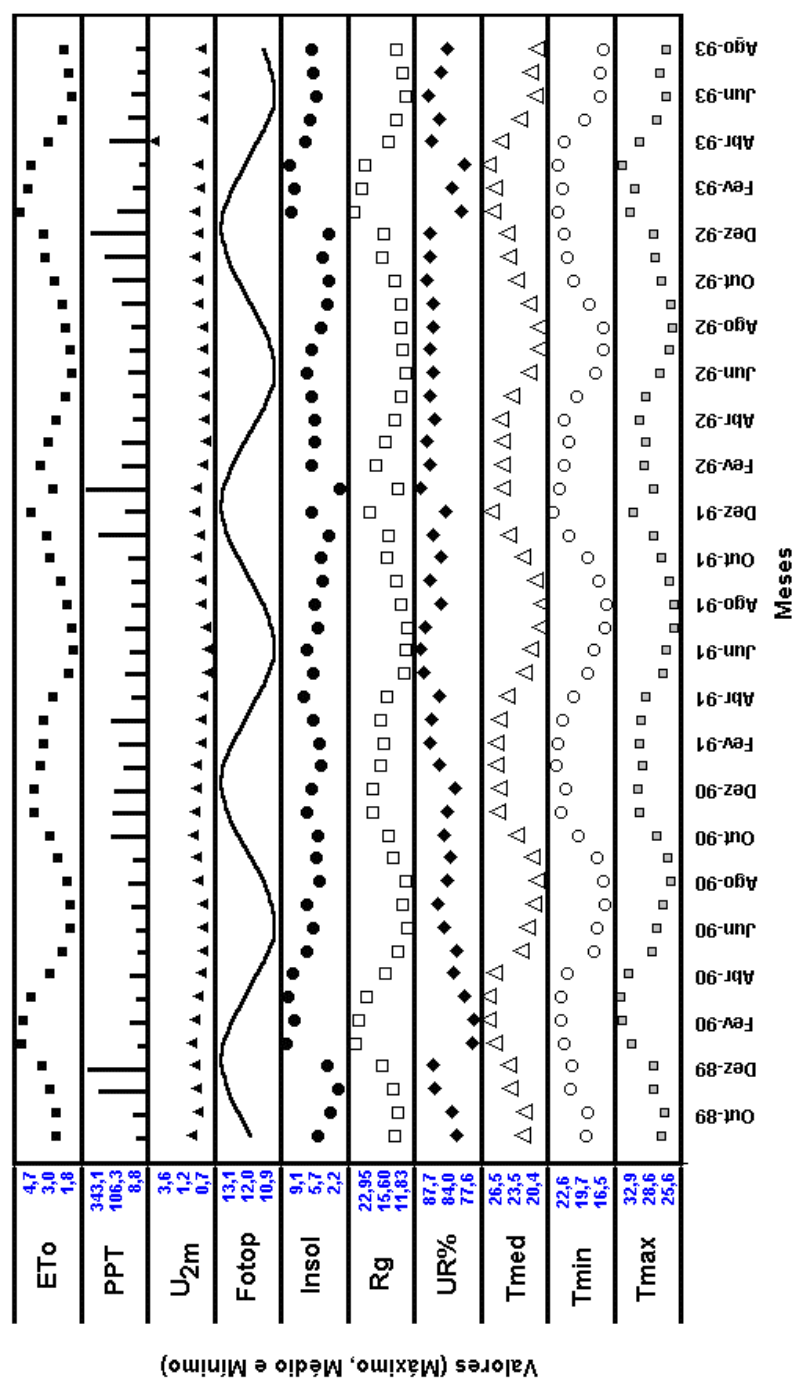


Figura 3.4. Séries temporais das variáveis meteorológicas, ordens de grandeza e suas variabilidades. Para cada variável, em ordem ascendente, aparecem descritos os valores mínimo, médio e máximo.

Buscando reconhecer as similaridades e dissimilaridades entre as séries fenológicas, também procedeu-se a comparação entre as séries temporais das variáveis fenológicas intra-tratamentos, quais sejam, queda de flores, queda de folhas, lançamento foliar, frutos novos e frutos pecos, bem como as comparações entre variáveis fenológicas idênticas entre tratamentos diferentes.

Para alcançar os objetivos supra-mencionados, as séries temporais – com seus dados normalizados (equação 1.3.1.32) – foram transformadas em séries de Fourier, suavizando as oscilações dos valores originais de cada série, em consonância com os procedimentos descritos no item 3.1.2.1., análise harmônica, detectando assim as frequências em que as periodicidades, no domínio do tempo, assinalam-se mais evidentes. Buscou-se a confirmação das periodicidades, no domínio do tempo, através do estudo das funções de autocovariância e autocorrelação de cada série temporal de dados padronizados.

Ao contrário dos procedimentos operacionais da análise multivariada, efetuados em um programa computacional comercial, o SAEG, as análises das séries temporais foram levadas a termo em programas, em linguagem BASIC, desenvolvidos pelo autor deste trabalho, especialmente para este estudo, à partir dos procedimentos matemáticos descritos no item 1.3.2., análise de séries temporais, e seus sub-ítem. Outra diferença, é que para estas análises os dados foram centralizados (equação 3.2.1) – tanto as séries das variáveis meteorológicas como as variáveis fenológicas – ao invés de padronizados pela equação (1.3.1.32).

$$x_{ij} = X_{ij} - \bar{X} \quad (3.2.1)$$

Este procedimento não transforma as variâncias a um valor unitário, mantendo-as em sua magnitude original, embora tanto uma expressão como a outra situem a média dos dados, imperativamente na origem do eixo, assumindo assim o valor nulo.

Como a função autocorrelação nunca é exatamente nula, há que se verificar se seu valor encontra-se dentro de certo intervalo de confiança, com certa probabilidade (α). Isto equivale a testar com certa probabilidade de erro, se o valor da função autocorrelação é, por hipótese igual a zero (HAAN, 1977). Assumindo que intervalo de confiança da função de autocorrelação para defasagem (t) seja

$$\frac{(-1 - z_{\alpha\%} \sqrt{n})}{(n-1)} \leq \rho(\tau) \leq \frac{(-1 + z_{\alpha\%} \sqrt{n})}{(n-1)}$$

em que,

n = número de dados da amostra, independente da redução do número de pares de dados com a seqüência de defasagens (neste estudo, este número é 48) e,

$z_{\alpha\%}$ = escore da curva normal reduzida cuja integral da origem até esse valor a área sob a curva seja $\alpha/2$ (Figura 3.4)

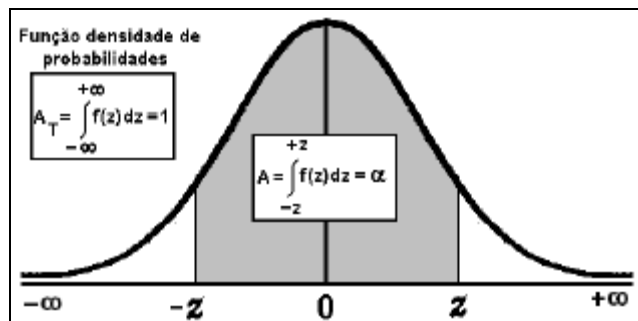


Figura 3.4. Representação do escore $z_{\alpha\%}$

Assim, tem-se que os valores inferiores e superiores da função $r(t)$ serão respectivamente: $[-0,2975; 0,2567]$ com 95% de probabilidade e $[-0,3852; 0,3444]$ com 99% de probabilidade.

A seguir, afim de comparar as séries temporais meteorológicas e fenológicas e as séries fenológicas entre si, e encontrar similaridades nas periodicidades entre elas, no domínio do tempo, procedeu-se os cálculos das funções de correlações cruzadas entre as séries de dados, conforme a mesma estratégia esquematizada na Figura 3.4.

Os coeficientes de correlação cruzada foram confrontados com os valores de t^{tabelado} , com $(n-2)$ graus de liberdade (GL), para o teste da hipótese de nulidade do coeficiente de correlação cruzada, considerando a defasagem de tempo, t ,

$$r(t) = 0$$

considerando os níveis de significância, α , de 95% e 99% de probabilidade. Os valores mínimos, absolutos, de significância foram obtidos da inversão de variáveis independente e dependente da equação (SPIEGEL, 1985):

$$|t_{\min}| = \frac{r(\tau)\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2(\tau)}} \quad (3.2.2)$$

em que,

n = número de dados pareados para a obtenção da correlação.

Com um nível α de probabilidade, os valores de $t^{\text{tabelado}}_{\alpha}$ foram estimados por interpolação não linear a partir da tabela de t de SPIEGEL (1985). Os valores limites inferiores e superiores, que definem a significância da rejeição da hipótese de nulidade, com probabilidades de 95% e 99%, dos coeficientes de correlação cruzada estão enumerados na Tabela 3.1.

Procedimentos similares foram realizados, com as séries temporais estudadas, no domínio da frequência, através das técnicas das análises espectrais. Como já foi mencionado, a análise espectral nada mais é do que a partição da variação de uma série temporal em componentes como duração ou intervalos dentro dos quais a variação ocorre. Isto é feito decompondo-se a série temporal em várias componentes, também séries temporais, mais simples. A soma desses componentes é igual à série original, bem como a soma das variações de todas elas também é igual à da série original.

À semelhança do estudo da periodicidade de cada série temporal estudada, no domínio do tempo, utilizando-se da função de autocorrelação, a periodicidade das séries foram avaliadas, no domínio da frequência, pela técnica da análise autoespectral. *Mutatis mutandi*, as comparações entre as séries, que nos itens precedentes foram – no domínio do tempo – avaliadas através da função de correlação cruzada, no domínio da frequência para as avaliações utilizou-se da técnica da análise espectral cruzada. Tais procedimentos foram descritos, em detalhe, no item 1.3.2.2. e sub-itens.

Tabela 3.1. Limites inferiores e superiores para rejeição da hipótese de nulidade do coeficiente de correlação cruzada

Defasagem (meses)	n	GL	t- (tabelado)		NÍVEL DE PROBABILIDADE			
			com nível de		95%		99%	
			Probabilidade		Limite	Limite	Limite	Limite
			95%	99%	Inferior	Superior	Inferior	Superior
0	48	46	1,676	2,408	-0,2399	0,2399	-0,3346	0,3346
1	47	45	1,677	2,410	-0,2425	0,2425	-0,3380	0,3380
2	46	44	1,677	2,411	-0,2451	0,2451	-0,3416	0,3416
3	45	43	1,678	2,413	-0,2478	0,2478	-0,3453	0,3453
4	44	42	1,678	2,414	-0,2507	0,2507	-0,3491	0,3491
5	43	41	1,679	2,416	-0,2536	0,2536	-0,3530	0,3530
6	42	40	1,679	2,417	-0,2566	0,2566	-0,3570	0,3570
7	41	39	1,680	2,419	-0,2597	0,2597	-0,3611	0,3611
8	40	38	1,680	2,420	-0,2629	0,2629	-0,3654	0,3654
9	39	37	1,682	2,424	-0,2665	0,2665	-0,3702	0,3702
10	38	36	1,684	2,428	-0,2702	0,2702	-0,3751	0,3751
11	37	35	1,686	2,432	-0,2741	0,2741	-0,3802	0,3802
12	36	34	1,688	2,436	-0,2781	0,2781	-0,3855	0,3855

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

obscurum per obscurius

4.1.1. Análise multivariada

4.1.1.1. Análise de correlação canônica

4.1.1.1.1. Análise de correlação canônica entre as variáveis meteorológicas e as fenológicas

Os resultados da análise canônica, realizada conforme descrito no item 3.1.1.1.1., estão sintetizados nas Figura 4.1.

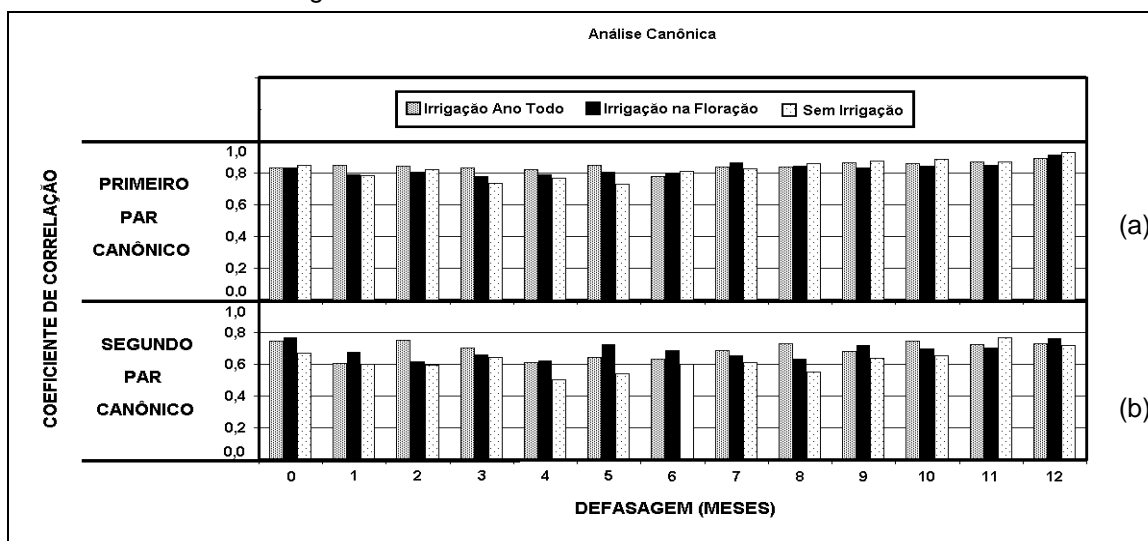


Figura 4.1. Resultados da análise canônica. Coeficientes de correlação entre o (a) primeiro par canônico e (b) o segundo par canônico das variáveis meteorológicas e fenológicas defasados temporalmente de zero a 12 meses.

Pode-se perceber claramente que o grau de correlação entre o grupo das variáveis meteorológicas com o das fenológicas tendem manter-se relativamente altos, qualquer que seja a defasagem tomada. Esse efeito é mais evidente para os tratamentos irrigados (tratamentos 1 e 2). No tratamento 3, sem irrigação, nota-se, entretanto, uma ligeira queda da correlação entre os eventos meteorológicos e fenológicos com até cinco meses de defasagem, voltando a se elevar a partir daí. Isto leva a crer que os efeitos dos eventos meteorológicos sobre a fenologia do cacau não se encerra totalmente no tempo. Ablanda-se, mas não se encerra. Em outras palavras, os acontecimentos meteorológicos apresentam uma apreciável persistência dos efeitos, sobre a fenologia, com oscilações entre um máximo de correlação e um mínimo de cinco meses. Estas verificações foram também observadas por ALVIM (1975), que encontrou uma defasagem de seis meses entre um evento meteorológico e os efeitos fenológicos, e LEITE & VALLE (2000), que observaram que a produção do cacau se desenvolve em dois ciclos de 12 meses, sendo dois invernos e dois verões – seis meses cada, pois. Estas observações podem ser verificadas tanto avaliando o primeiro quanto o segundo par canônico, reforçado pelo fato de serem ortogonais, isto é independentes, entre si.

4.1.1.1.2. Análise de correlação canônica entre as variáveis fenológicas e as fenológicas entre tratamentos diferentes

Os resultados da comparação entre os grupos fenológicos entre os três tratamentos estão sumarizados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1. Coeficientes de correlação dos primeiro, segundo e terceiro pares canônicos relacionando os conjuntos de variáveis fenológicas

Comparações	Coeficientes de correlação canônica	
	Primeiro par canônico	Segundo par canônico
Trat 1 vs Trat 2	0,94657**	0,87642**
Trat 2 vs Trat 3	0,88052**	0,78917**
Trat 1 vs Trat 3	0,88611**	0,60954**

** Todas as comparações apresentam significância acima de 99% de confiabilidade.

Embora a comparação, em um "corte transversal" do tempo, entre os pares canônicos, originados dos conjuntos das variáveis fenológicas dos vários tratamentos, apresentem correlações altamente significativas entre si, nota-se, no entanto, uma ligeira tendência de os tratamentos irrigados (1 e 2) apresentarem maior similaridade. O mesmo não se pode afirmar quanto à comparação entre os tratamentos irrigados com o não irrigado (tratamento 3), ainda que durante o período de 1991 e 1992 as chuvas apresentaram-se bem distribuídas, sendo necessárias, em número, poucas irrigações.

Estas análises, ainda que não se possa apoiar decisivamente na estatística apresentada, corroborariam as conclusões obtidas por AUGUSTO (1997) com os dados deste mesmo experimento. Esse autor concluiu, que nas condições em que foram conduzidos este mesmo experimento, que ora é analisado, não seria necessária a irrigação do cacauzeiro durante todo o ano, bastando executá-la, dentre outras estratégias, durante os períodos de pico dos estádios de formação da almofada floral e floração (outubro a abril, em Linhares, ES), configurado pelo tratamento 2, deste trabalho.

Entretanto, o apoio sólido, que não está presente no Quadro 4.1 para as afirmações anteriores, pode ser observado na Figura 4.2. A referida Figura 4.2. mostra a distribuição dos primeiros e segundo pares canônicos comparativos entre os tratamentos. Percebe-se, claramente, a semelhança entre os tratamentos irrigados, 1 e 2, bem como a dessemelhança entre os tratamentos irrigados, quando comparados com o não irrigado, 3. Ainda com relação à Figura 4.2. a linha diagonal representa a relação 1:1 entre os pares canônicos. Para melhor comparação visual todos gráficos componentes desta figura apresentam eixos, ordenadas e abscissas, com as mesmas escalas.

4.1.1.2. Análise dos componentes principais

A análise dos componentes principais, restringiu-se às variáveis meteorológicas, na tentativa de estabelecer quais são aquelas que devem ser retidas para a análise comparativa com as fenológicas. Como, também foi enfatizado, em razão das diferenças nas amplitudes dos valores assumidos pelas variáveis, optou-se por realizar as análises com base na matriz de correlação (**R**).

Os autovalores e as percentagens das variâncias associadas aos componentes principais, e as percentagens das variâncias acumuladas, cujos cálculos matemáticos foram descritos no item 1.3.1.2.1.2. Solução com base na matriz de correlação, são apresentados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2. Autovalores (I) e percentuais das variâncias associadas do primeiro ao k^{ésimo} componente principal (CP), e percentuais das variâncias acumuladas

CP	Autovalores (I)	% de Var do CP	% de Var acumulada
1	4,795488	0,5328	0,5328
2	2,347902	0,2609	0,7937
3	0,8665109	0,0963	0,8900
4	0,5919265	0,0658	0,9558
5	0,2117483	0,0235	0,9793
6	0,1551255	0,0172	0,9965
7	0,1896361E-01	0,0021	0,9986
8	0,1090368E-01	0,0012	0,9998
9	0,1431015E-02	0,0002	1,0000

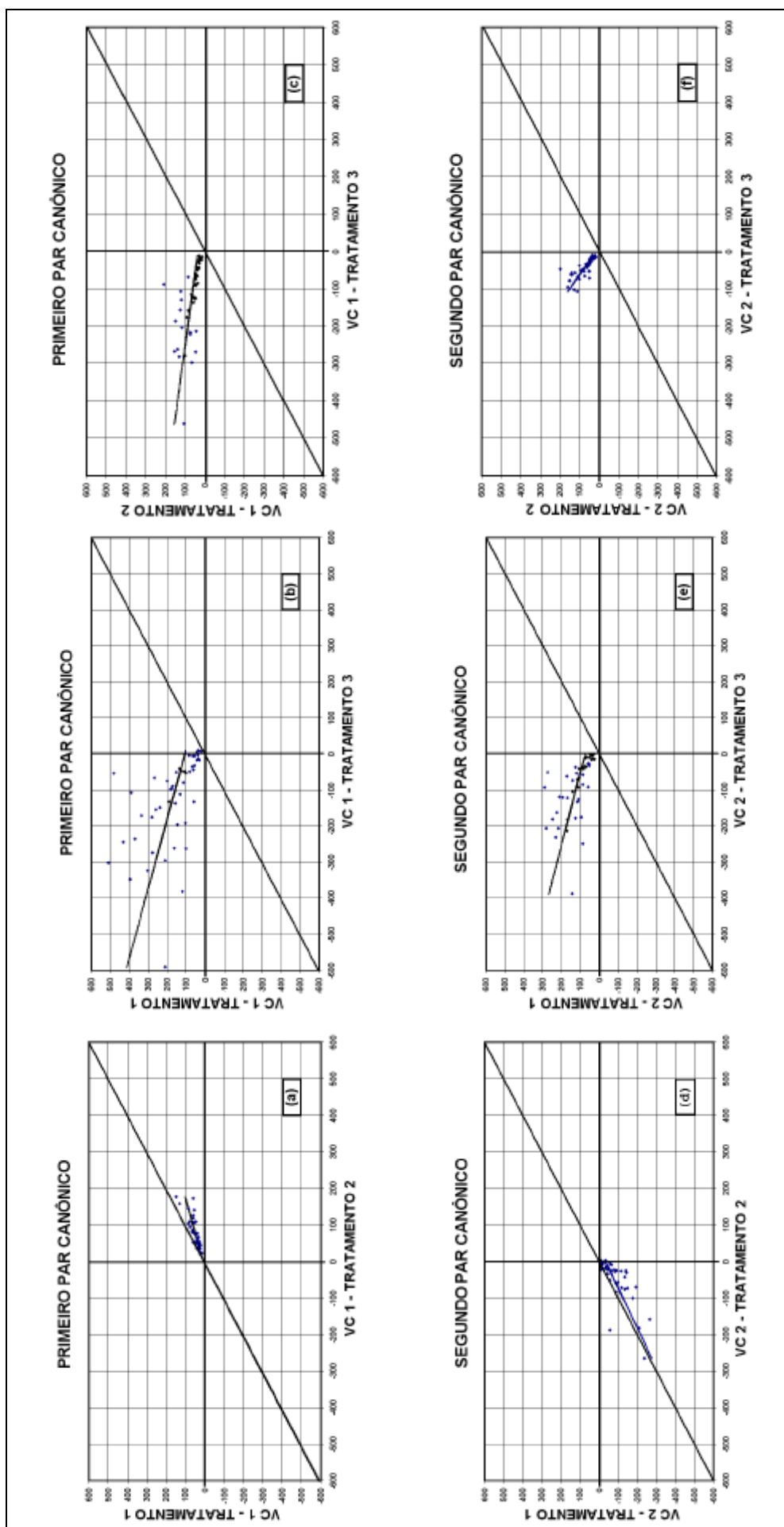


Figura 4.2. Comparação gráfica entre as variáveis canônicas dos primeiros e segundos pares canônicos (PC):
 (a) 1º PC do Trat.2 vs Trat.1; (b) 1º PC do Trat.3 vs Trat.1; (c) 1º PC do Trat.3 vs Trat.2;
 (d) 2º PC do Trat.2 vs Trat.1; (e) 2º PC do Trat.3 vs Trat.1 e (f) 2º PC do Trat.3 vs Trat.2.

Utilizado-se o critério empregado na equação (1.3.1.33) e conseqüentemente (1.3.1.36), depreende-se que deve-se considerar apenas o 1º e o 2º componentes principais. Qual seja, considerar apenas os componentes principais cujos autovalores sejam superiores a 1. Nota-se que este critério praticamente atende também a exigência sugerida por CRUZ & REGAZZI (1997), que consideram desejável que a variância acumulada nos dois primeiros componentes principais exceda a 80%. No caso em tela, a percentagem da variância acumulada atingiu 79,37%.

A partir dos autovalores (I) calculou-se os coeficientes a_{ij} dos nove componentes principais descritos genericamente pela equação

$$Y_i = a_{i1}.Tx + a_{i2}.Tn + a_{i3}.Tm + a_{i4}.UR + a_{i5}.Rg + a_{i6}.n + a_{i7}.Fotop + a_{i8}.U2 + a_{i9}.PPT \quad (3.1.1.5)$$

os quais, estão apresentados no Quadro 4.3. As correlações de cada coeficiente dos componentes principais encontram-se no Quadro 4.4.

Quadro 4.3. Coeficientes a_{ij} , ou fatores de carga, dos componentes principais.

Variáveis	C o e f i c i e n t e s								
	1° CP	2° CP	3° CP	4° CP	5° CP	6° CP	7° CP	8° CP	9° CP
Tx	0,19413	-0,08826	0,15750	0,36067	0,36704	-0,69059	4,72514	1,92353	-9,75725
Tn	0,19079	0,12227	-0,18909	0,28818	0,60116	0,15772	4,35168	-2,33921	*****
Tm	0,20032	0,03286	-0,18644	0,29153	0,52456	-0,28712	0,54522	0,32450	21,25944
UR	-0,11483	0,26426	-0,26629	0,77013	-0,27897	1,39075	-1,34870	0,89832	0,58172
Rg	0,19703	-0,04961	-0,03234	-0,29861	-0,82296	1,03599	-2,01093	-5,78848	1,30441
n	0,09428	-0,34762	0,01026	0,38834	-1,26933	0,19312	2,27626	3,56655	-0,51502
Fotop	0,15469	0,22093	-0,04487	-0,66869	-0,00651	0,87226	0,11635	5,93024	-1,31836
U2	0,08593	0,09401	0,99224	0,32906	0,19642	0,32652	-0,26635	0,20910	0,27808
PPT	0,04592	0,38899	0,01108	0,05267	-1,24354	-1,39641	0,20625	-0,43551	-0,20005

Quadro 4.4. Correlação entre os coeficientes a_{ij} e os componentes principais.

Variáveis	C o r r e l a ç õ e s								
	1° CP	2° CP	3° CP	4° CP	5° CP	6° CP	7° CP	8° CP	9° CP
Tx	0,93095	-0,20723	-0,13648	0,21349	0,07772	-0,10713	-0,08961	0,02097	-0,01396
Tn	0,91492	0,28708	-0,16385	0,17058	0,12729	0,02447	0,08252	-0,02551	-0,01738
Tm	0,96063	0,07715	-0,16155	0,17256	0,11107	-0,04454	0,01034	0,00354	0,03042
UR	-0,55064	0,62045	-0,23074	0,45586	-0,05907	0,21574	-0,02558	0,00979	0,00083
Rg	0,94487	-0,11648	-0,02802	-0,17676	-0,17426	0,16071	-0,03813	-0,06312	0,00187
n	0,45211	-0,81619	0,00889	0,22987	-0,26878	0,02996	0,04317	0,03889	-0,00074
Fotop	0,74179	0,51871	-0,03888	-0,39581	-0,00138	0,13531	0,00221	0,06466	-0,00189
U2	0,41205	0,22072	0,85979	0,19478	0,04159	0,05065	-0,00505	0,00228	0,00040
PPT	0,22023	0,91331	0,00960	0,03118	-0,26332	-0,21662	0,00391	-0,00475	-0,00029
Exp1	0,53283	0,26088	0,09628	0,06577	0,02353	0,01724	0,00211	0,00121	0,00016
Acum	0,53283	0,79371	0,88999	0,95576	0,97929	0,99652	0,99863	0,99984	1,00000

Avaliando os coeficientes de correlação entre os dois componentes principais retidos e os coeficientes a_{ij} associados a cada variável, pode-se notar que apenas a variável velocidade do vento (U2) tem sua maior correlação com o terceiro componente principal, que foi descartado, pelos critérios adotados.

4.1.1.2.2. Rotação em componentes principais

Conforme já mencionado, o propósito da rotação em componentes principais é interpretar a estrutura de um conjunto de dados multivariados a partir da respectiva matriz de variâncias-covariâncias, com o objetivo de maximizar os maiores valores dos fatores de carga e minimizar os valores mais baixos dos fatores de carga, possibilitando com essa técnica obter resultados mais facilmente interpretáveis.

Os novos fatores de carga, maximizados os maiores e minimizados os menores, após os procedimentos de rotação em componentes principais, estão apresentados no Quadro 4.5.

Observa-se que após a rotação, os elementos meteorológicos mantidos nos dois primeiros componentes principais foram as temperaturas máximas, mínimas e médias, irradiância solar global e insolação.

Quadro 4.5. Fatores de carga dos componentes principais, após a rotação.

Variáveis	C o r r e l a ç õ e s							
	1° CP	2° CP	3° CP	4° CP	5° CP	6° CP	7° CP	8° CP
Tx	0,90689	-0,29159	0,09148	-0,26197	0,04496	0,02730	-0,11217	-0,00860
Tn	0,93948	0,01148	0,14863	-0,00659	-0,20259	0,21253	0,09081	0,01152
Tm	0,95863	-0,11527	0,11922	-0,14155	-0,10703	0,14505	0,00351	0,01134
UR	-0,23340	0,22731	-0,10125	0,89970	-0,24209	-0,12461	0,00370	0,00006
Rg	0,69466	-0,31411	0,12298	-0,36195	-0,05458	0,50463	-0,01017	-0,12213
n	0,30138	-0,80801	0,01389	-0,32291	0,38431	-0,06411	-0,00356	-0,00383
Fotp	0,56071	0,25488	0,12786	-0,17597	-0,39679	0,64318	0,00734	0,04637
U2	0,16617	-0,01147	0,97344	-0,08016	-0,11962	0,06270	0,00024	-0,00103
PPT	0,20761	0,25584	0,16457	0,26360	-0,88062	0,13917	0,00436	-0,00182
Expl	0,53283	0,26088	0,09628	0,06577	0,02353	0,01724	0,00211	0,00121
Acum	0,53283	0,79371	0,88999	0,95576	0,97929	0,99652	0,99863	0,99984

Adiante-se desde já, que os resultados obtidos, avaliados sob o ponto de vista físico-meteorológico podem parecer absurdos. Algumas considerações contrargumentando os resultados podem ser tecidas: (1) de posse das temperaturas máximas e mínimas, a temperatura média seria uma informação redundante; (2) as informações contidas no elemento insolação, número de horas de brilho solar – mais tecnicamente, intervalo total de tempo durante o fotoperíodo de um dia em que ocorre a irradiância solar direta, já estaria contemplado na variável irradiância solar global, esta sim, mais completa e mais importante representando o total de energia solar incidente sobre uma superfície tangente à superfície da Terra, suposta esférica, no local da medida; (3) o fotoperíodo, ou melhor, a sazonalidade do fotoperíodo é reconhecidamente um fator de extrema importância agrônômica, induzindo, após um ou outro ponto de inflexão, a mudança de estádios fenológicos e (4) parece pouco crível que as informações da umidade relativa e da precipitação estejam, integralmente, contidas nas variáveis mantidas.

Se as avaliações proporcionadas pela técnica dos componentes principais parecem absurdas do ponto de vista físico, o mesmo não pode ser afirmado quando se compara os elementos meteorológicos enquanto variáveis em sua apresentação numérica. Para melhor avaliação, do ponto de vista estatístico-matemático, no Quadro 4.6 são apresentados os valores do coeficiente de correlação de Pearson que mede o grau de inter-relação entre as variáveis pareadas duas a duas. As variáveis mantidas após a rotação em componentes principais aparecem no Quadro 4.6, em caracteres itálico negrito. No mesmo quadro foram destacados os maiores coeficientes de correlação entre as variáveis descartadas e as mantidas. A questão da velocidade do vento (U2) já foi discutida anteriormente.

Quadro 4.6. Correlação de Pearson entre os elementos meteorológicos.

	<i>Tx</i>	<i>Tn</i>	<i>Tm</i>	UR	<i>Rg</i>	<i>n</i>	Fotp	U2	PPT
<i>Tx</i>	1.00000	0.85062	0.94933	-0.53760	0.84116	0.61075	0.49047	0.26041	0.02340
<i>Tn</i>		1.00000	0.97023	-0.21473	0.78566	0.18620	0.76814	0.33876	0.42906
<i>Tm</i>			1.00000	-0.38153	0.84563	0.37895	0.68460	0.30990	0.26626
UR				1.00000	-0.62134	-0.63100	-0.22825	-0.19092	0.42606
<i>Rg</i>					1.00000	0.52892	0.72935	0.30605	0.10715
<i>n</i>						1.00000	-0.17229	0.04877	-0.57434
Fotp							1.00000	0.31656	0.59515
U2								1.00000	0.28470
PPT									1.00000

Verificando-se os resultados expressos no Quadro 4.6. percebe-se que, em concordância com as contrargumentações anteriores, a técnica utilizada acusou a alta correlação entre a temperatura média e as temperaturas mínimas e máximas; manteve a insolação, mesmo que a correlação com a irradiância solar global não fosse desprezível – ainda que também se possa interpretar a insolação – correlacionada com a temperatura máxima – pelo seu reverso, a duração do período nublado do dia – correlacionado com a umidade relativa –; o fotoperíodo apresentando altas correlações com as temperaturas mínima e média e a precipitação com razoáveis correlações, em ordens de grandeza semelhantes com o fotoperíodo e a insolação, ou melhor com seu reverso, já que a correlação é negativa.

Mesmo admitindo-se a razão de ser dos descartes efetuados é de se verificar que a análise não foi capaz de verificar as relações de causa e efeito, tomando uma pela outra, resguardando apenas, e é esse seu *modus faciendi*, as quantidades de variância, ou das informações supostamente existentes. Não reteve nenhum elemento meteorológico que indicasse a quantidade de vapor de água na atmosfera, ainda que esta informação possa estar

encriptada nas temperaturas, ou mesmo no reverso da insolação. Não reteve também a precipitação, que do ponto de vista agrícola é de interesse prioritário. A chuva é um evento único sob certo sentido, e mesmo considerando a razoável correlação entre a precipitação e a nebulosidade, não há porque eliminar a variável precipitação, na esperança que em havendo nuvens a precipitação seja imperiosa, haja visto que a correlação estando próximo a 50%, não é muito diferente da filosófica dicotomia cartesiana do sim/não, ou chove ou não chove.

Ainda que a afirmação a seguir sugira uma expectativa frustrada, a conclusão que se apresenta, *a priori*, é que as técnicas dos componentes principais, pelo menos aquelas utilizadas, se são de grande utilidade em outras áreas, inclusive na climatologia – cite-se a separação de locais com características climáticas similares e/ou dissimilares, por exemplo a encontrada em SILVA (2001) – não parecem apresentar resultados satisfatórios, vistos do ponto de vista físico, quando utilizadas em dados descritos em seqüências temporais.

Com estas considerações, descartou-se da análise canônica, na realidade realizada cronologicamente após à dos componentes principais, apenas a variável insolação, pois se as informações contidas em outras variáveis também estão nela contidas, o inverso também é verdadeiro. Do ponto de vista operacional, optou-se por manter as outras variáveis, ao invés da insolação, pelo fato da variável insolação não mais ser um dado obtido nas estações meteorológicas automáticas, cuja malha de distribuição aumenta consideravelmente nos últimos anos.

4.1.2. Análise de séries temporais

4.1.2.1. Análise harmônica de Fourier

Os resultados da análise de Fourier, expresso pela estatística variância relativa de cada harmônico, encontram-se sintetizados nas Figuras 4.3 a 4.8. A Figura 4.3. representa graficamente os resultados das variáveis meteorológicas coletadas na estação meteorológica. A Figura 4.4. compara os resultados da variável evapotranspiração real estimada para cada tratamento, quais sejam: Tratamento 1 (irrigação suplementar durante o ano todo), Tratamento 2 (irrigação suplementar durante o período de formação da almofada floral e floração) e Tratamento 3 (sem irrigação suplementar). A Figura 4.5. compara os resultados da variável (precipitação + irrigação suplementar). As Figuras 4.6. a 4.8. comparam os resultados obtidos das variáveis fenológicas para cada tratamento. Nessas figuras, o primeiro harmônico corresponde a um período de 48 meses, o segundo, 24, o terceiro, 16, e assim sucessivamente.

A Figura 4.3., das séries meteorológicas revelam, pelas variâncias relativas dos harmônicos, que de uma maneira geral existe uma prevalência de periodicidade de 12 meses, um ano, no quarto harmônico. Os valores percentuais entre parênteses indicam as variâncias relativas do harmônico mencionado, para a variável em discussão. Essas variâncias relativas representam a percentagem da variância total da variável, suavizada pela série de Fourier, contidas no harmônico em questão. Essa forte sazonalidade é encontrada nos elementos temperaturas máxima (76,94%), mínima (90,25%) e média (89,12%), irradiância solar global (69,67%), e obviamente fotoperíodo (99,95%). A origem dessa sazonalidade é a própria ciclicidade das relações astronômicas Terra-Sol.

Outras variáveis meteorológicas, entretanto, embora apresentem a mesma tendência cíclica com período de uma ano, apresentam outras ondas que se destacam: a insolação, ou o seu inverso, a nebulosidade, apresenta, além do harmônico anual (34,13%), uma segunda onda importante com período de 6,857 meses, sétimo harmônico (11,74%). A precipitação, que conforme detectado pelo coeficiente de Pearson, tem sua segunda maior correlação com a insolação, apresenta, além da ciclicidade anual (35,45%), a segunda onda importante com período semestral, oitavo harmônico (11,47%), desconhecida, portanto da segunda onda da insolação. Esse desacoplamento entre as ondas da precipitação e da nebulosidade, poderia ser explicado pela correlação da primeira variável também com o fotoperíodo, mas este apresenta a mais forte periodicidade anual de todas as variáveis analisadas, e também com a umidade relativa.

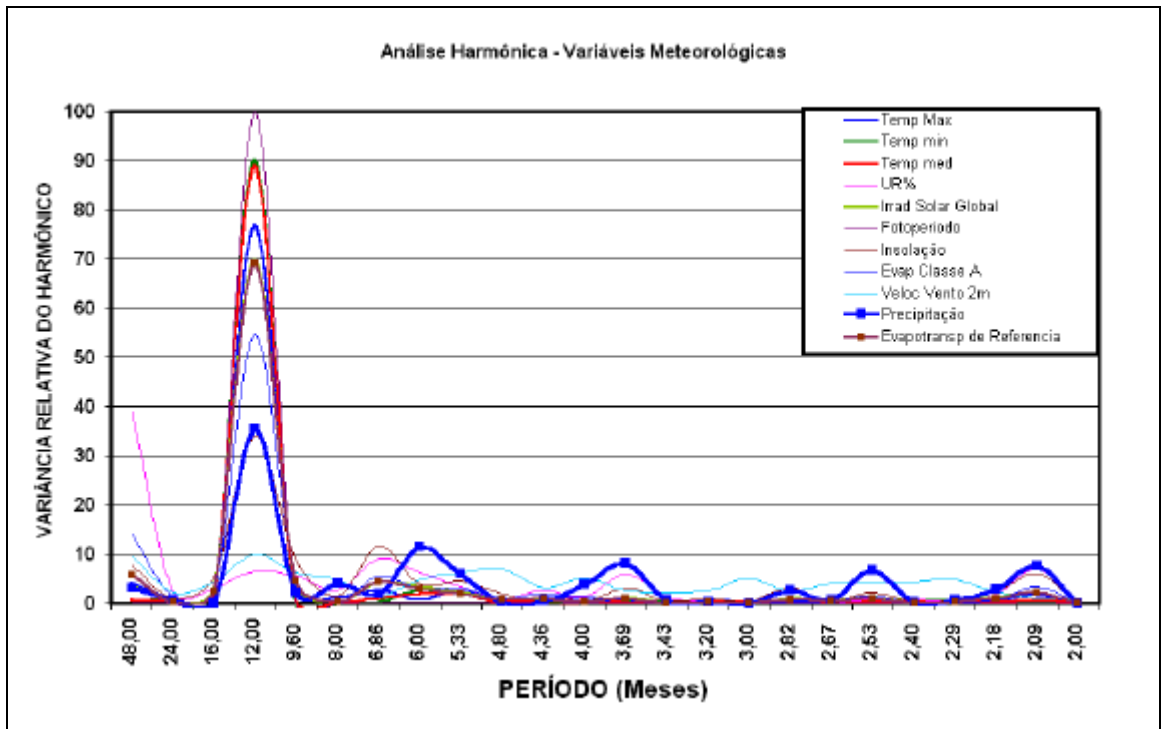


Figura 4.3. Comparação dos resultados da análise de Fourier para as variáveis meteorológicas.

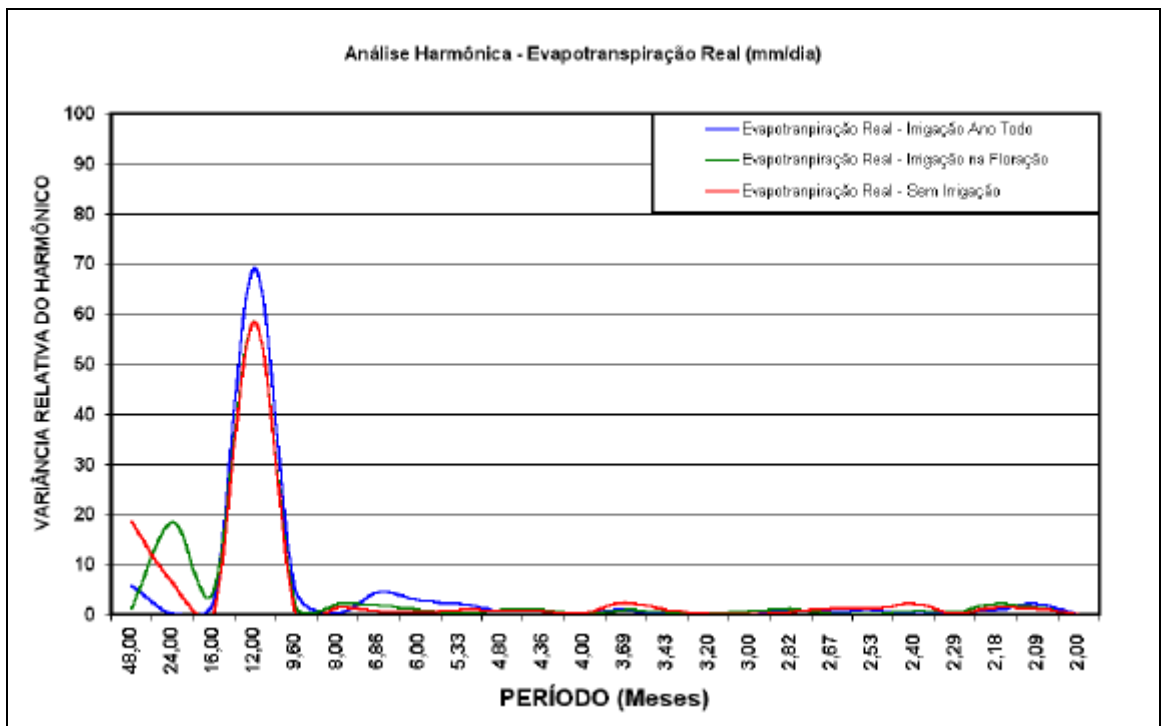


Figura 4.4. Comparação dos resultados da análise de Fourier para a variável evapotranspiração real estimada.

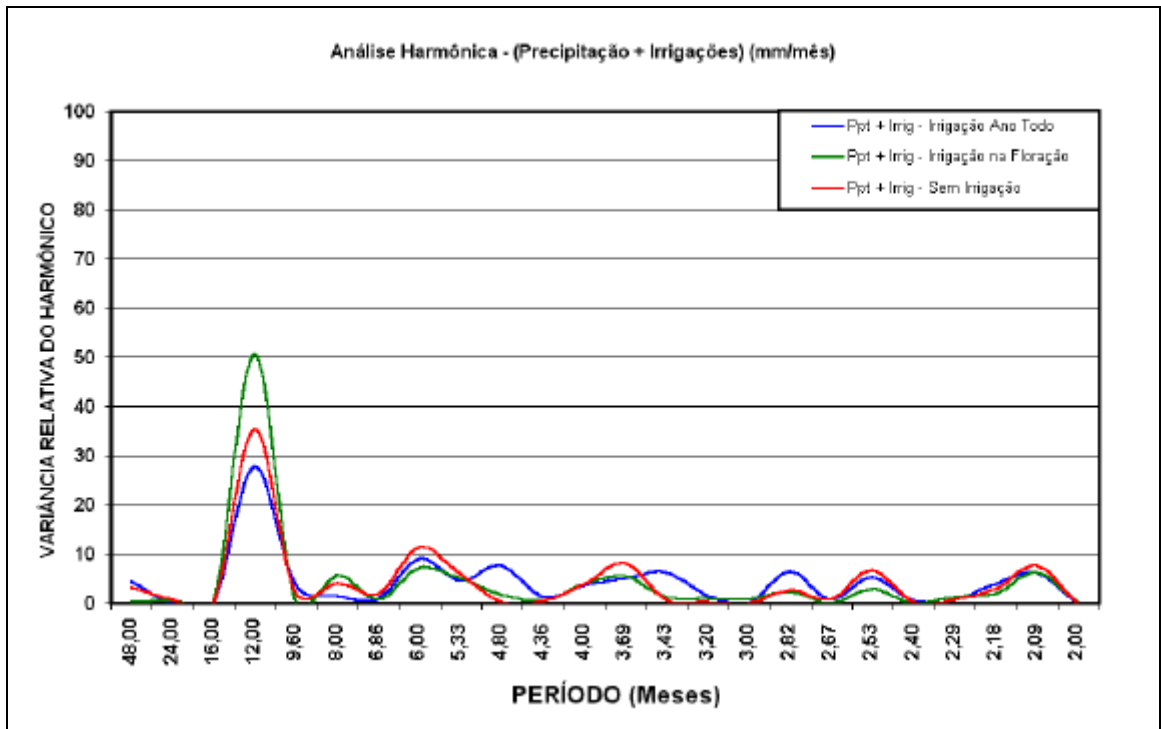


Figura 4.5. Comparação dos resultados da análise de Fourier para a variável (precipitação + irrigações suplementares).

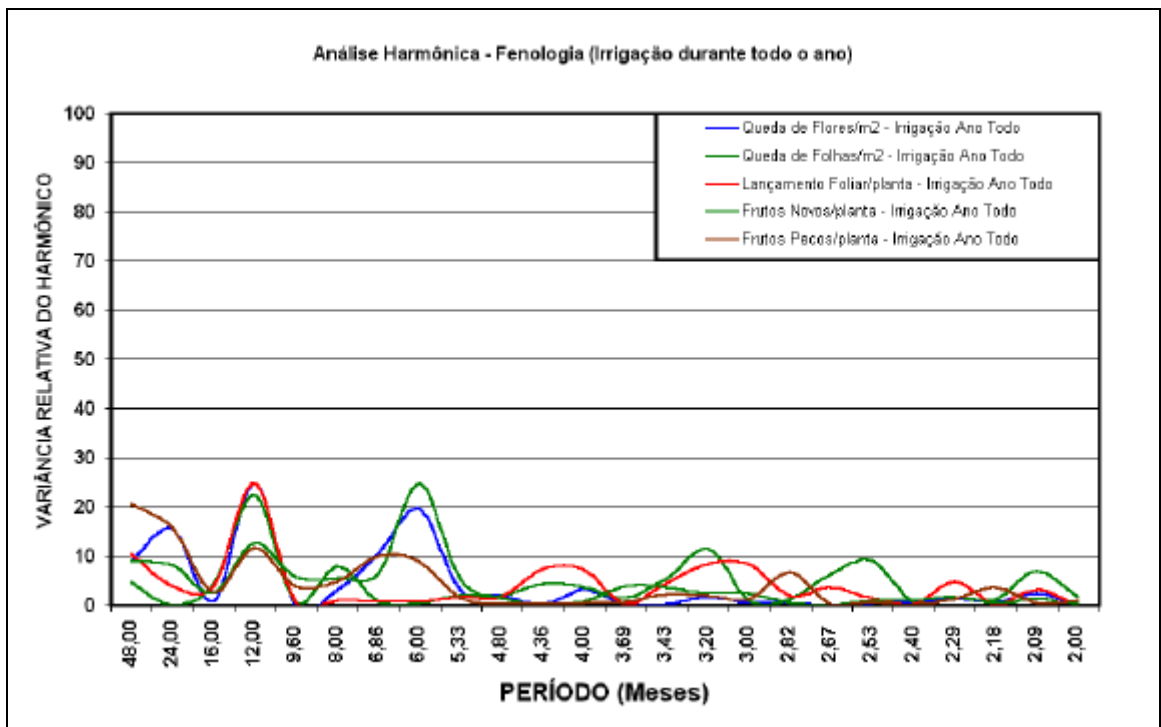


Figura 4.6. Comparação dos resultados da análise de Fourier para as variáveis fenológicas do Tratamento 1.

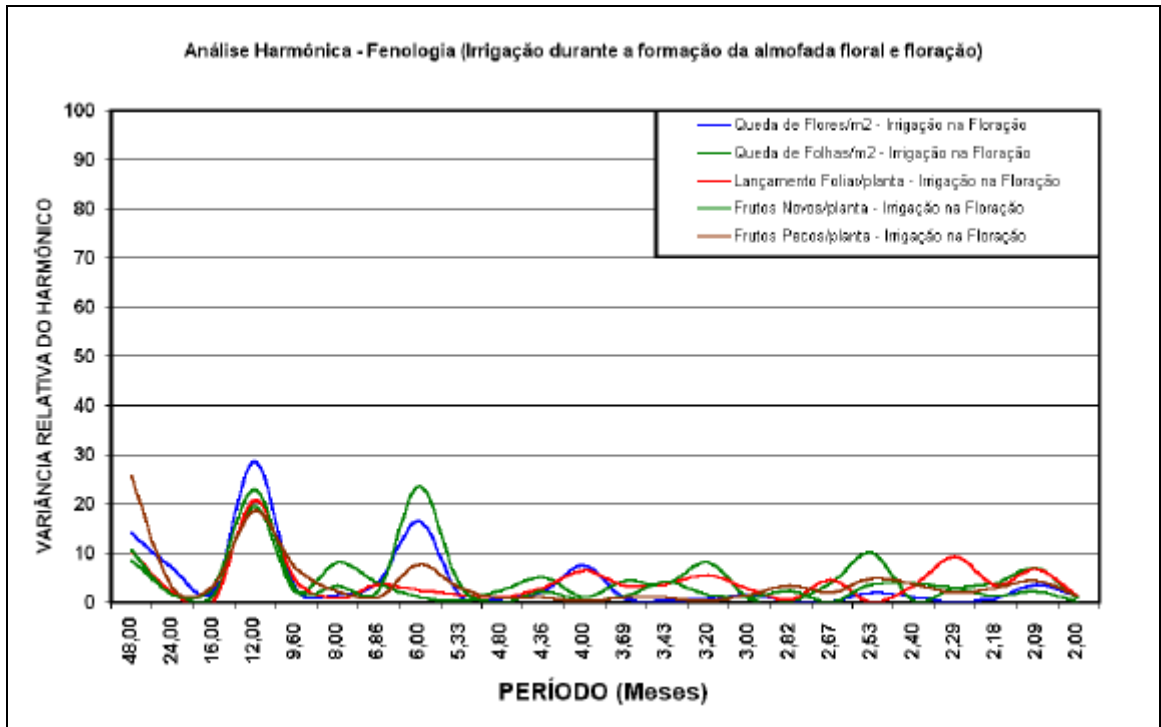


Figura 4.7. Comparação dos resultados da análise de Fourier para as variáveis fenológicas do Tratamento 2.

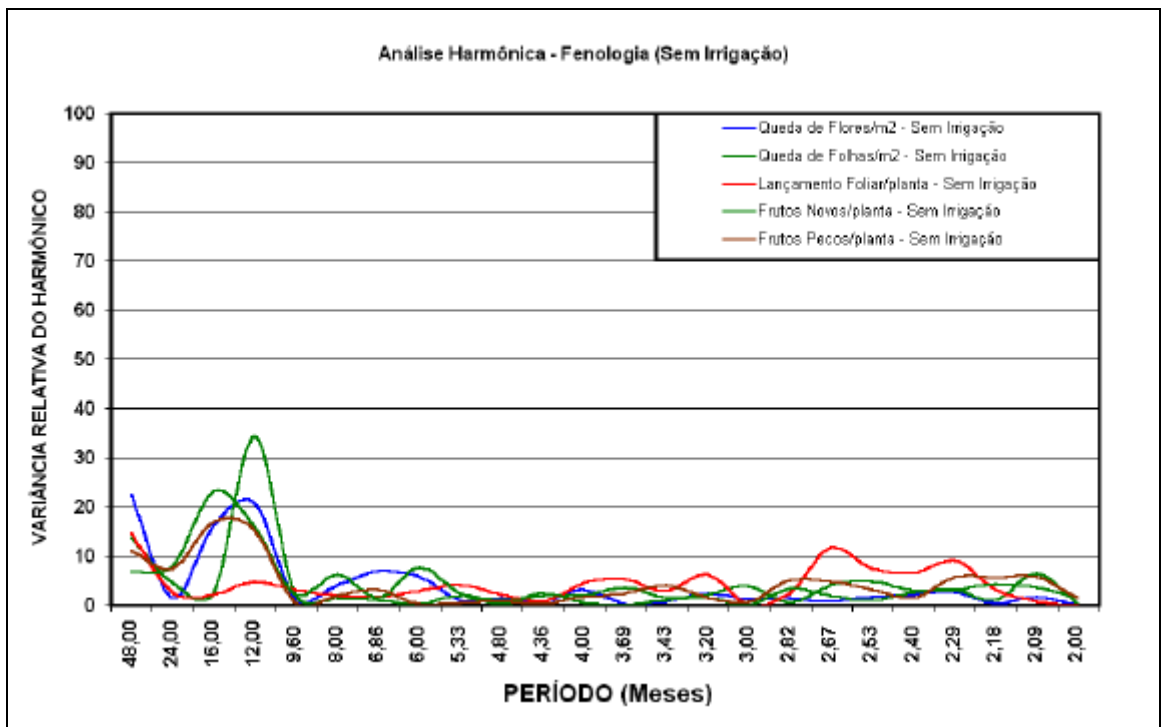


Figura 4.8. Comparação dos resultados da análise de Fourier para as variáveis fenológicas do Tratamento 3.

A umidade relativa, entretanto, apresentou um comportamento *sui generis* com a onda mais importante, apresentando-se no primeiro harmônico, ou seja período de 48 meses (38,91%), que o número total de dados, donde conclui-se que, esta variável tem caráter aleatório, embora apresente um segundo harmônico, o sétimo – 6,857 meses, idêntico ao da insolação – de importância bem mais reduzida (9,12%). De maneira análoga, a velocidade do vento não apresentou nenhuma periodicidade marcante. Os maiores valores de variância relativa ocorreram no primeiro harmônico (9,43%), mostrando aleatoriedade e no quarto harmônico (9,90%), anual.

Quanto à variável evapotranspiração real, estimada penalizando-se a de referência, indexada do conteúdo de água no solo, a Figura 4.4 mostra que para qualquer que seja o tratamento avaliado o harmônico mais significativo é o quarto, anual. A periodicidade tende a ser mais evidente com a água aplicada ao solo, na forma de irrigação suplementar. Avaliando apenas o quarto harmônico tem-se para o tratamento 1, com irrigação suplementar durante todo o ano variância relativa de 69,09%, para o tratamento 2, com irrigação no período de formação das almofadas florais e floração, variância relativa de 58,33% e para o tratamento 3, não irrigado, 58,30%. Nota-se, portanto, que a irrigação apenas na fase de floração ou a não irrigação, pouco ou nada interfere na definição do quarto harmônico. É interessante observar, entretanto, que no tratamento irrigado durante todo o ano, não existe uma segunda onda importante – a segunda maior variância relativa tem valor 5,61% e ocorre no primeiro harmônico, que é o mesmo que afirmar a aleatoriedade; a terceira maior variância ocorre no quinto harmônico, 9,6 meses, com variância relativa de 4,56% – enquanto, comparando-se os tratamentos irrigado durante a fase de floração e o não irrigado existe no tratamento 2 uma segunda onda com variância relativa de 18,57% no segundo harmônico, bianual, portanto, enquanto no tratamento não irrigado a segunda onda ocorre no primeiro harmônico, aleatório, por conseguinte, com variância relativa de 18,48%. Esse deslocamento da segunda onda no sentido da aleatoriedade para a periodicidade anual reforça a tese da importância da irrigação suplementar, por, pelo menos reduzir a componente aleatória da evapotranspiração.

Na mesma acepção, comparando-se a quantidade total de água adicionada ao sistema, por chuva e/ou irrigação suplementar, na Figura 4.5, percebe-se, também aqui que a periodicidade predominante é a anual. É evidente que no tratamento 1, por ser irrigado durante todo o ano, a água acrescentada em caráter suplementar, abranda a sazonalidade. No tratamento 1 a variância relativa do harmônico anual, o mais importante, é de apenas 27,85%, e o segundo harmônico mais evidente com variância relativa de 8,94% para a periodicidade semestral. Entretanto, o que, talvez, seria de esperar, que o tratamento com irrigação na floração também abrandasse as oscilações periódicas, em relação ao tratamento não irrigado, não ocorre. Ao contrário, reforça. A variância relativa do harmônico mais notável para o tratamento sem irrigação – que é o mesmo da precipitação, enquanto variável meteorológica pura – é de 35,45% (com um segundo harmônico importante de variância 11,47%, com periodicidade semestral), para o tratamento com irrigação na fase de floração a variância relativo do harmônico com periodicidade anual eleva-se a 50,75%, enquanto a periodicidade semestral (variância relativa de 7,18%), esta sim, não difere muito daquela do tratamento irrigado durante o ano todo.

Observando as Figuras 4.6 a 4.8, é possível comparar a estrutura da periodicidade, no domínio do tempo, das cinco variáveis fenológicas, de cada um dos três tratamentos. Os valores percentuais entre parênteses indicam as variâncias relativas do harmônico mencionado, para a variável em discussão.

A variável fenológica queda de flores – que dado o alto grau de abortamento floral do cacauzeiro, configura-se como um indicativo da floração – no tratamento sem irrigação apresenta três harmônicos mais pronunciados: o primeiro harmônico, período de 48 meses e variância relativa de 22,36%, o terceiro harmônico, período de 16 meses e variância relativa de 16,16% e o quarto harmônico, periodicidade anual e variância relativa de 20,72%. Nenhuma dessas variâncias relativas sobressaem-se, em ordem de grandeza, umas em relação às outras. Entretanto, num exame mais cauteloso, pode-se dizer de pronto que o fato da variável não apresentar nenhum harmônico expressivamente maior que os demais, é um indicativo de que não existe nenhuma periodicidade marcadamente predominante. A periodicidade associada ao primeiro harmônico pode ser desprezado, por ser um forte indicio de aleatoriedade. É possível também conjecturar que o fato do realce das variâncias relativas associadas a dois harmônicos subseqüentes indique que a periodicidade predominante esteja, de fato, em algum intervalo de tempo intermediário aos dois evidenciados. Isto ocorre porque o número de dados tomados, 48, impede matematicamente o surgimento de um harmônico

intermediário – a frequência associada ao harmônico é calculada como sendo o número de dados da série dividido pelo número do harmônico.

Ainda com relação à variável queda de flores, para tratamento com irrigação no estágio fenológica da floração, tratamento 2, a componente aleatória se reduz, em termos de variância relativa, e em relação ao tratamento não irrigado, indicado pelo valor da variância relativa (14,10%) do primeiro harmônico. A periodicidade anual se acentua ligeiramente pois a variância relativa do quarto harmônico passa a 28,62%. Entretanto, o que é notório é o aparecimento de uma periodicidade semestral, no oitavo harmônico.

Finalmente, quando se avalia a variável fenológica queda de flores do tratamento com irrigação durante todo o ano, o grau de aleatoriedade reduz-se ainda mais, aparecendo, entretanto, um componente periódico no segundo harmônico, bianual (15,44%). A disponibilidade constante de água durante todo o ano, modifica um a "intensidade" das periodicidades anual (24,71%) e semestral (19,55%), tendendo a um maior equilíbrio, em termos de variância relativa dos harmônicos considerados, quando se compara com o tratamento de fornecimento suplementar de água na fase de floração.

Avaliando-se a variável queda de folhas, de modo semelhante à variável queda de flores, em todos os tratamentos, a periodicidade mais marcante é a anual com variâncias relativas do quarto harmônico da ordem de 22,38%, 19,62% e 34,18%, respectivamente, para os tratamentos 1, 2 e 3.

Observa-se, também, uma redução sensível da importância da aleatoriedade, avaliada pelas variâncias relativas do primeiro harmônico, cujos valores, respectivamente para os tratamentos 3, 2 e 1, são, 13,57%, 8,40% e 4,50%.

Dependendo da época em que se irriga, ou seja, variando a disponibilidade de água à cultura ao longo do ciclo, ocorrem modificações do padrão das periodicidades da queda das folhas. Se no tratamento não irrigado, a periodicidade da queda das folhas possa ser considerado predominantemente anual com marcante aleatoriedade, a aplicação suplementar de água modifica esse comportamento, ressaltando outros harmônicos. Note-se que no tratamento com irrigação na floração, surge uma periodicidade fraca, em termos absolutos, mas forte comparativamente a outras ondas, no 19º harmônico (2,53 meses), no qual a importância, vista através da variância relativa, passa de 4,79% no tratamento não irrigado a 10,04% quando a irrigação suplementar concentra-se na fase de floração. Esse padrão é aproximadamente o mesmo quando a disponibilidade de água é plena durante o ano todo, 9,07%. No entanto, mais um harmônico merece ser avaliado. O 15º, periodicidade de 3,2 meses. Nesta periodicidade ocorre um acréscimo de importância com o aumento do período de disponibilidade plena de água, pois as variâncias relativas neste harmônico situa-se na ordem de 2,08%, 7,99% e 11,41%, respectivamente para os tratamentos 3, 2 e 1.

No que tange à variável lançamento foliar, no tratamento testemunha, nenhum componente periódico apresenta grande visibilidade. As variâncias relativas dos harmônicos, de maneira grosseira, para qualquer tratamento, não mostram imposição de nenhuma periodicidade. Entretanto, dois pontos devem ser enfatizados. Primeiro é o caráter da aleatoriedade. O primeiro harmônico concentra relativamente maior importância. Neste harmônico as variâncias relativas para os tratamentos 3, 2 e 1, respectivamente, apresentam-se na ordem de grandeza de 14,44%, 10,24% e 10,29%. Portanto, para qualquer dos tratamentos com irrigação suplementar ocorreu uma ligeira queda da aleatoriedade. O segundo ponto, importante do ponto de vista fisiológico, é que para qualquer dos tratamentos com irrigação evidenciou-se – se não marcadamente do ponto de vista numérico, ao menos sob o ângulo relativo – a periodicidade anual do lançamento foliar.

A análise de Fourier da frutificação revela que no tratamento sem irrigação novamente se apresentam como periodicidades mais marcantes os harmônicos três e quatro, ou seja, 16 (23,00%) e 12 (16,03%) meses, respectivamente, revelando os mesmos aspectos da variável queda de flores, ou aquilo que esta variável representa, a intensidade de floração, o que leva às mesmas considerações e conjecturas já expostas. Avaliando os tratamentos com irrigação, as tendências são aproximadamente as mesmas, exceto pelo fato da inversão da importância dos harmônicos, anual e semestral, entre os tratamentos 1 e 2. Enquanto no tratamento 1, na floração o harmônico anual (24,71%) figura como o mais importante, seguido do semestral (19,55%), na frutificação a periodicidade semestral (24,85%) sobrepõe-se em importância à anual (12,66%). Por outro lado, no tratamento 2, se a periodicidade anual (28,62%) é mais marcante na floração que a semestral (16,45%); na frutificação, tanto a periodicidade anual (22,87%) como a semestral (23,49%) se equivalem em importância cíclica.

Os pecos fisiológicos por seu turno, avaliando-se no tratamento sem irrigação, acompanha, aproximadamente, os mesmos padrões da floração, em termos de periodicidades, apresentando-se os padrões mais evidentes, entre o terceiro e quarto harmônicos, 16 (16,86%) e 12 (15,30%) meses. Nos tratamentos com irrigação, adotados, a aleatoriedade apresenta-se como o traço mais marcante, ainda que as variâncias relativas do primeiro harmônicos não sobressaíram-se em importância, 20,53% e 25,58%, para os tratamentos 1 e 2, respectivamente. Entretanto, para estes mesmos tratamentos, em que aplicou-se água suplementar a duplicidade de importância dos terceiros e quartos harmônicos, encontrada no tratamento sem irrigação, passa a se concentrar na periodicidade anual, com variâncias relativas do harmônico da ordem de 11,57% e 18,50%, respectivamente, para os tratamentos 1 e 2, o que não pode ser considerada uma definição marcante na periodicidade neste harmônico, mas, ao menos aparentemente, apenas uma diluição da importância das periodicidades. No caso do tratamento 1, o 7º harmônico, com período de 6,86 meses, ganha alguma importância, embora de pequena monta (9,87%), ao menos em relação aos demais tratamentos (1,05%) e (3,03%), respectivamente para os tratamentos 2 e 3. No oitavo harmônico também surge um pequeno pico em ambos os tratamentos com irrigação, (8,84%) e (7,58%), no 1 e 2, respectivamente, bastante maior que a variância relativa neste harmônico, em particular, para o tratamento sem irrigação (0,20%).

Avaliando-se em conjunto os três tratamentos, os dados sugerem que, de maneira geral, os tratamentos com irrigação não diferem categoricamente entre si, corroborando com os resultados da análise canônica e também com as conclusões de AUGUSTO (1997). Esses tratamentos, por sua vez, modificam os padrões cíclicos, quando comparados à testemunha, e também, genericamente, poder-se-ia dizer que "forçam" a periodicidade a, basicamente, dois termos, um semestral e outro anual. Como o número de dados da série não permitiu, que fosse conhecido o harmônico, com periodicidade de 18 meses, ano e meio, não se pode afirmar que os resultados estariam, rigorosamente, em consonância com aqueles encontrados por LEITE & VALLE (2000), entretanto, deixam margem a essa conjectura. Os resultados obtidos pela análise harmônica de Fourier, também deixam nas entrelinhas a suspeita de que a defasagem temporal entre eventos meteorológicos e fenológicos observadas, em condições de campo, por ALVIM (1975, 1977) podem ser confirmadas pela estrutura matemática adotada neste trabalho.

4.1.2.1.1. Função de autocorrelação

Os resultados da autocorrelação das séries temporais encontram-se sintetizados nas Figuras 4.9 a 4.14. A Figura 4.9. representa graficamente os resultados das variáveis meteorológicas coletadas na estação meteorológica. A Figura 4.10. compara os resultados da variável evapotranspiração real estimada para cada tratamento. A Figura 4.11. compara os resultados da variável (precipitação+irrigação suplementar). As Figuras 4.12. a 4.14. comparam os resultados obtidos das variáveis fenológicas para cada tratamento. Os números entre parênteses indicam os valores assumidos pela função de autocorrelação, para a variável em discussão. Valores positivos indicam que quando o valor da série de entrada aumenta, eleva-se também o da série de saída e valores negativos indicam que quando os valores da série de entrada se elevam, os da de saída reduzem. Quando ao valor for posposto o símbolo *, indica que a significância estatística se dá ao nível de 95% de probabilidade, e quando **, indica a significância ao nível de 99%.

Avaliando a Figura 4.9, percebe-se que a autocorrelação de algumas das séries meteorológicas perdem intensidade quando defasadas no tempo, voltam a se correlacionarem, embora inversamente, perdem novamente intensidade e voltam a correlação positiva, num marcado ciclo anual, como esperado e já acusado na análise de Fourier. Essa seqüência pode ser observada nas variáveis, temperaturas máxima, mínima, média, irradiância solar global e, mais do que obviamente, por ter sido calculado, o fotoperíodo.

Outras variáveis, no entanto, ou não apresentam um comportamento tão definido, ou simplesmente não apresentam ciclicidade, que estatisticamente difiram significativamente da hipótese de nulidade, que considera o coeficiente de autocorrelação nulo.

A variável umidade relativa, que na análise harmônica de Fourier apresentou um marcado caráter aleatório, avaliado pela função de autocorrelação, perde rapidamente a intensidade da inter-relação, flutuando já a partir de um mês de defasagem – quando o valor da autocorrelação cai a 0,54**, indicando que a umidade relativa de um mês ainda depende do valor do mês anterior – com valores, sempre positivos, embora de baixíssimo valor absoluto,

significativos, alguns a 95% de probabilidade, mais em função do número de dados, do que da robustez da inter-relação.

A variável insolação, que na análise de Fourier apresentou uma periodicidade anual, embora, não muito pronunciada, comportou de maneira similar à umidade relativa sem grandes significâncias nos valores de autocorrelação. Uma única defasagem, de cinco meses, produziu um coeficiente de autocorrelação significativo, $-0,39^{**}$.

A variável velocidade do vento a dois metros de altura, à semelhança da análise de Fourier, não revelou qualquer indício de ciclicidade. Os valores de autocorrelação não apresentaram significância, mesmo contando com a condescendência movida pelo grande, neste caso, número de dados, que facilita a condição de rejeição da hipótese da nulidade.

Quanto à precipitação que na análise de Fourier apresentou dois componentes cíclicos, um anual, mais intenso e um semestral, bem menos intenso, pela função de autocorrelação apresentou apenas três valores significativos, o primeiro com sete meses de defasagem ($-0,34^*$), o segundo, 11 meses ($+0,43^{**}$), e o terceiro, 12 meses ($0,26^*$). Isto mostra que ambas as análises revelaram resultados se não idênticos, ao menos similares.

A evapotranspiração real (Figura 4.10) seguiu o comportamento discutido para as variáveis meteorológicas que mais acompanham as relações astronômicas Terra-Sol, com algumas observações. Embora em todos os tratamentos o comportamento geral seja o mesmo, a ETR do tratamento 2, apresentou-se como a mais irregular, não mantendo a forte tendência de alta correlação com as séries defasadas em 11 a 12 meses. Esta observação, provavelmente tenha como suporte a maior irregularidade temporal na disponibilidade de água devido aos períodos de irrigação. Outra comparação interessante é observar que a autocorrelação da série de ETR do tratamento 1 é mais vigorosa, comparativamente à série do tratamento 3, especialmente na defasagem de seis meses, quando as autocorrelações atingem seu valor mais negativo, ou seja de comportamento oposto em seus valores extremos.

Com relação à variável composta (precipitação + irrigações suplementares) (Figura 4.11), como era de se esperar a função de autocorrelação do tratamento 1, praticamente não apresenta significância, para rejeição da hipótese da nulidade da autocorrelação nula, em qualquer defasagem, excesso a 11 meses de defasagem, corroborando o resultado da análise de Fourier. Como era de se esperar a função de autocorrelação com maiores variações ocorre no tratamento 3, sem irrigação suplementar, estando a disponibilidade da água no solo, exclusivamente a cargo da precipitação.

Comparando os autocorrelogramas das séries das variáveis fenológicas (Figuras 4.12 a 4.14) percebe-se que para a variável queda de flores, apenas a defasagem de 12 meses, mostrou autocorrelação significativa apenas para os tratamentos 2 ($+0,49^{**}$) e 3 ($+0,37^{**}$), embora para a série do tratamento 1, o valor, $+0,23$, apresenta significância próxima a 95%. Estes resultados destoam dos obtidos pela análise de Fourier, que apontou para uma tendência de periodicidade anual, inclusive para esta variável do tratamento 1.

Para o tratamento sem irrigação a variável queda de folhas, apresentou periodicidades que se repetem após 2 meses ($+0,35^{**}$), e outro repetindo-se com 11 meses de defasagem ($+0,29^*$), com significância um pouco menor. Já esta variável fenológica para os tratamentos com irrigação suplementar apresentaram repetições de comportamento apenas com dez meses de defasagem, $+0,34^{**}$ para o tratamento 1 e $+0,29^*$ para o tratamento 2. Estes resultados contrariam os obtidos pela análise de Fourier que também indicou comportamento periódico anual, como o mais importante.

Quanto ao lançamento foliar, para o tratamento sem irrigação, o comportamento, embora com significância a 95%, foi de repetir-se nas defasagens de tempo, três ($+0,253$), cinco ($+0,29^*$) e sete ($+0,29^*$) meses; fato este nem sequer insinuado pela análise de Fourier. Generalizando, grosseiramente, o fornecimento de água em caráter suplementar anula, ao menos parcialmente, o comportamento descrito para o tratamento 3, suprimindo em boa parte as oscilações. Sendo mais criterioso, no caso do tratamento 1, um único padrão significativo de repetição, muito próximo a 99% de probabilidade, com três meses de defasagem ($+0,34^*$), é percebido. Ao contrário, para o tratamento 2, a oscilação ocorre com 11 meses de defasagem ($+0,28^*$). Estes resultados também não confirmam os encontrados pela análise de Fourier, que assinala periodicidade anual para os tratamentos 1 e 2 e praticamente periodicidade nula para o tratamento 3.

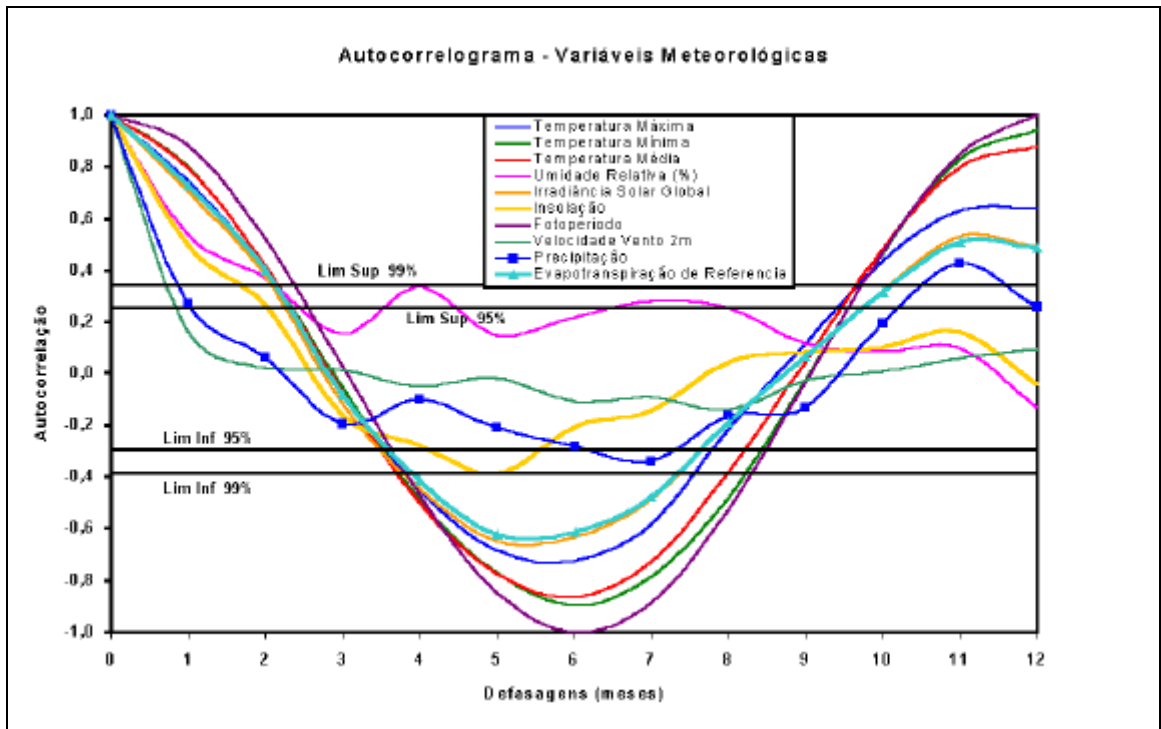


Figura 4.9. Autocorrelogramas das variáveis meteorológicas.

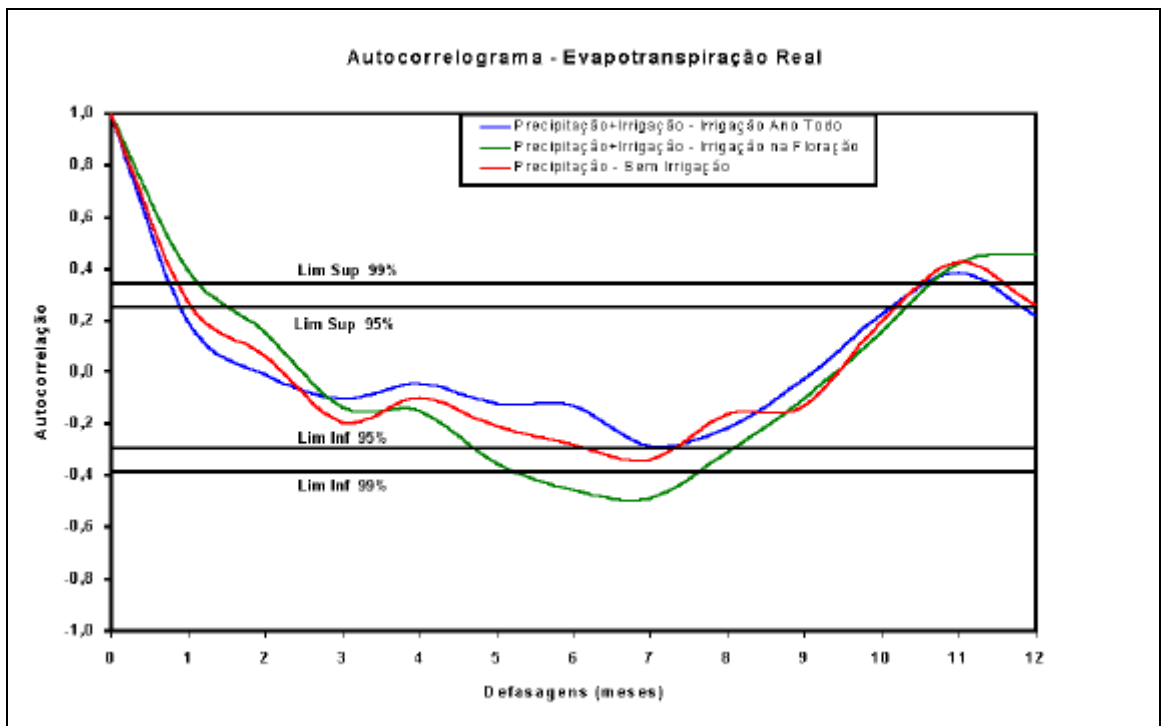


Figura 4.10. Autocorrelogramas da variável evapotranspiração real estimada.

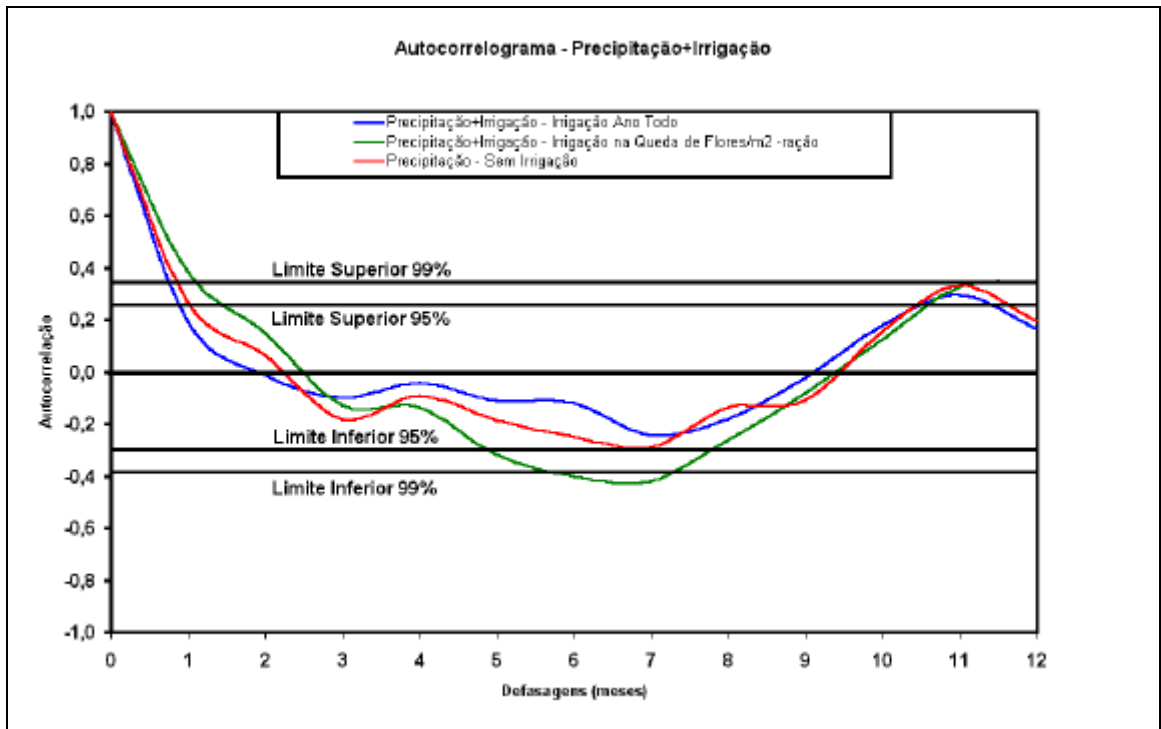


Figura 4.11. Autocorrelogramas da variável (precipitação + irrigações suplementares).

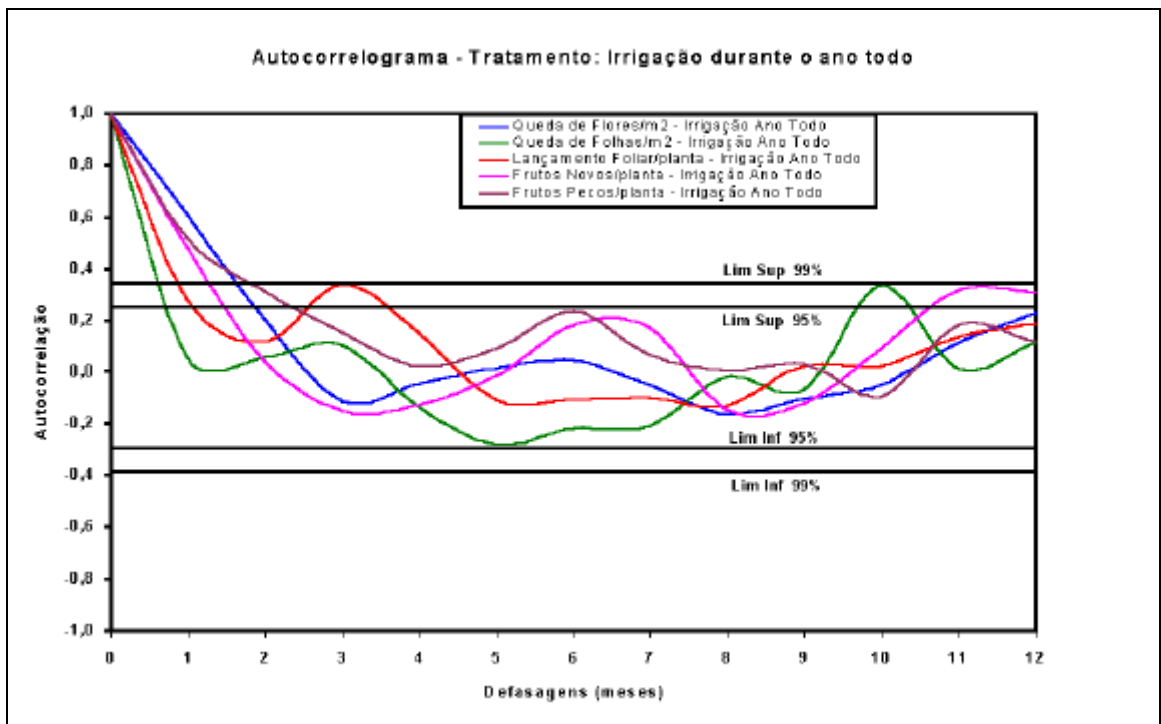


Figura 4.12. Autocorrelogramas das variáveis fenológicas do Tratamento 1.

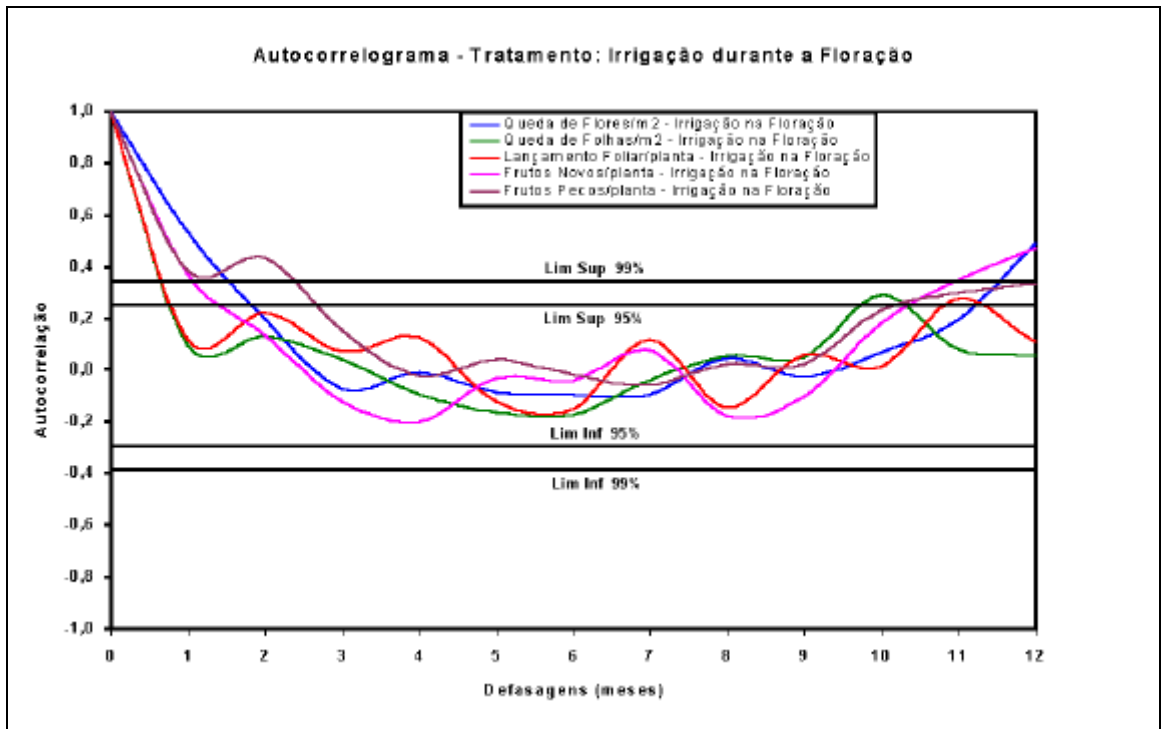


Figura 4.13. Autocorrelogramas das variáveis fenológicas do Tratamento 2.

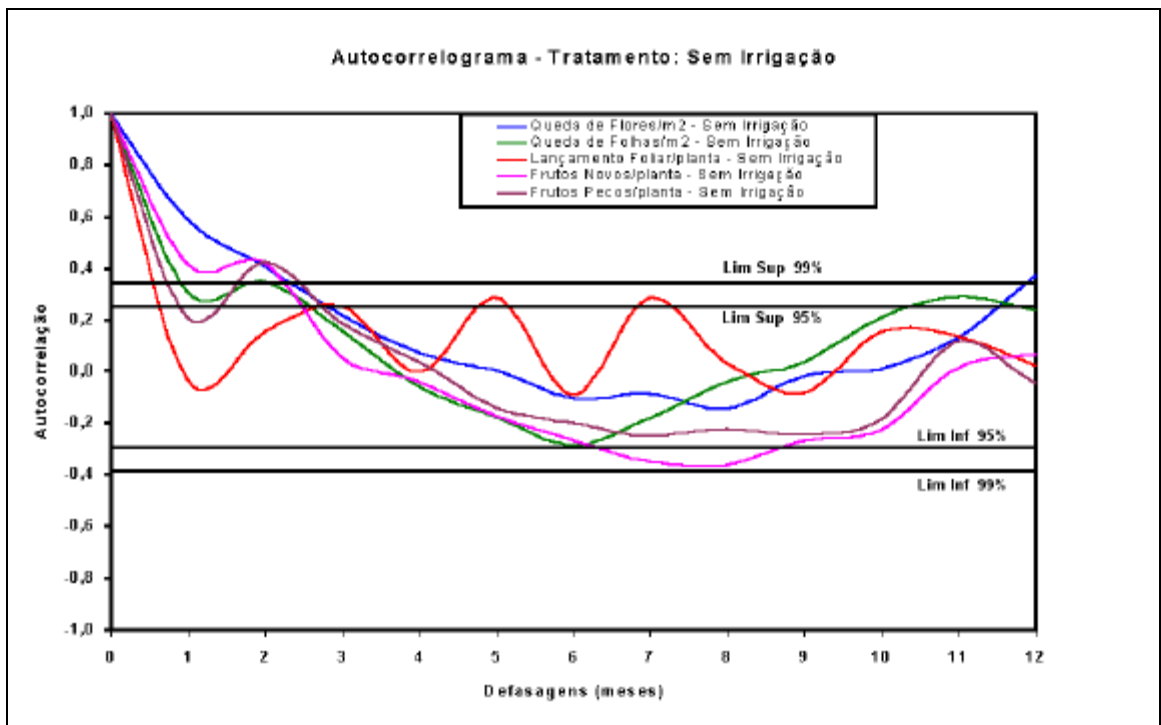


Figura 4.14. Autocorrelogramas das variáveis fenológicas do Tratamento 3.

Relativamente à variável frutificação, enquanto genericamente a análise harmônica aponta para periodicidades semestrais e anuais – no caso do tratamento 3, sazonalidade entre 12 e 16 meses – a função de autocorrelação corrobora apenas o ciclo anual, e assim mesmo somente para os tratamentos sujeitos à irrigações, no caso do tratamento 1 (+0,32*) para 11 e (+0,31*) para 12 meses de defasagens; e no tratamento 2, (+0,35**) para 11 e (+0,47**) para 12 meses de defasagens. Aponta, entretanto, no caso do tratamento 3, para uma correlação negativa com sete (-0,35*) a oito (-0,37*) meses de defasagem. Neste último caso, significaria que uma alto índice de frutificação num mês, seria sucedido sete a oito meses após por um baixo índice de frutificação. Estes resultados também não foram detectados pela análise de Fourier.

A questão dos pecos fisiológicos, avaliada pela função de autocorrelação mostrou que, no tratamento sem irrigação apenas a defasagem de dois meses (+0,43**) foi significativa. No tratamento 2 existe uma repetição de comportamento com um (+0,38**) e dois (+0,44**) meses de defasagem e com 11 (+0,30*) e 12 (+0,34*) meses de defasagem. A irrigação durante o ano inteiro, aparentemente, quebrou qualquer padrão de repetição no tempo da ocorrência de pecos. Comparando estes resultados com a análise de Fourier nota-se que apenas houve concordância no caso do tratamento 2, com periodicidade anual.

4.1.2.1.2. Função de correlação cruzada

4.1.2.1.2.1. Correlação cruzada entre as séries meteorológicas e as fenológicas

Os resultados das correlações cruzadas entre as séries temporais meteorológicas e fenológicas, dos 3 tratamentos simultaneamente encontram-se sintetizados nas Figuras 4.15 a 4.64. Na discussão a seguir, os números entre parênteses (precedidos pelos sinais + ou -) declaram os valores assumidos pela função de correlação cruzada, ou coeficiente de Pearson, entre as variáveis em discussão. Valores positivos indicam que quando o valor da série de entrada aumenta, eleva-se também o da série de saída e valores negativos indicam que quando os valores da série de entrada se elevam, os da de saída reduzem. No caso das comparações das séries meteorológicas com as fenológicas, as primeiras sempre representam as séries de entrada e as últimas de saída.

As Figuras 4.15 a 4.19 mostram as correlações entre a variável meteorológica temperatura máxima e as variáveis fenológicas.

Os valores da série da temperatura máxima mostram significativas correlações positivas entre os valores de temperatura máxima e queda de flores com zero, um e dois meses do evento meteorológico. Sempre, respectivamente, para os tratamentos 1, 2 e 3, no mesmo mês os coeficientes foram +0,45**; 0,51** e 0,43**. Com defasagem de um mês +0,62**; 0,65** e 0,44**. Finalmente, considerando dois meses de defasagem, 0,64**; 0,63** e 0,32* (Figura 4.15). Percebe-se, principalmente para os tratamentos com irrigação suplementar que, em torno de sete meses após a ocorrência do evento meteorológico em debate, significativos coeficientes de correlação negativo ocorrem. No caso do tratamento sem irrigação, com menor significância estatística, a correlação negativa é manifesta com defasagem de seis meses no tempo. Neste caso, sim, fisiologicamente, parece que as altas temperaturas estariam correlacionadas com baixa intensidade de floração, defasados em torno de sete meses no tempo.

Percebe-se também, pela Figura 4.15 que, ignorando a consideração da significância estatística, as irrigações suplementares, nos dois tratamentos adotados, retardaram, além de acentuarem os aparentes efeitos da temperatura máxima sobre o efeito fenológico discutido.

Com relação aos efeitos, ao menos, aparentes da temperatura máxima sobre a queda das folhas (Figura 4.16), não se percebe qualquer interferência das irrigações nos padrões de comportamento. Nos primeiros dois meses após o evento meteorológico a correlação entre as séries da temperatura máxima e queda das folhas é positiva e significativa ao nível de 99% de probabilidade. Os coeficientes, novamente significativamente, se invertem em torno de seis a sete meses após, voltando a se elevar no próximo ciclo anual.

Visualmente, nota-se apenas que as irrigações reduzem ligeiramente os coeficientes de correlação cruzada, indicando uma leve supressão dos efeitos aparentes.

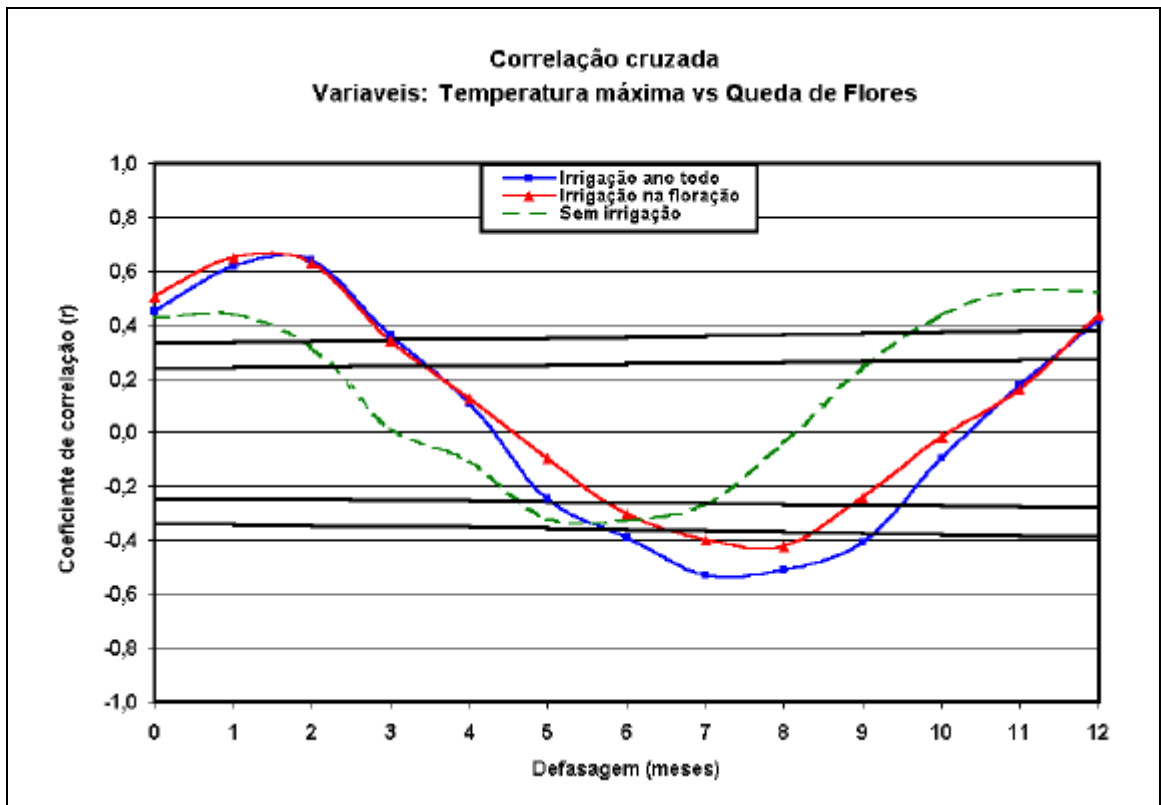


Figura 4.15. Correlação cruzada entre a variável temperatura máxima e a variável fenológica queda de flores dos 3 tratamentos.

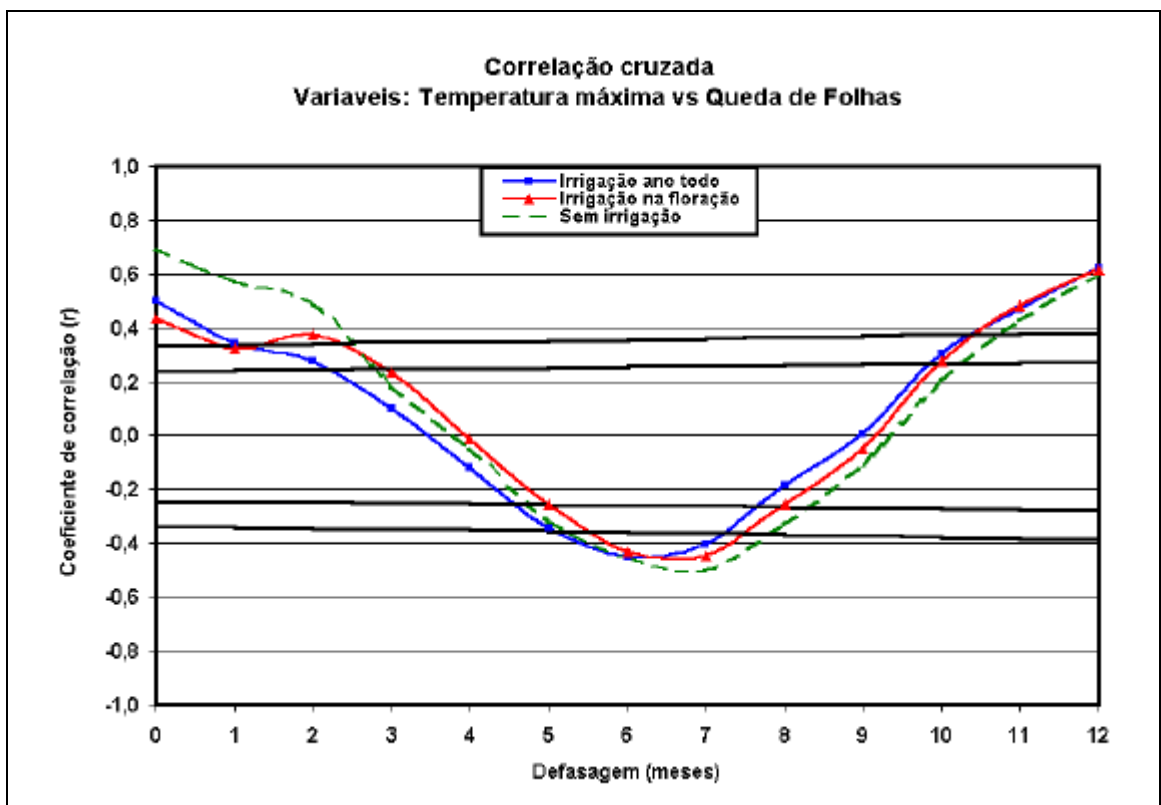


Figura 4.16. Correlação cruzada entre a variável temperatura máxima e a variável fenológica queda de folhas dos 3 tratamentos.

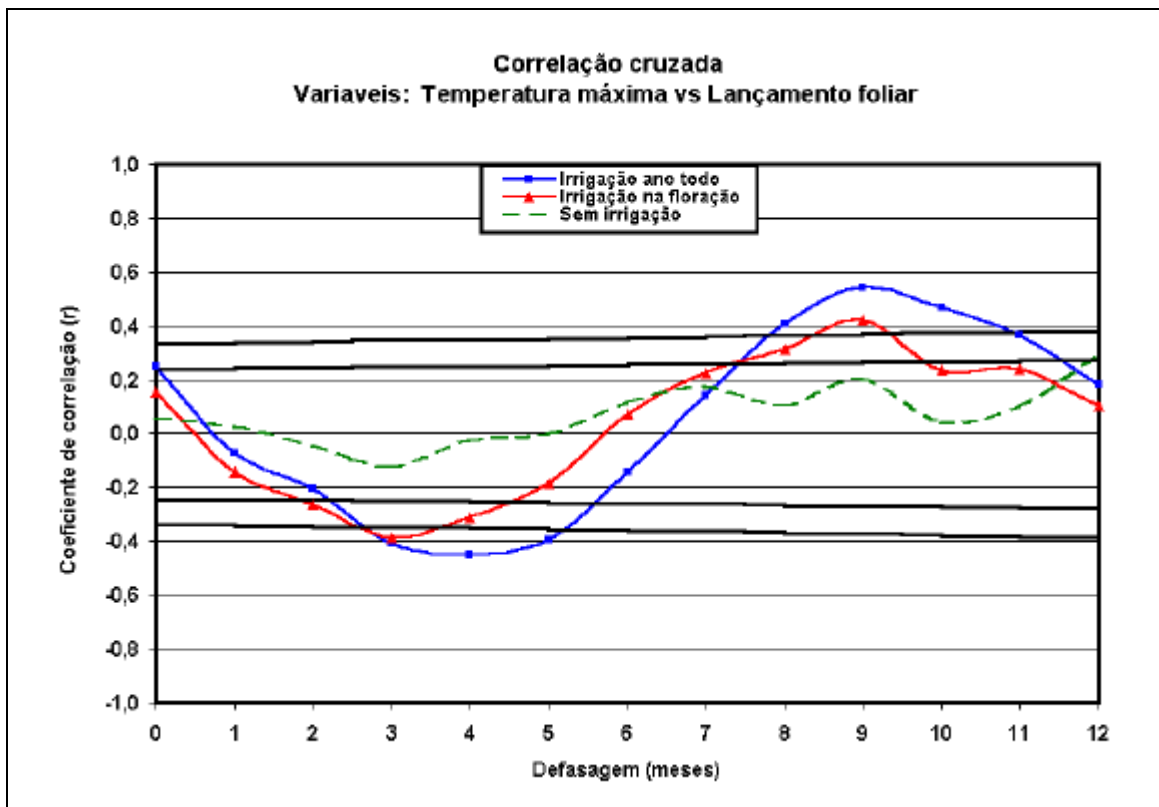


Figura 4.17. Correlação cruzada entre a variável temperatura máxima e a variável fenológica lançamento foliar dos 3 tratamentos.

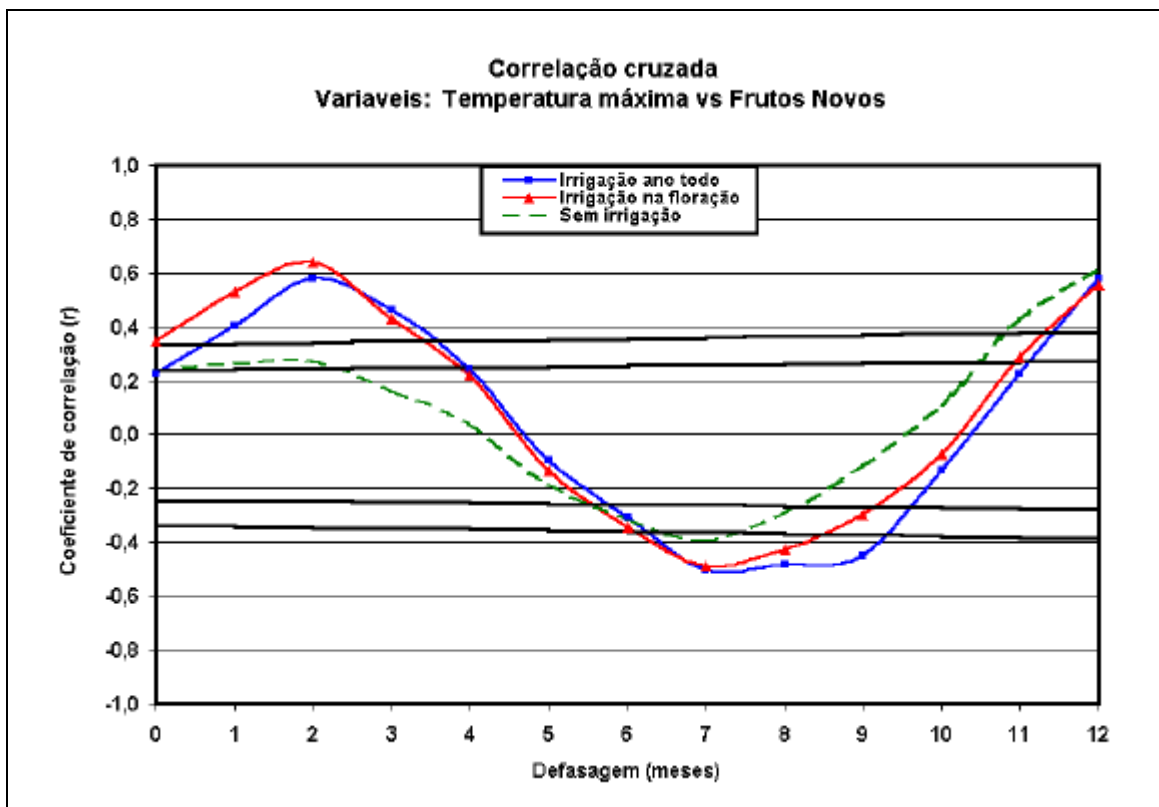


Figura 4.18. Correlação cruzada entre a variável temperatura máxima e a variável fenológica frutos novos dos 3 tratamentos.

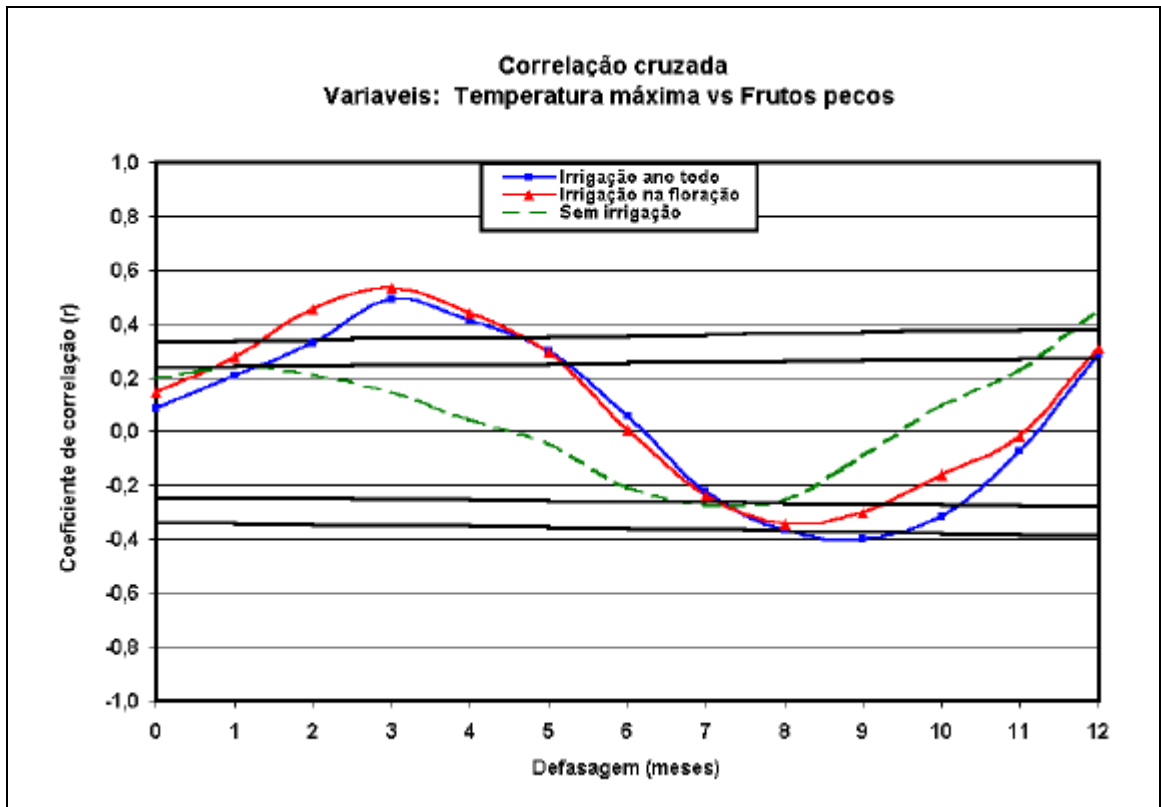


Figura 4.19. Correlação cruzada entre a variável temperatura máxima e a variável fenológica frutos pecos dos 3 tratamentos.

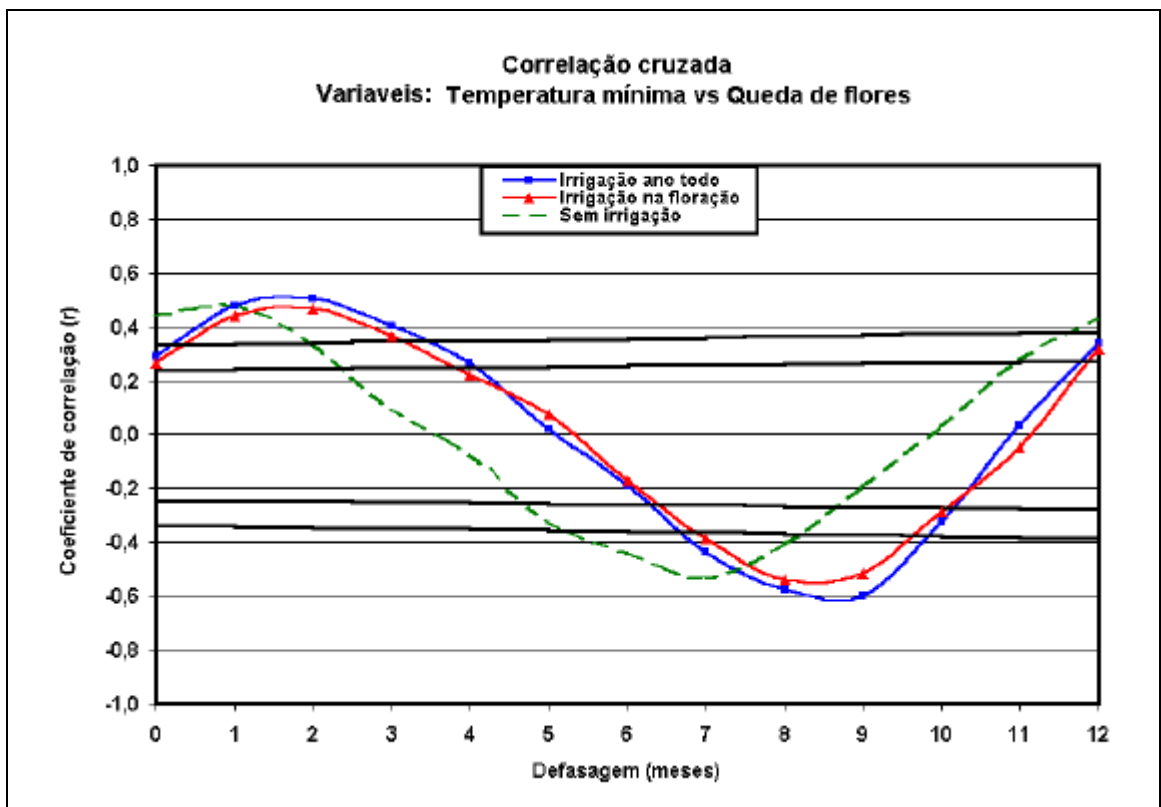


Figura 4.20. Correlação cruzada entre a variável temperatura mínima e a variável fenológica queda de flores dos 3 tratamentos.

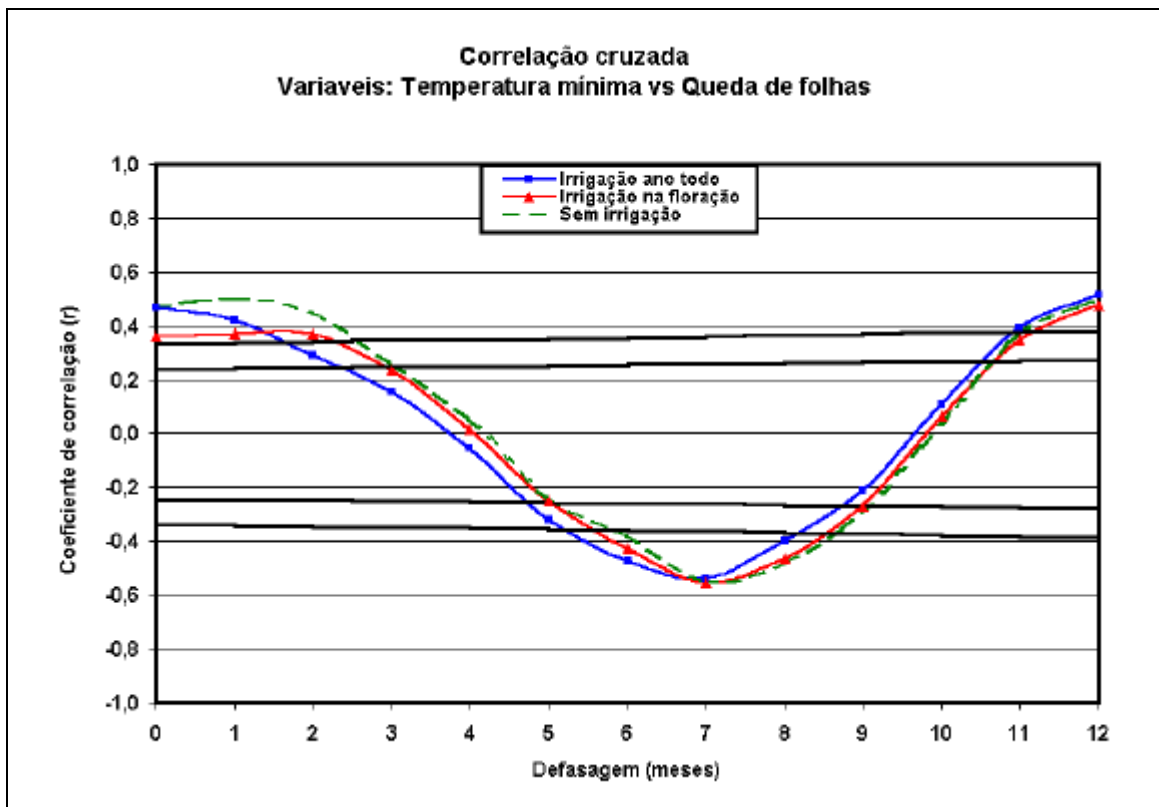


Figura 4.21. Correlação cruzada entre a variável temperatura mínima e a variável fenológica queda de folhas dos 3 tratamentos.

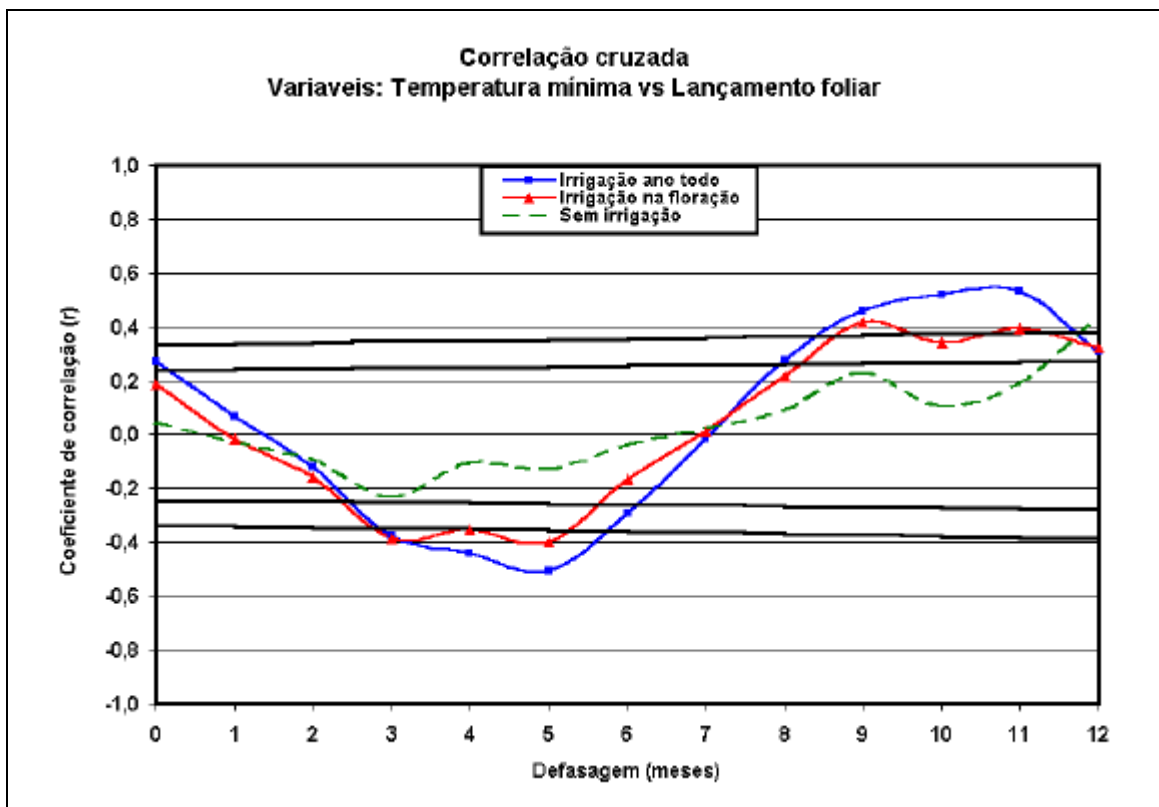


Figura 4.22. Correlação cruzada entre a variável temperatura mínima e a variável fenológica lançamento foliar dos 3 tratamentos.

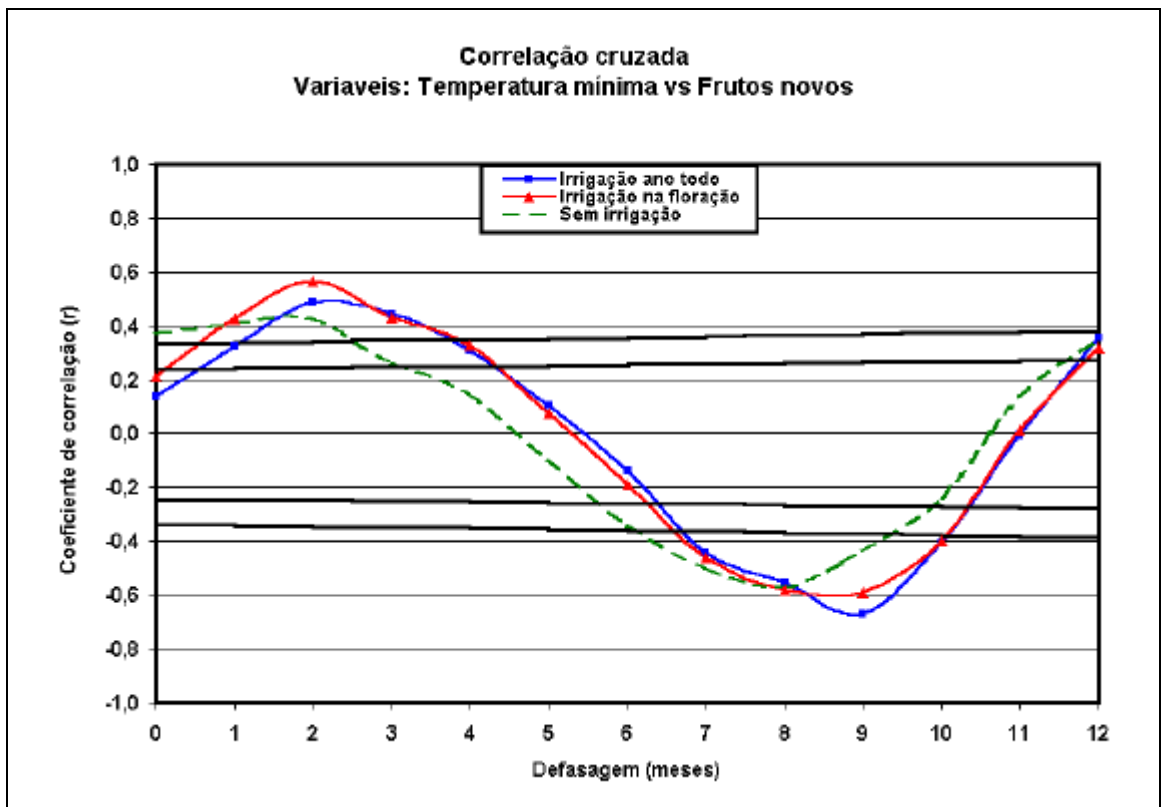


Figura 4.23. Correlação cruzada entre a variável temperatura mínima e a variável fenológica frutos novos dos 3 tratamentos.

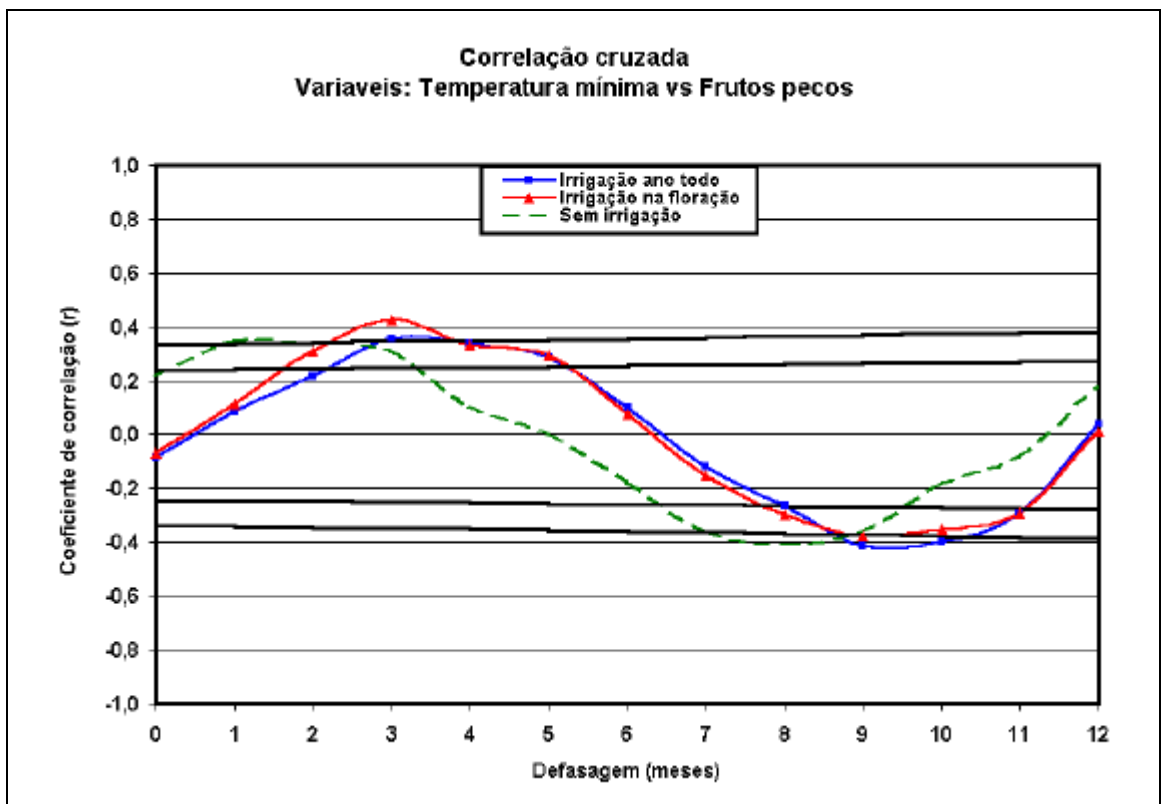


Figura 4.24. Correlação cruzada entre a variável temperatura mínima e a variável fenológica frutos pecos dos 3 tratamentos.

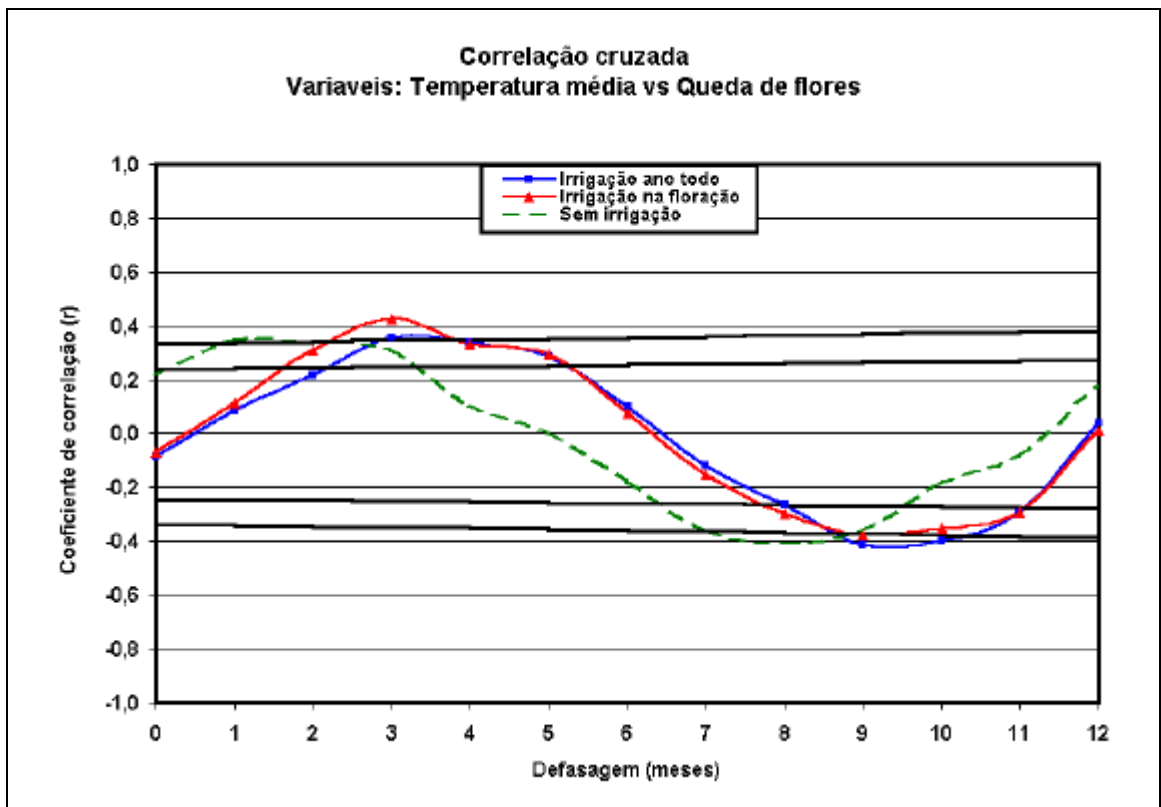


Figura 4.25. Correlação cruzada entre a variável temperatura média e a variável fenológica queda de flores dos 3 tratamentos.

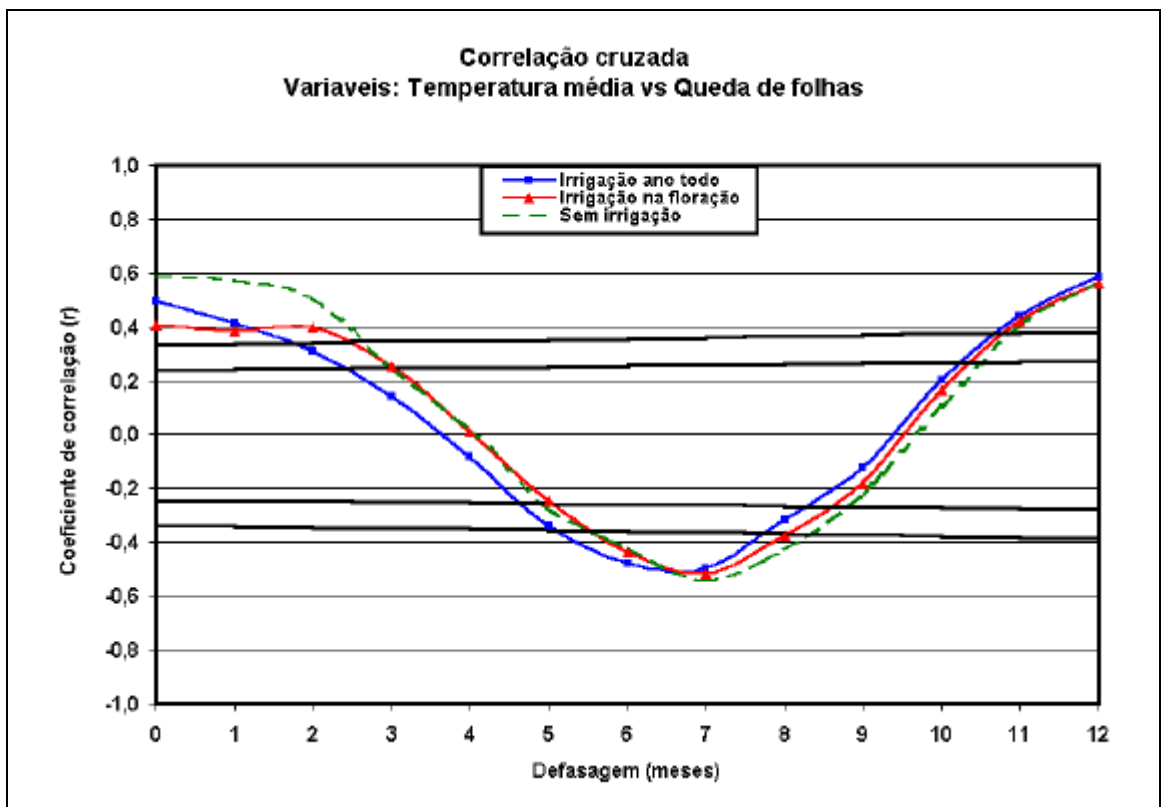


Figura 4.26. Correlação cruzada entre a variável temperatura média e a variável fenológica queda de folhas dos 3 tratamentos.

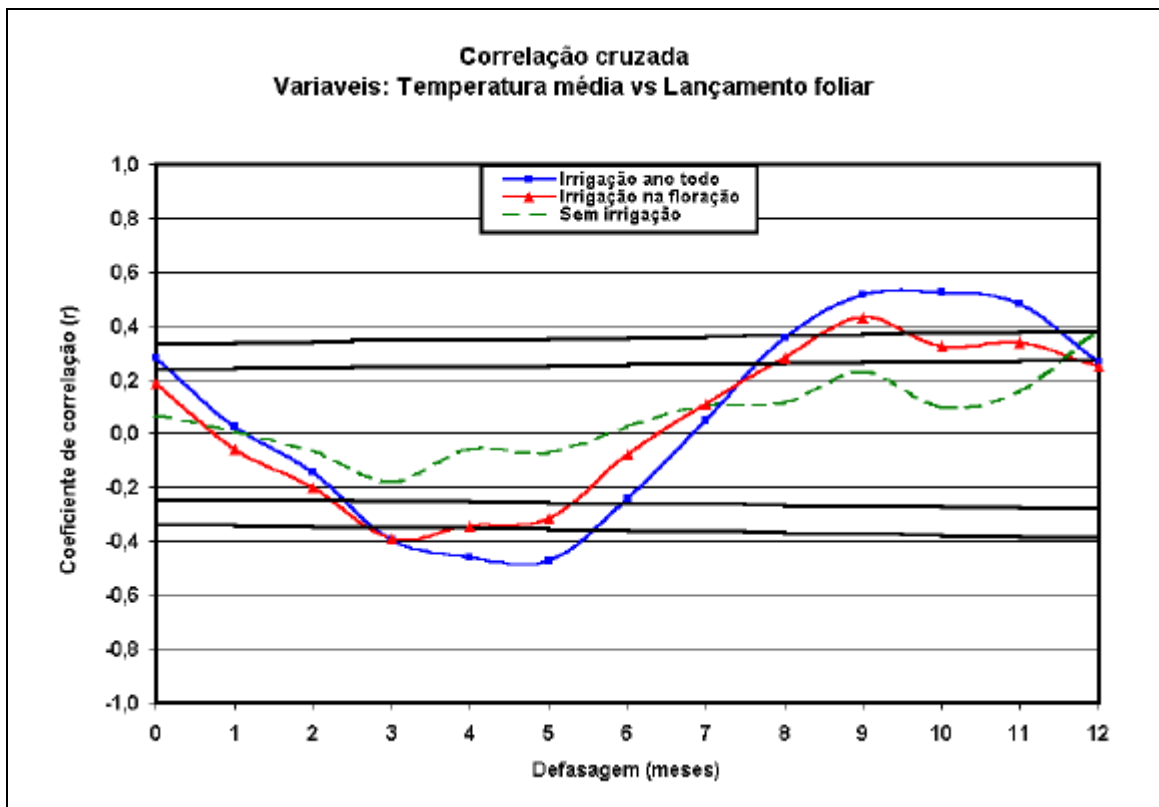


Figura 4.27. Correlação cruzada entre a variável temperatura média e a variável fenológica lançamento foliar dos 3 tratamentos.

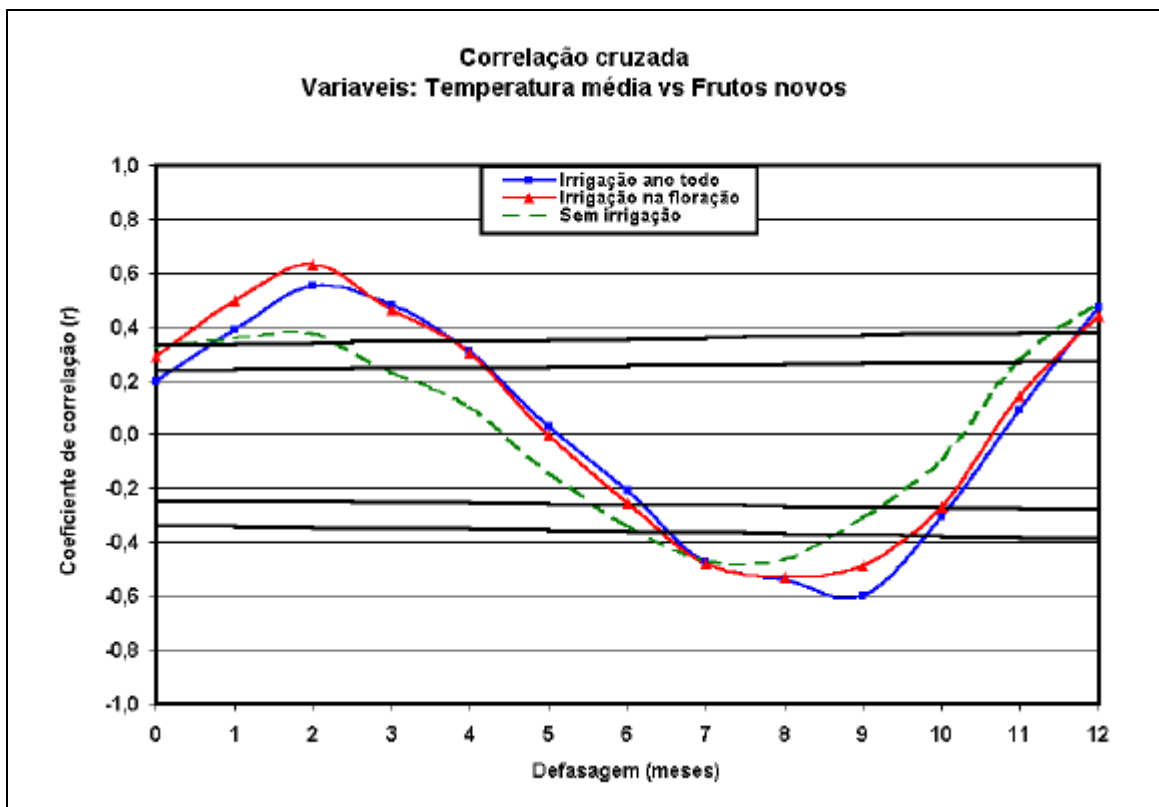


Figura 4.28. Correlação cruzada entre a variável temperatura média e a variável fenológica frutos novos dos 3 tratamentos.

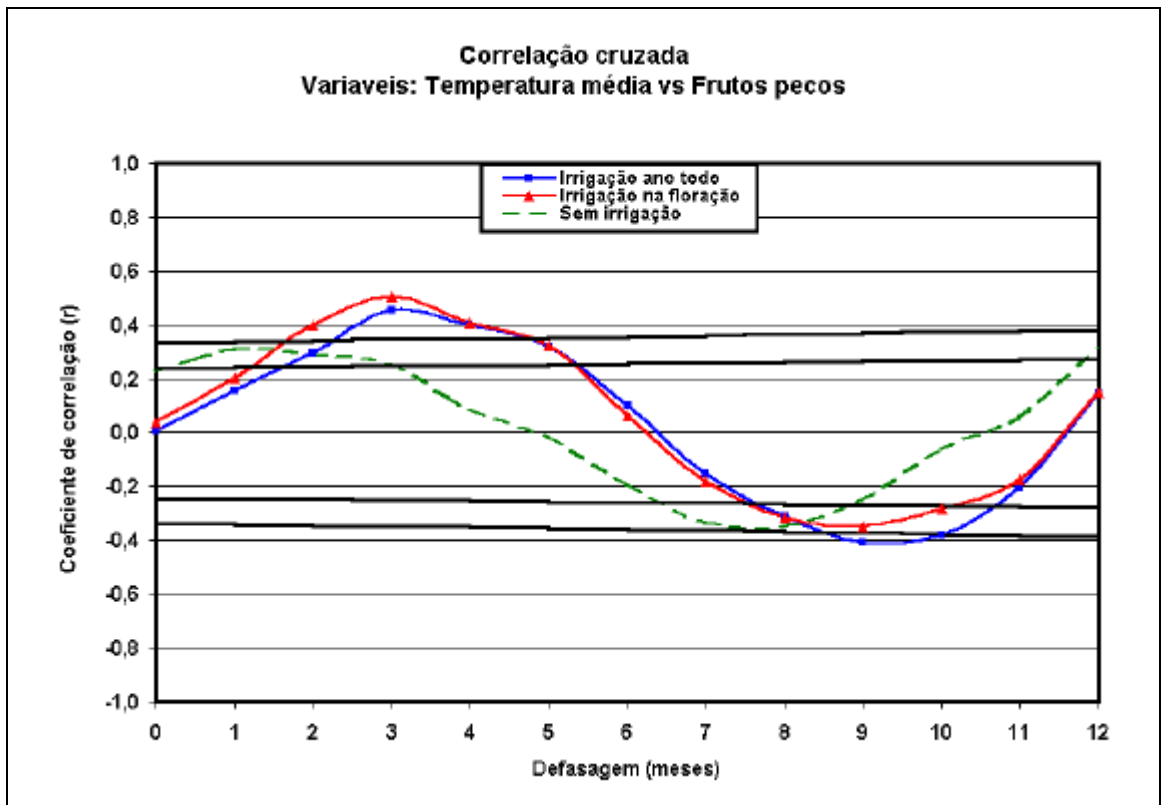


Figura 4.29. Correlação cruzada entre a variável temperatura média e a variável fenológica frutos pecos dos 3 tratamentos.

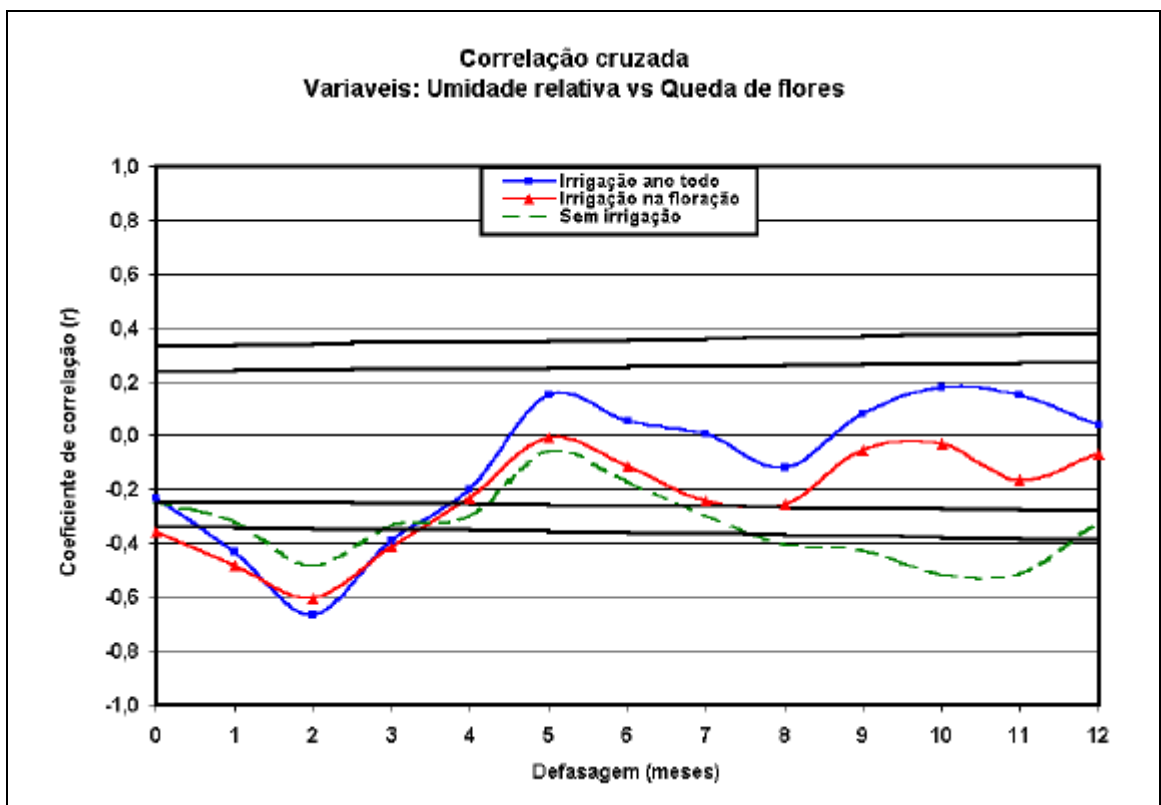


Figura 4.30. Correlação cruzada entre a variável umidade relativa e a variável fenológica queda de flores dos 3 tratamentos.

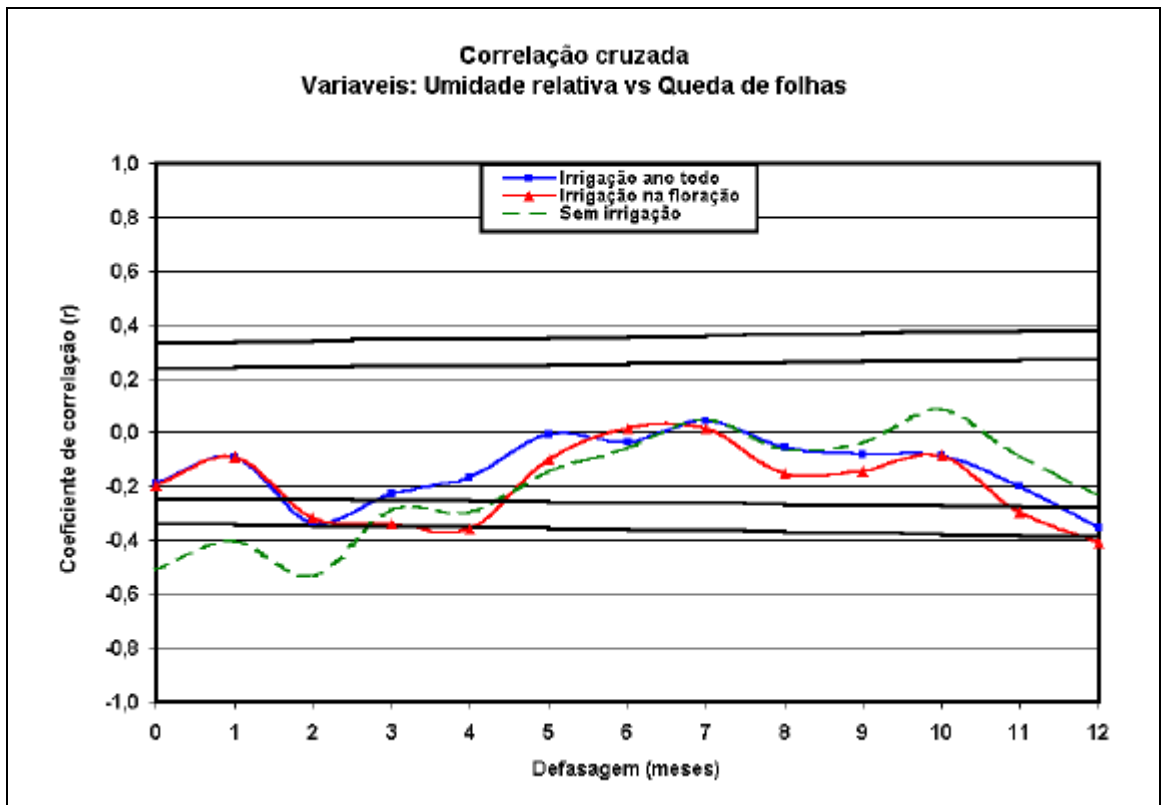


Figura 4.31. Correlação cruzada entre a variável umidade relativa e a variável fenológica queda de folhas dos 3 tratamentos.

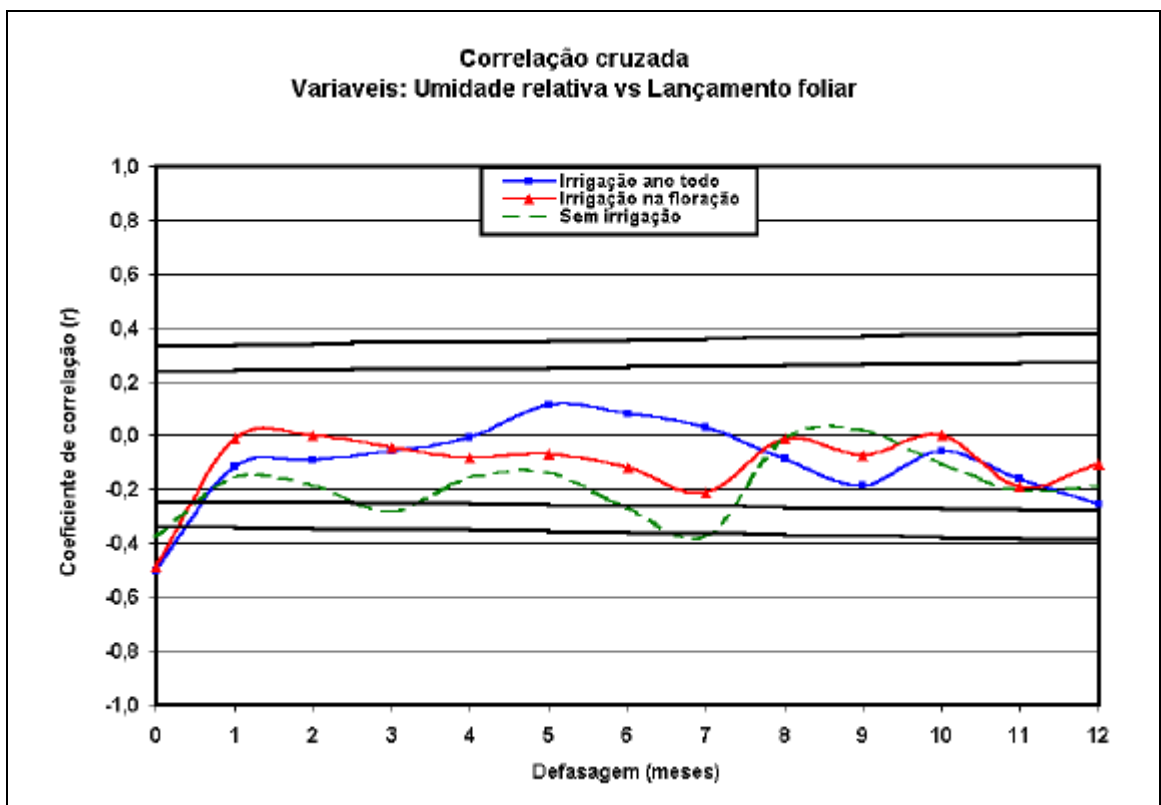


Figura 4.32. Correlação cruzada entre a variável umidade relativa e a variável fenológica lançamento foliar dos 3 tratamentos.

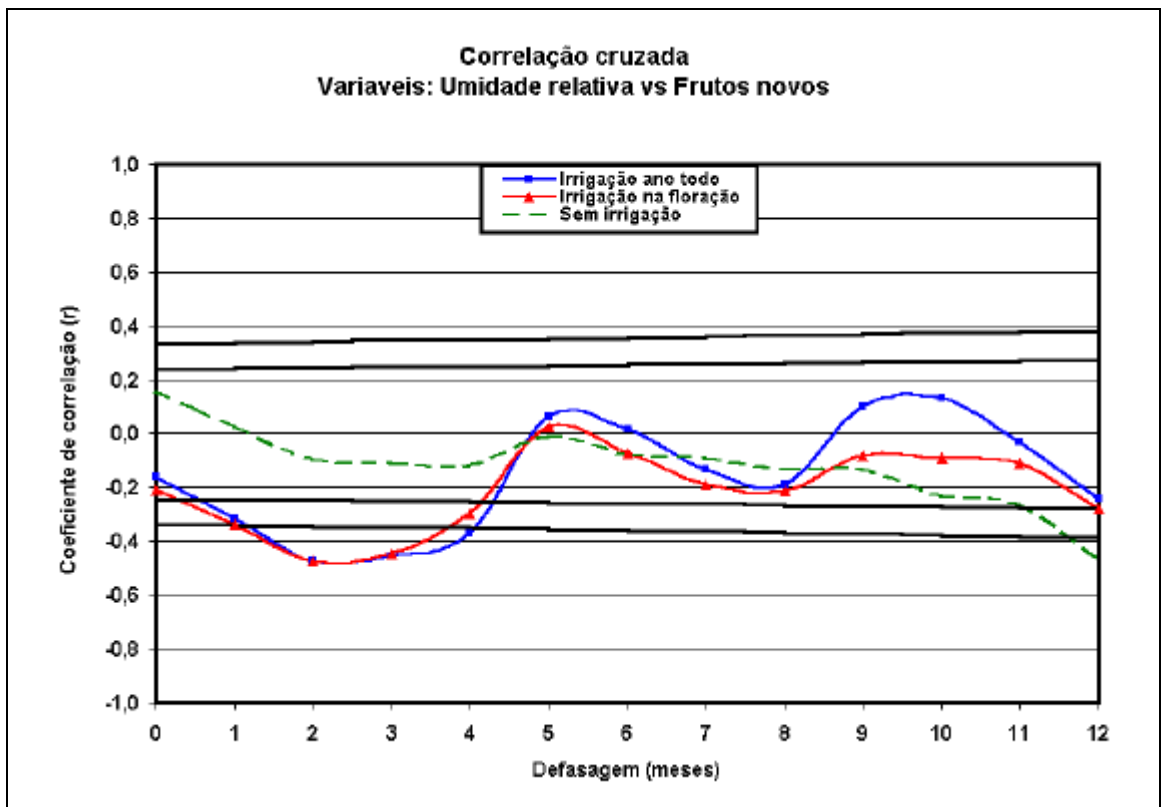


Figura 4.33. Correlação cruzada entre a variável umidade relativa e a variável fenológica frutos novos dos 3 tratamentos.

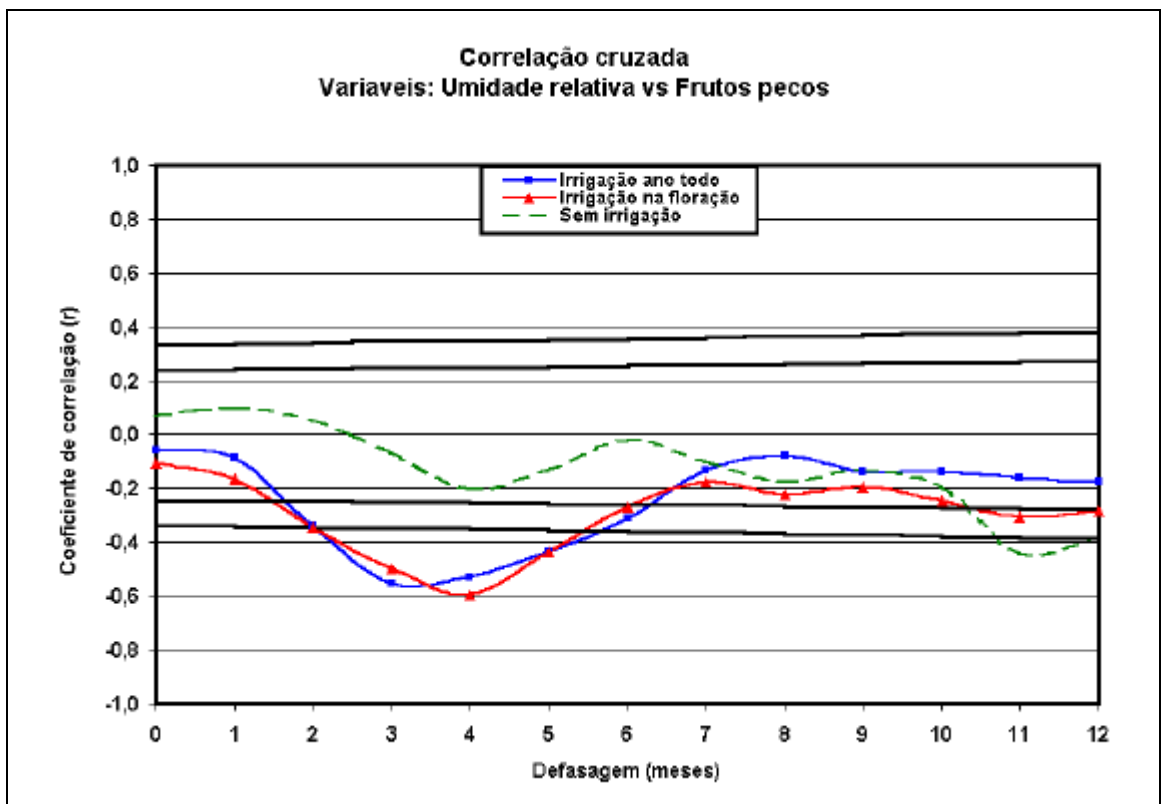


Figura 4.34. Correlação cruzada entre a variável umidade relativa e a variável fenológica frutos pecos dos 3 tratamentos.

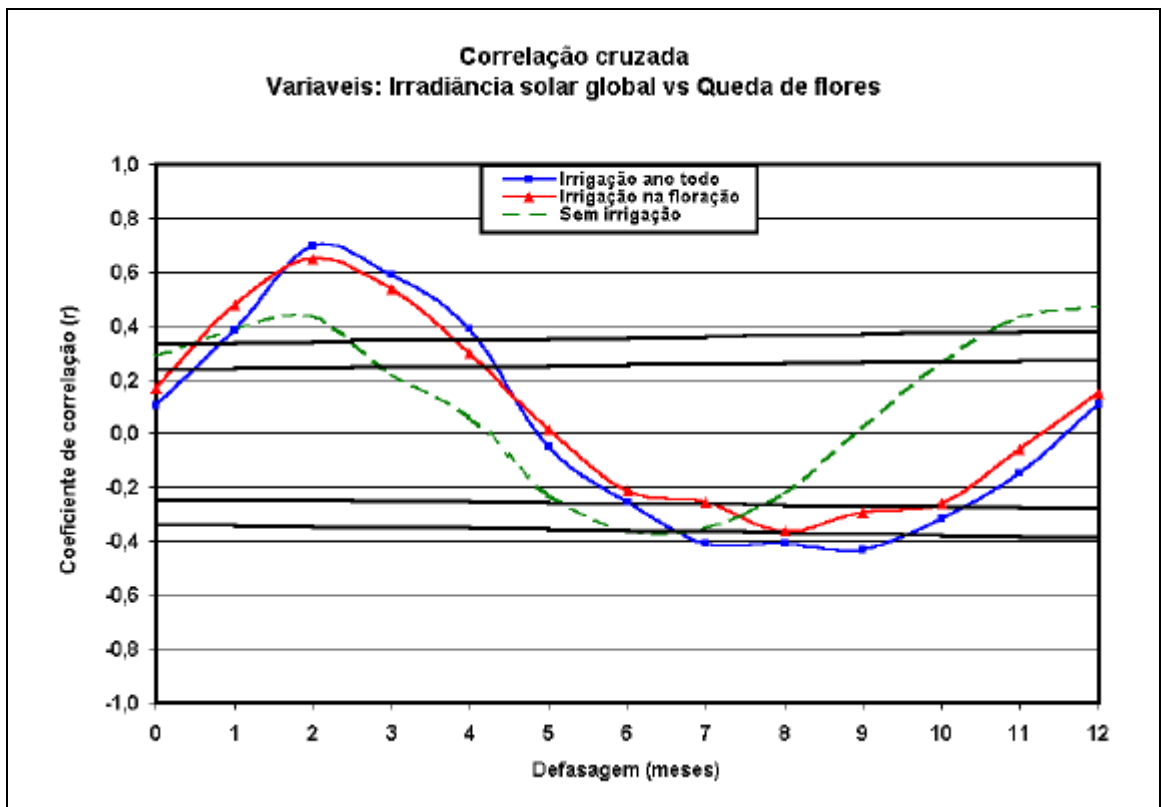


Figura 4.35. Correlação cruzada entre a variável irradiância solar global e a variável fenológica queda de flores dos 3 tratamentos.

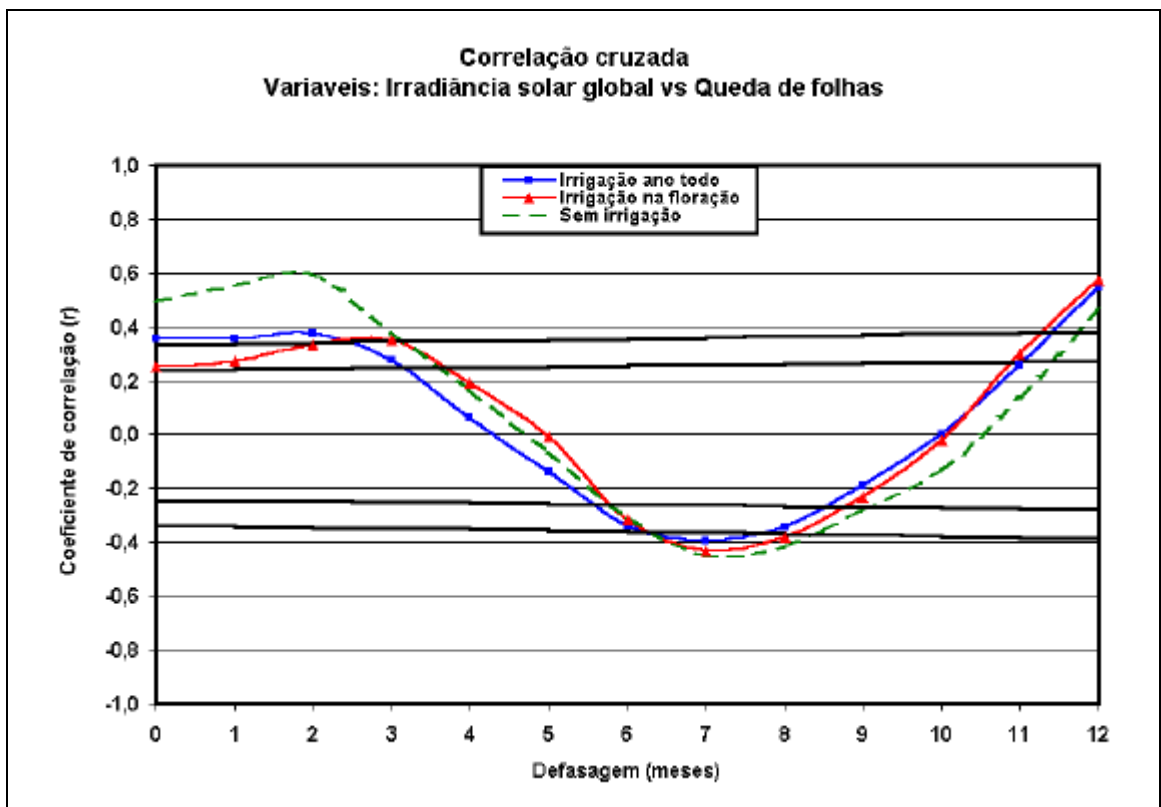


Figura 4.36. Correlação cruzada entre a variável irradiância solar global e a variável fenológica queda de folhas dos 3 tratamentos.

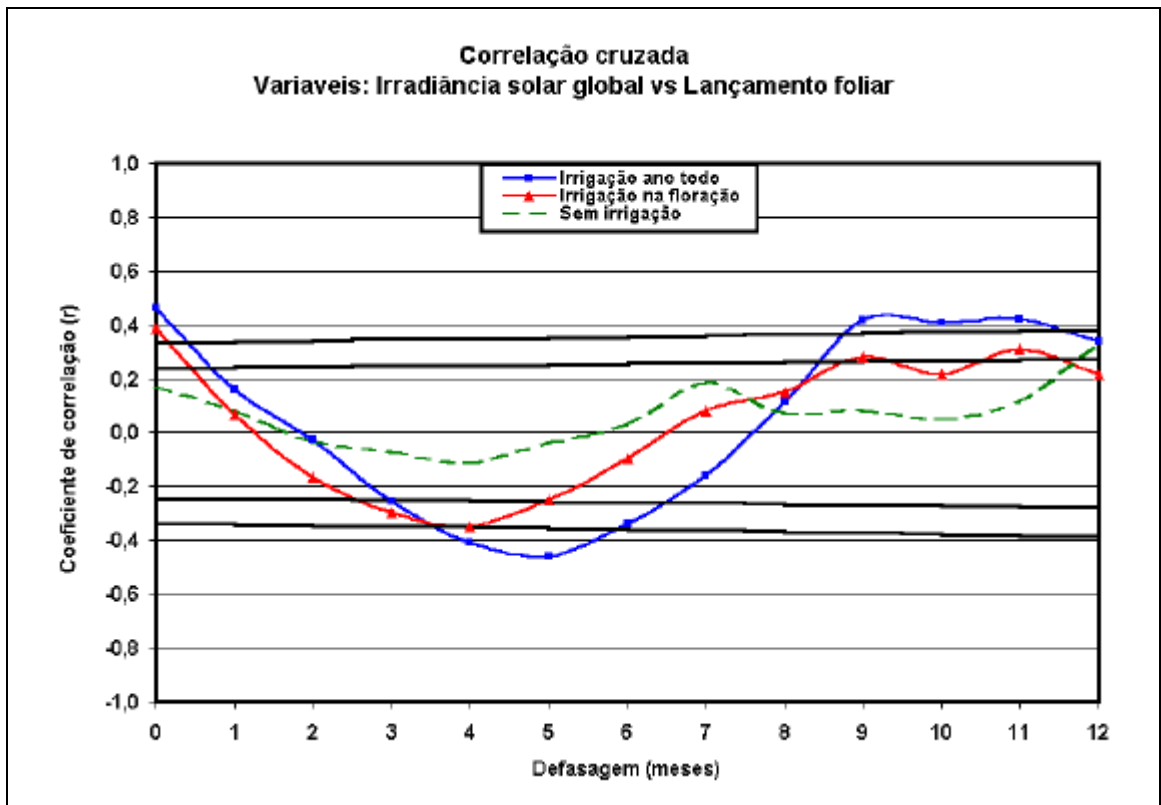


Figura 4.37. Correlação cruzada entre a variável irradiância solar global e a variável fenológica lançamento foliar dos 3 tratamentos.

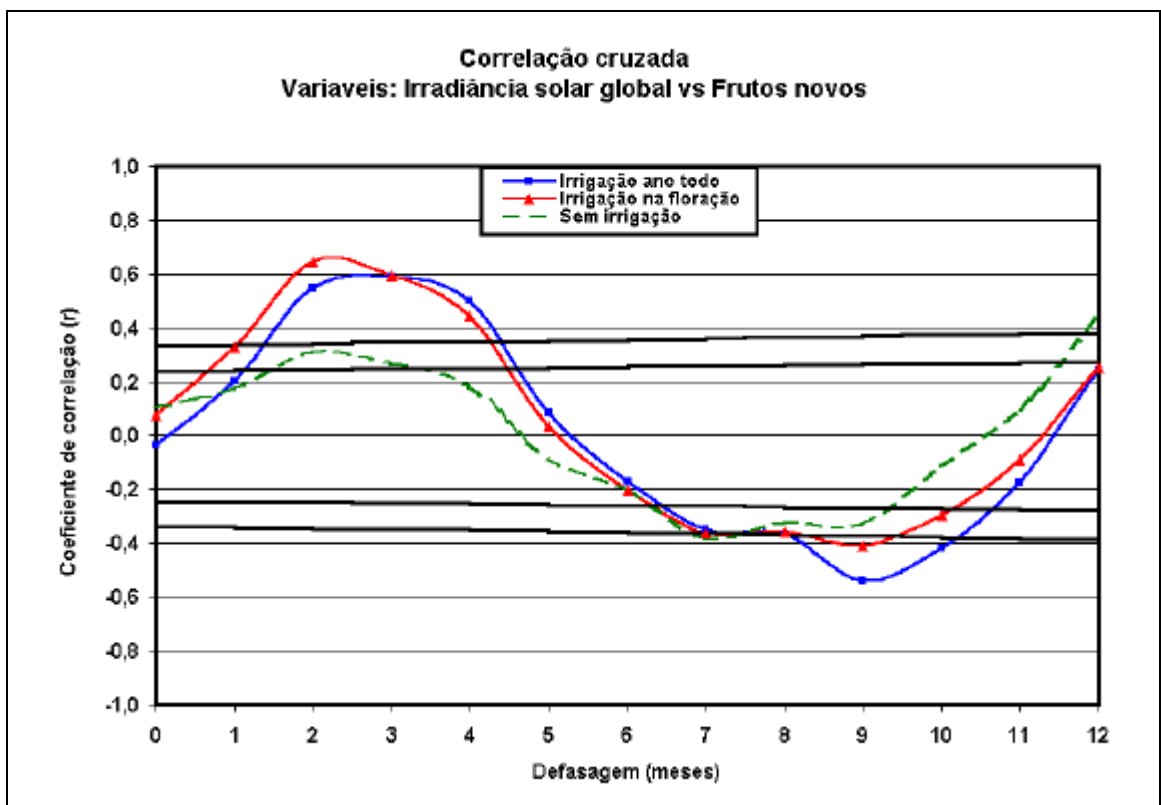


Figura 4.38. Correlação cruzada entre a variável irradiância solar global e a variável fenológica frutos novos dos 3 tratamentos.

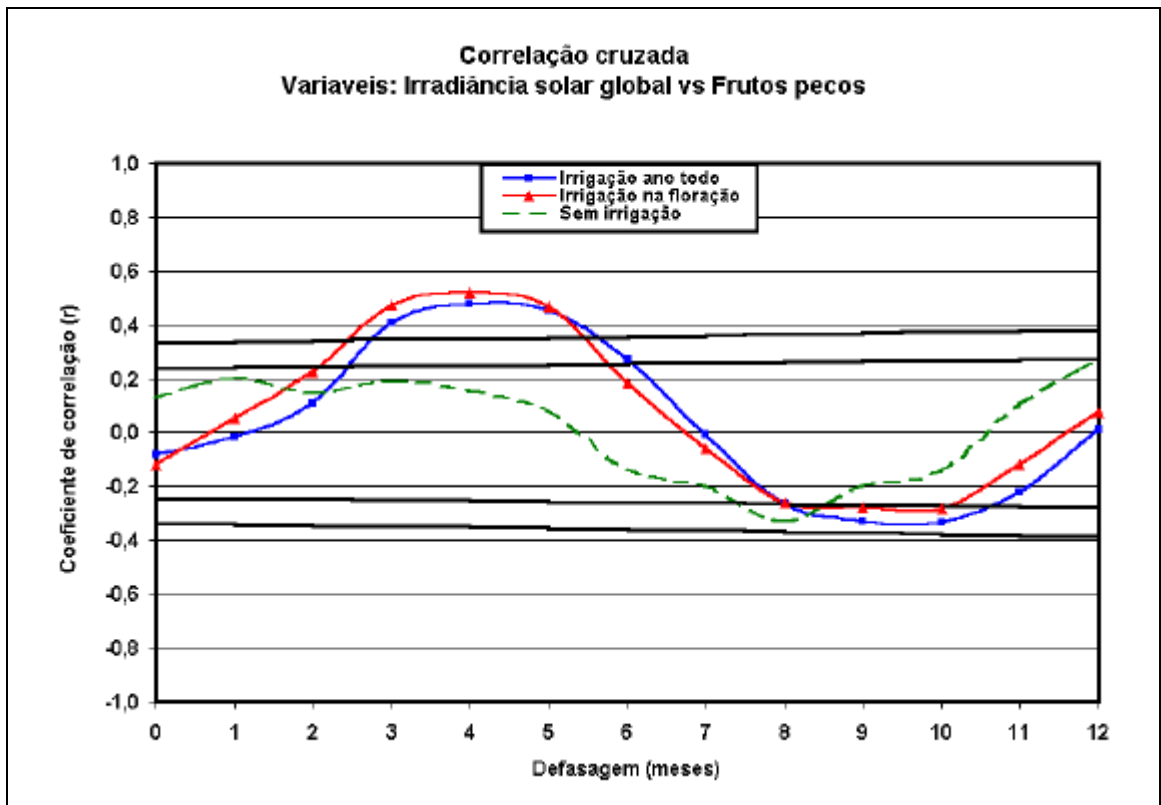


Figura 4.39. Correlação cruzada entre a variável irradiância solar global e a variável fenológica frutos pecos dos 3 tratamentos.

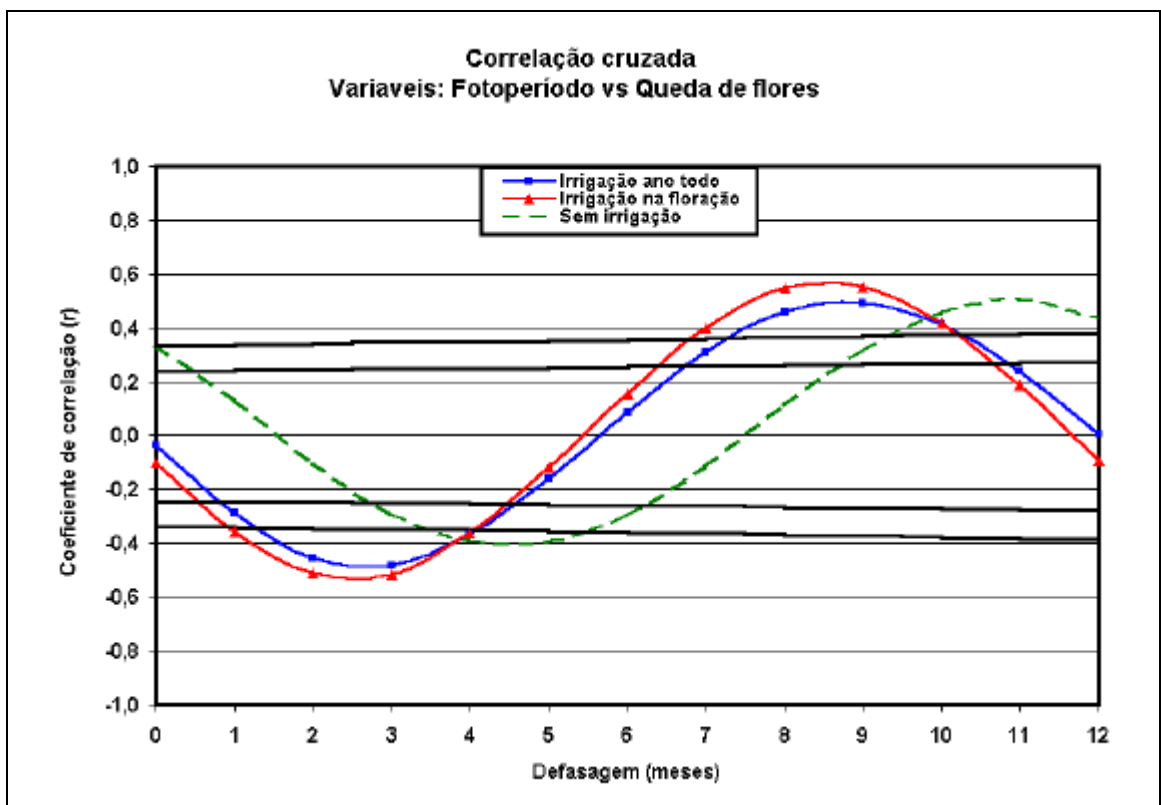


Figura 4.40. Correlação cruzada entre a variável fotoperíodo e a variável fenológica queda de flores dos 3 tratamentos.

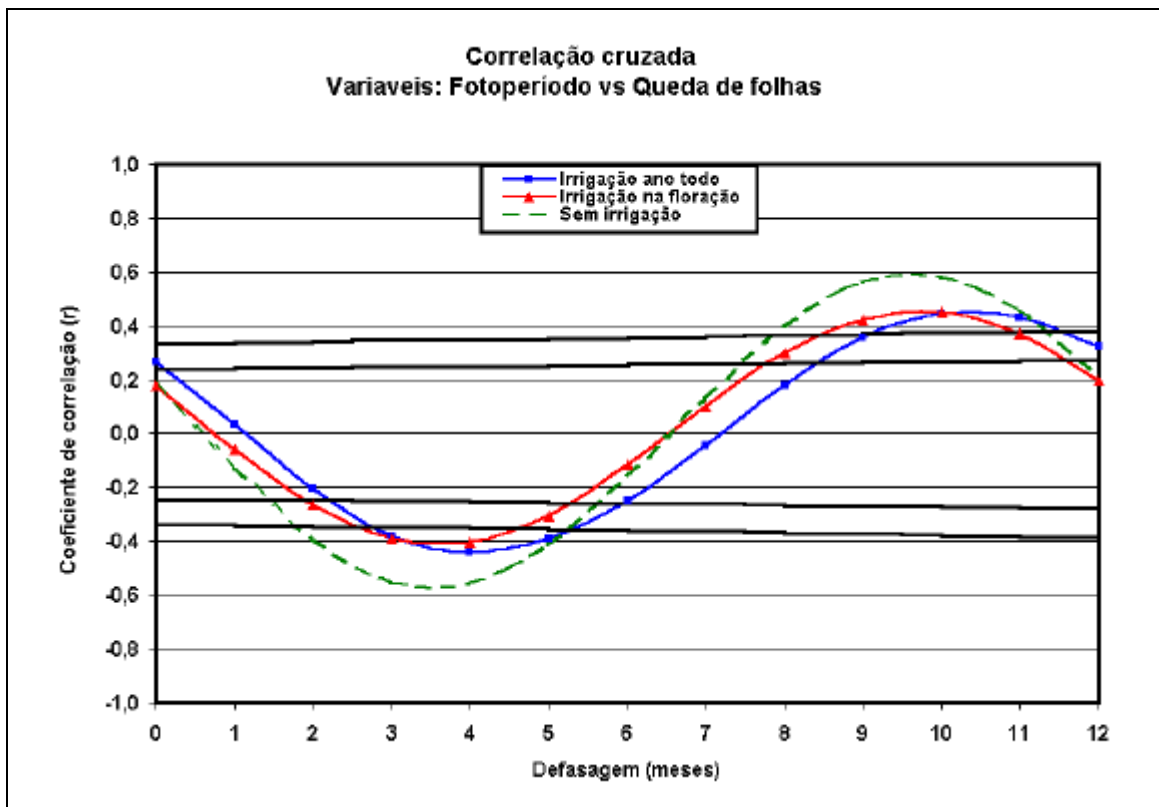


Figura 4.41. Correlação cruzada entre a variável fotoperíodo e a variável fenológica queda de folhas dos 3 tratamentos.

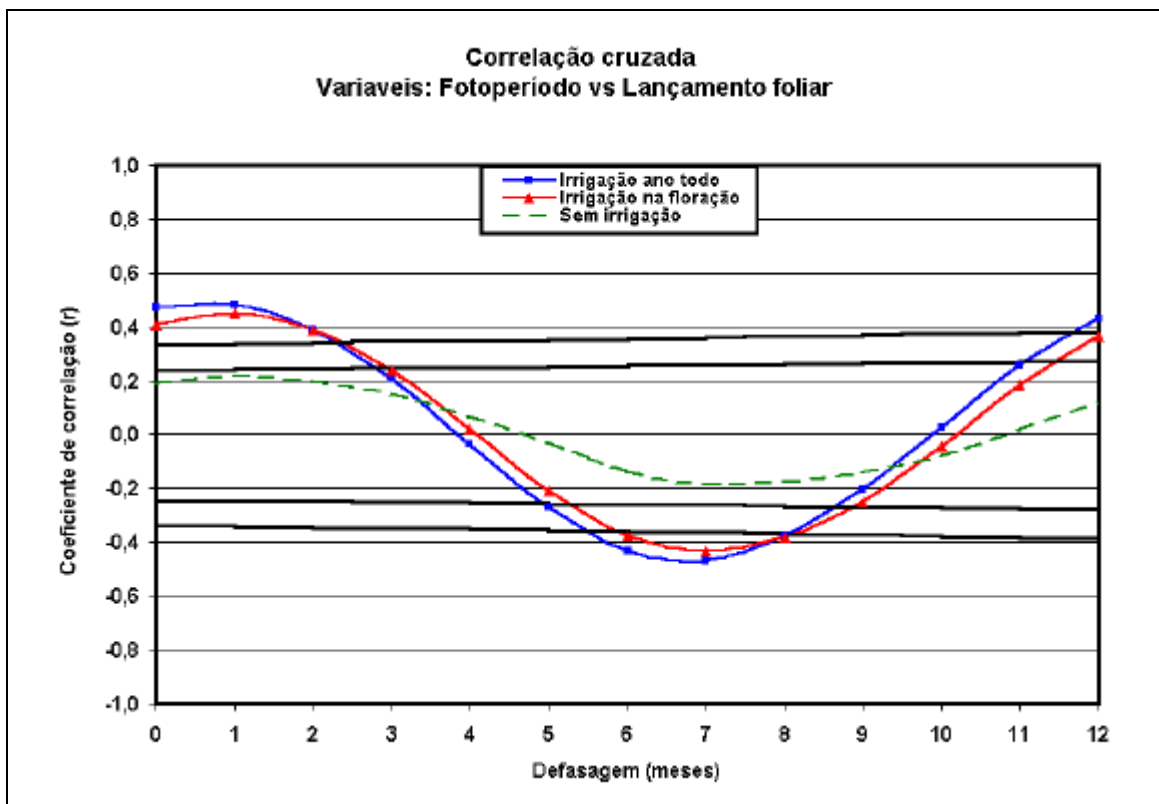


Figura 4.42. Correlação cruzada entre a variável fotoperíodo e a variável fenológica lançamento foliar dos 3 tratamentos.

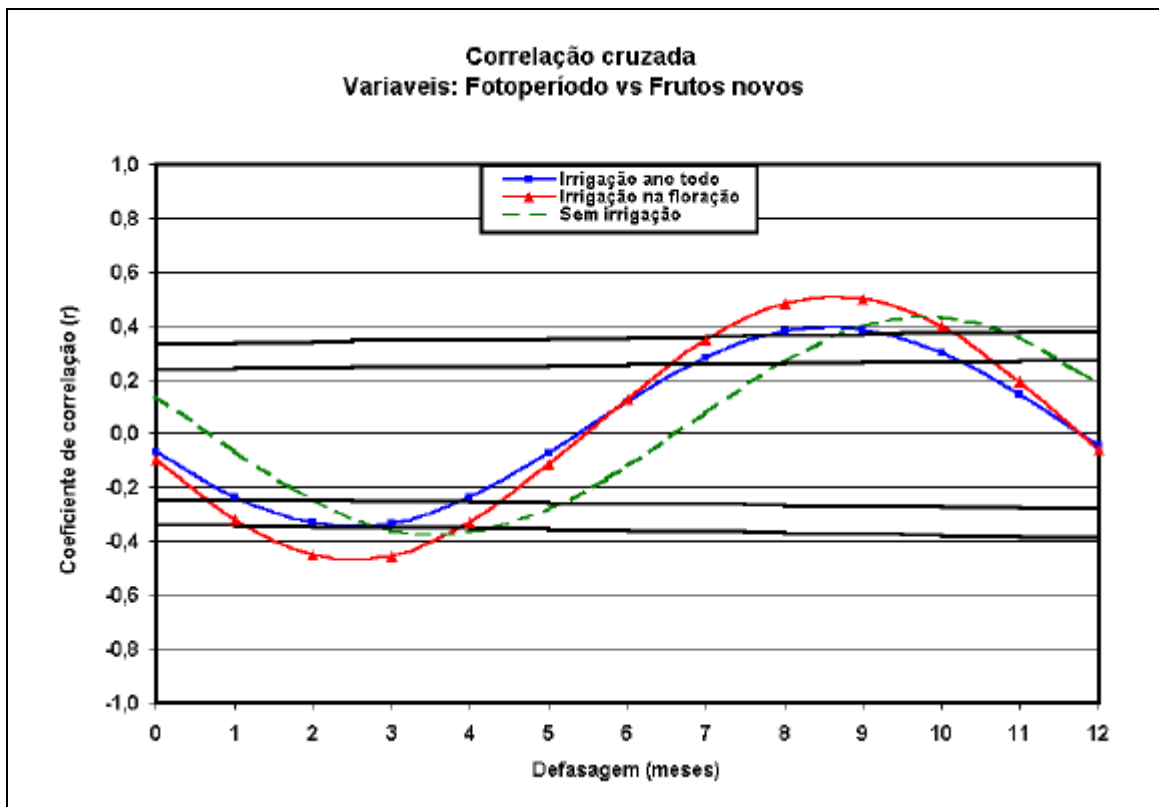


Figura 4.43. Correlação cruzada entre a variável fotoperíodo e a variável fenológica frutos novos dos 3 tratamentos.

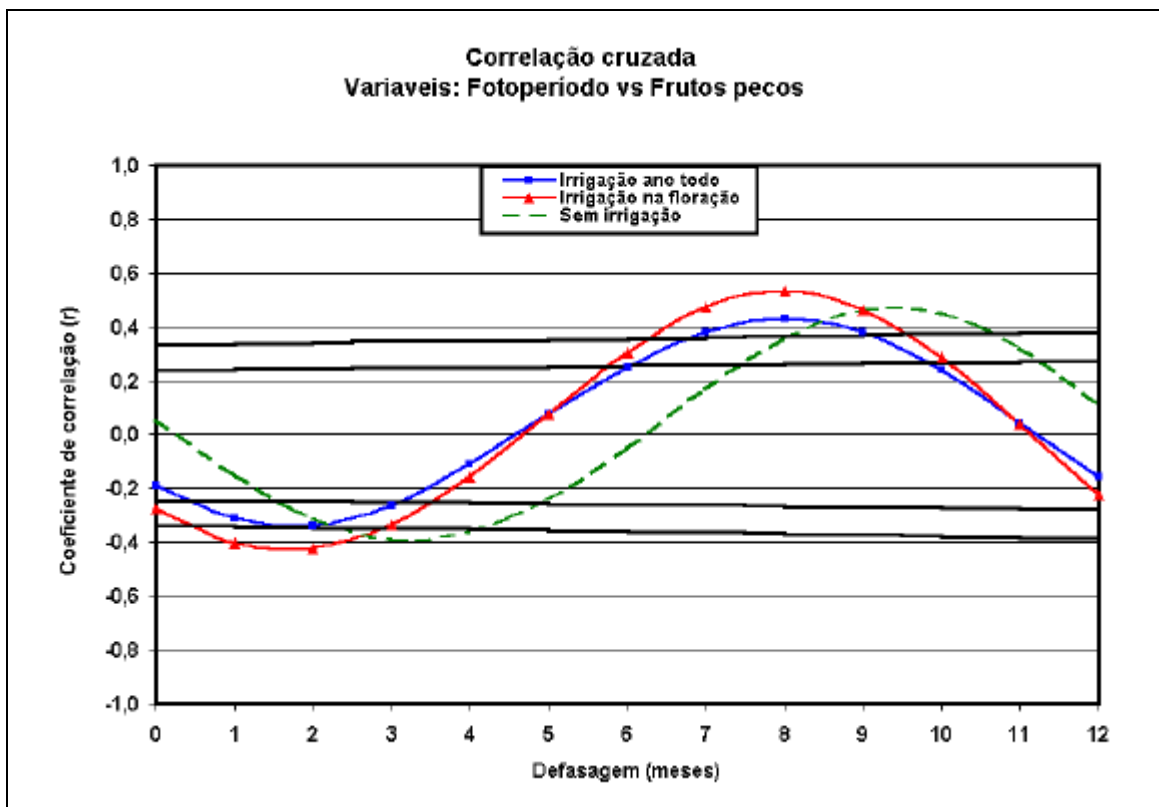


Figura 4.44. Correlação cruzada entre a variável fotoperíodo e a variável fenológica frutos pecos dos 3 tratamentos.

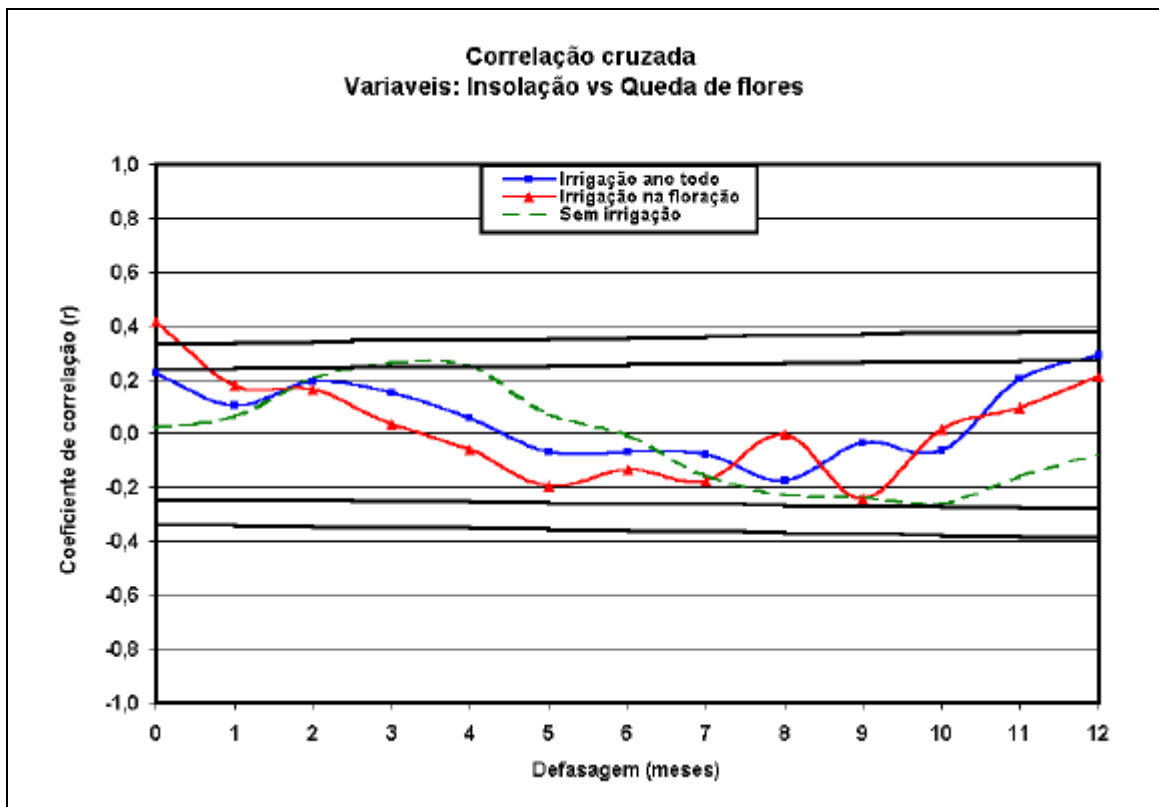


Figura 4.45. Correlação cruzada entre a variável insolação e a variável fenológica queda de flores dos 3 tratamentos.

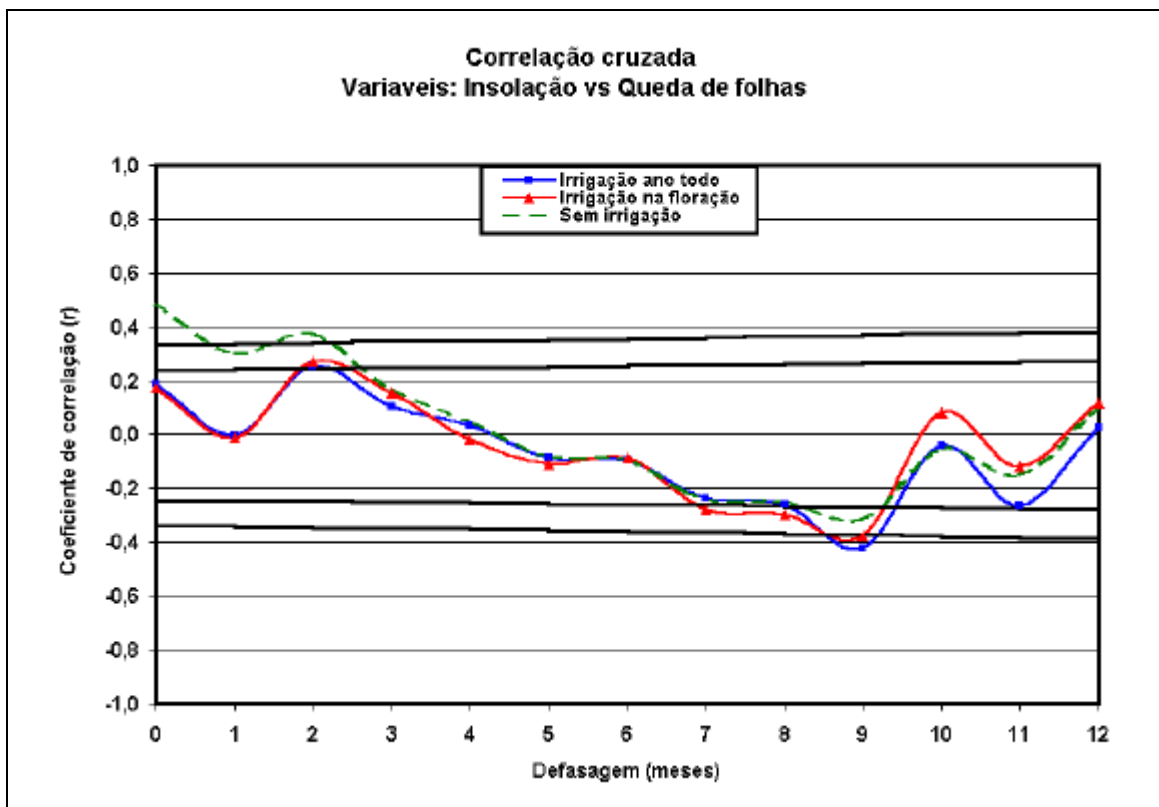


Figura 4.46. Correlação cruzada entre a variável insolação e a variável fenológica queda de folhas dos 3 tratamentos.

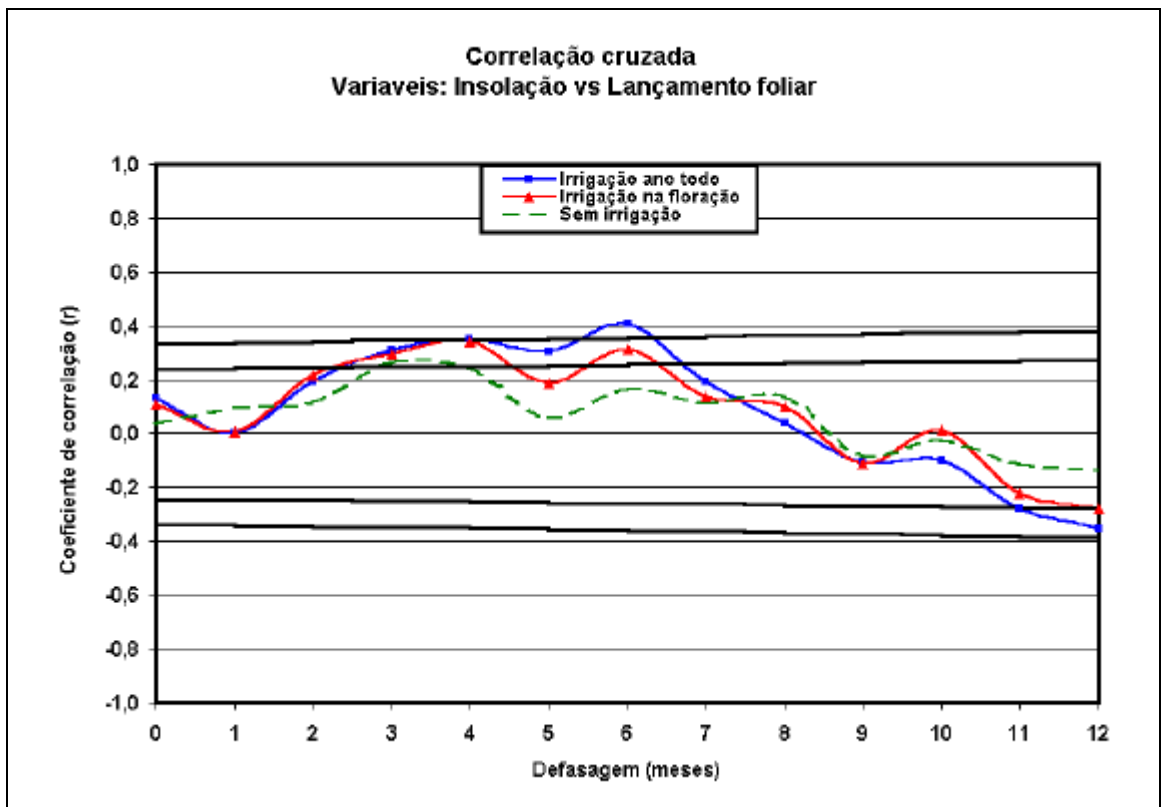


Figura 4.47. Correlação cruzada entre a variável insolação e a variável fenológica lançamento foliar dos 3 tratamentos.

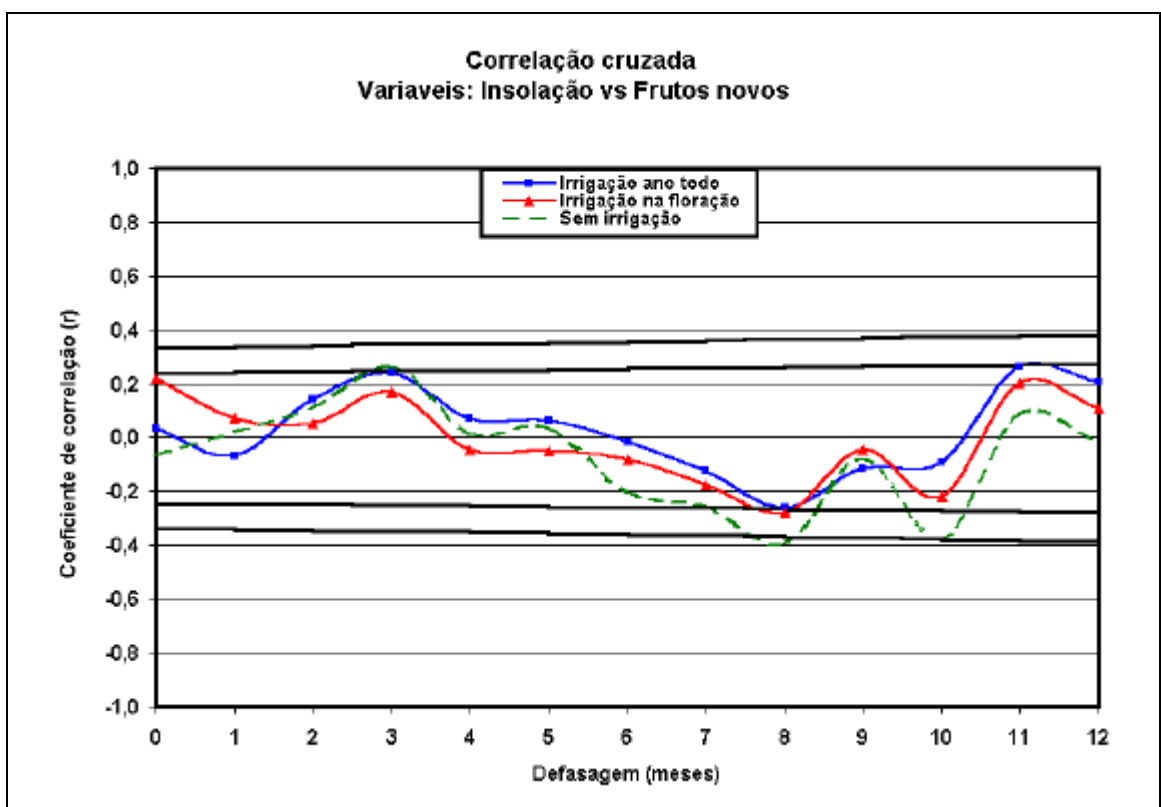


Figura 4.48. Correlação cruzada entre a variável insolação e a variável fenológica frutos novos dos 3 tratamentos.

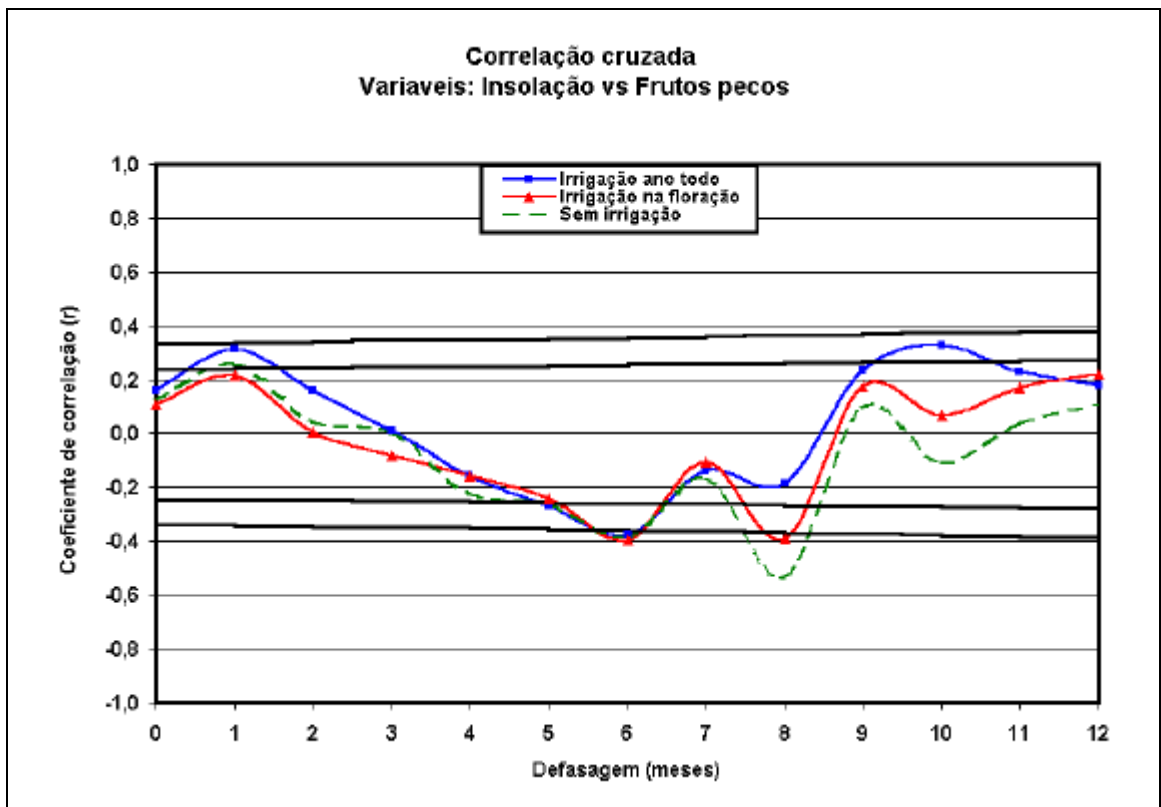


Figura 4.49. Correlação cruzada entre a variável insolação e a variável fenológica frutos pecos dos 3 tratamentos.

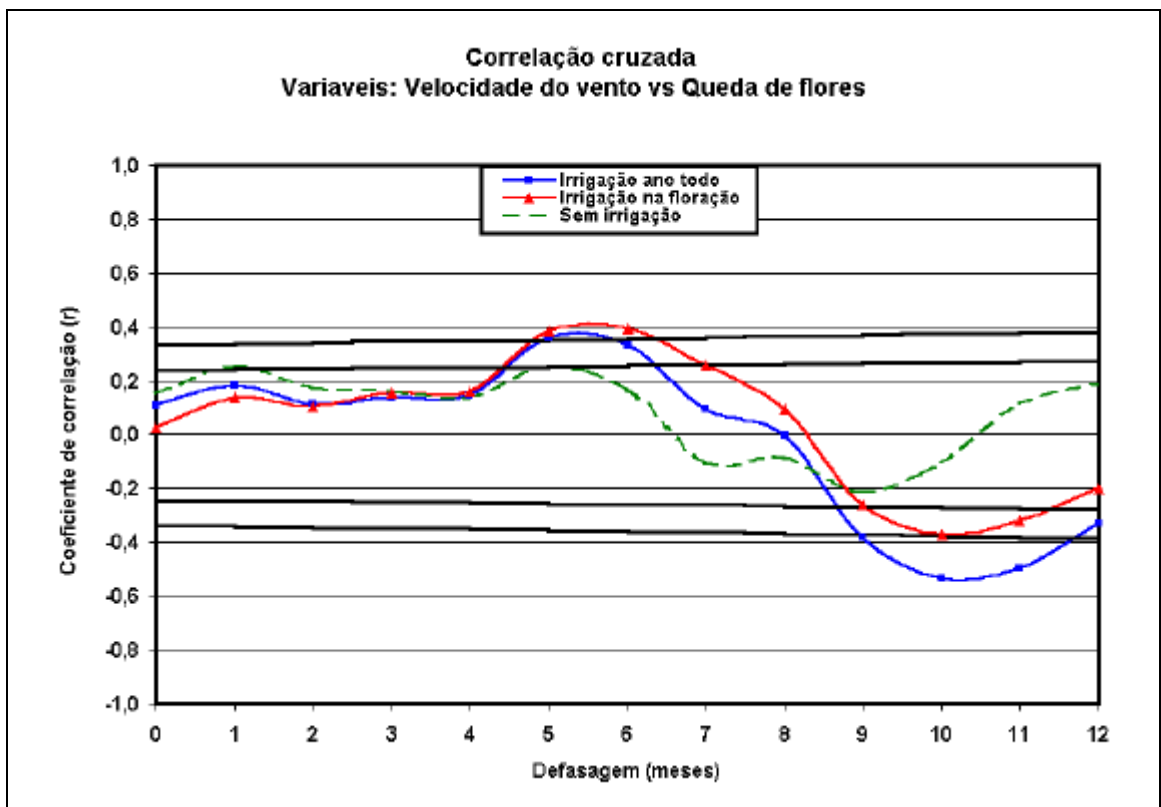


Figura 4.50. Correlação cruzada entre a variável velocidade do vento a 2 m de altura e a variável fenológica queda de flores dos 3 tratamentos.

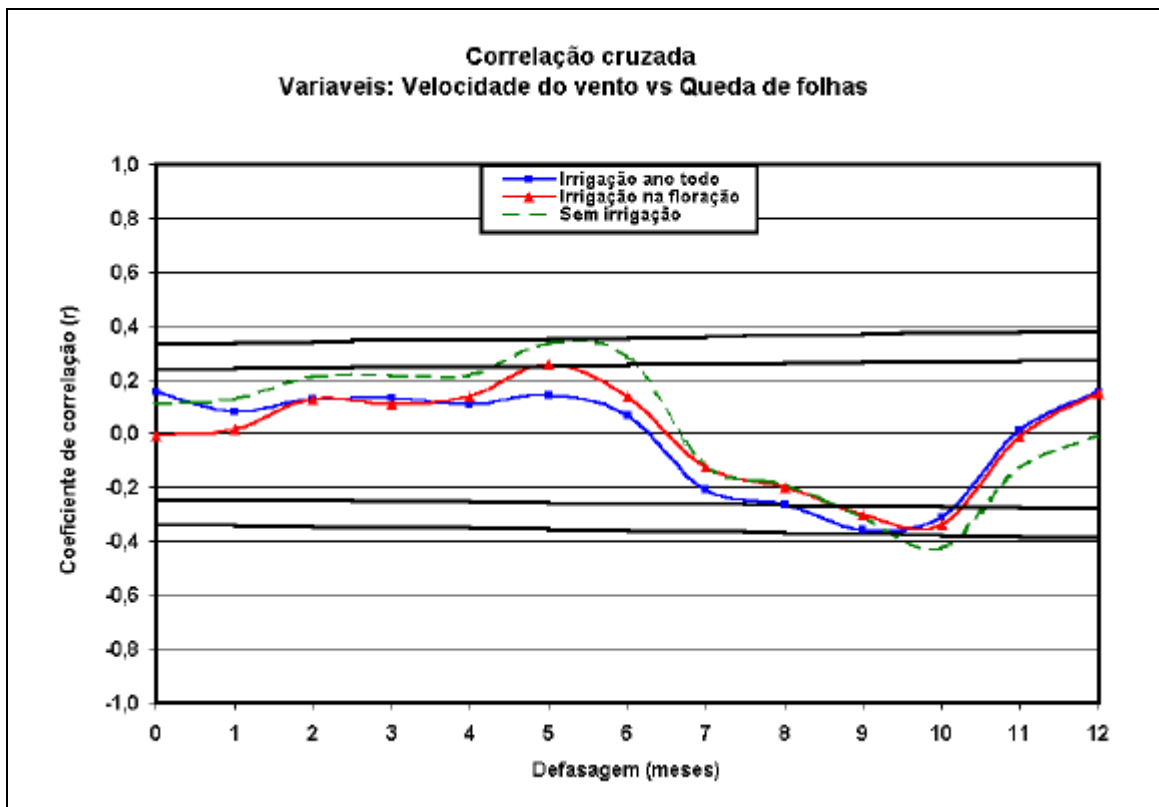


Figura 4.51. Correlação cruzada entre a variável velocidade do vento a 2 m de altura e a variável fenológica queda de folhas dos 3 tratamentos.

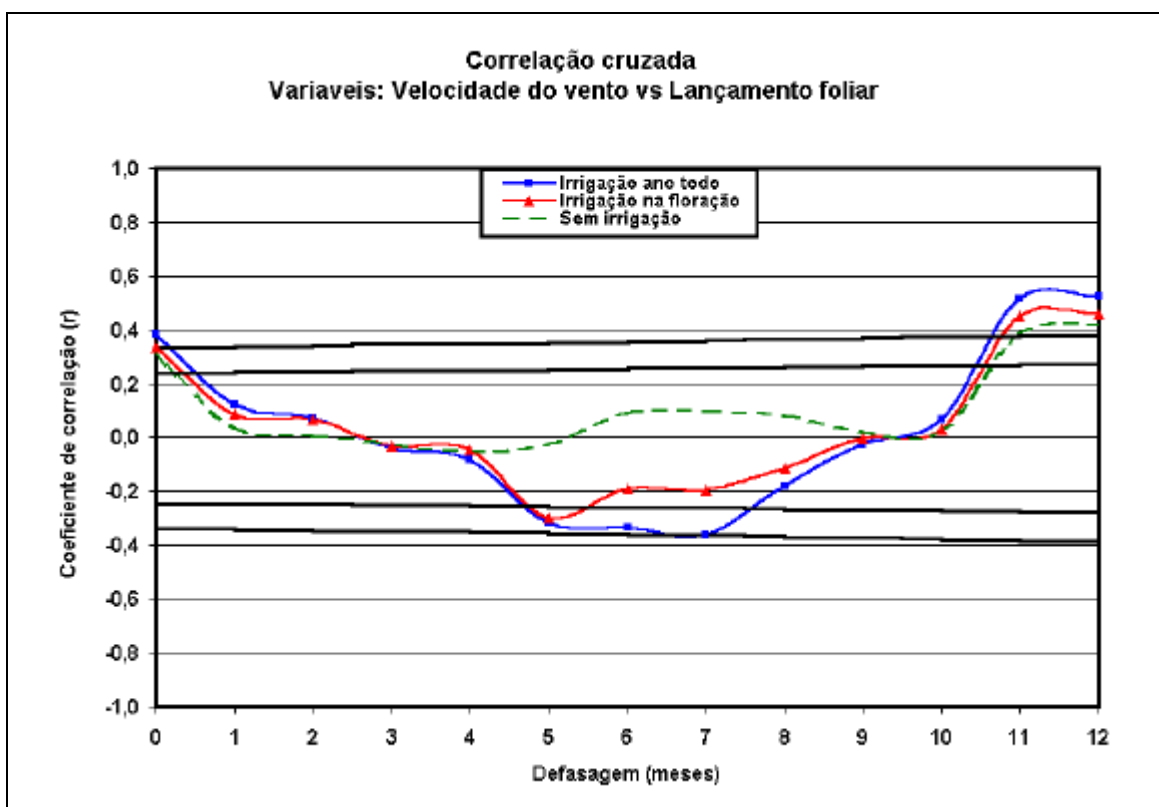


Figura 4.52. Correlação cruzada entre a variável velocidade do vento a 2 m de altura e a variável fenológica lançamento foliar dos 3 tratamentos.

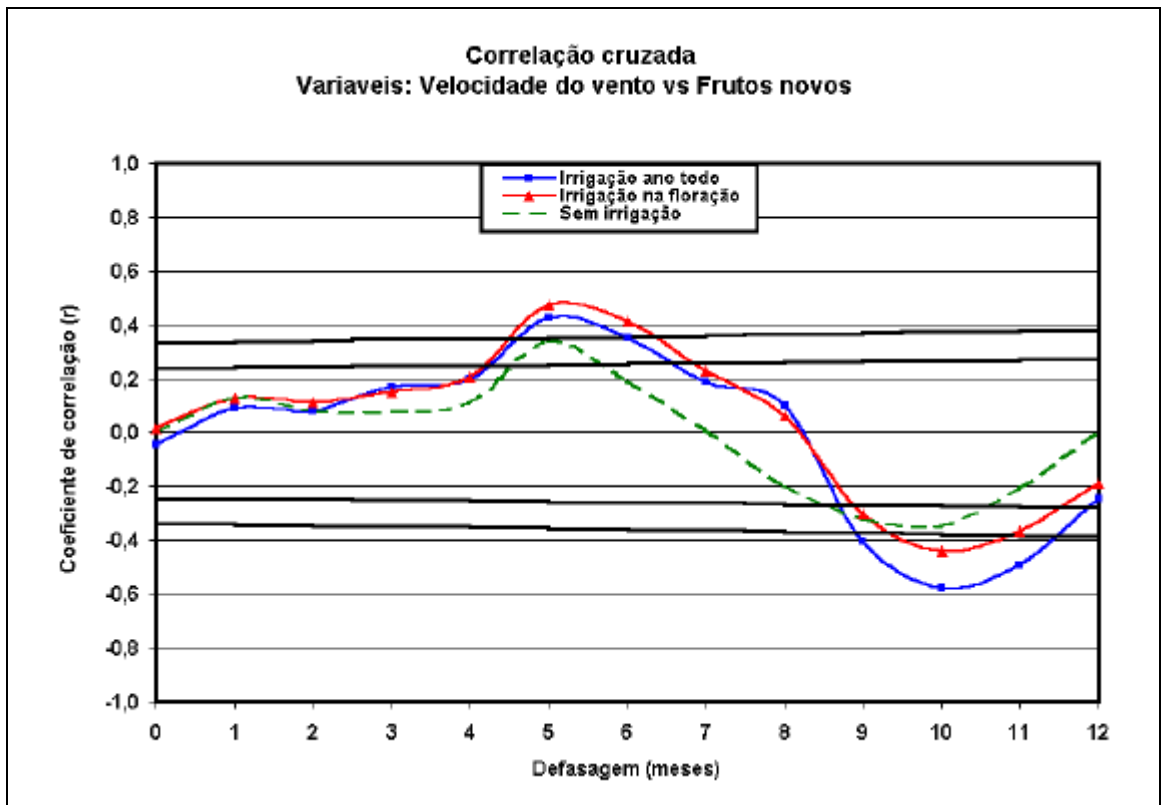


Figura 4.53. Correlação cruzada entre a variável velocidade do vento a 2 m de altura e a variável fenológica frutos novos dos 3 tratamentos.

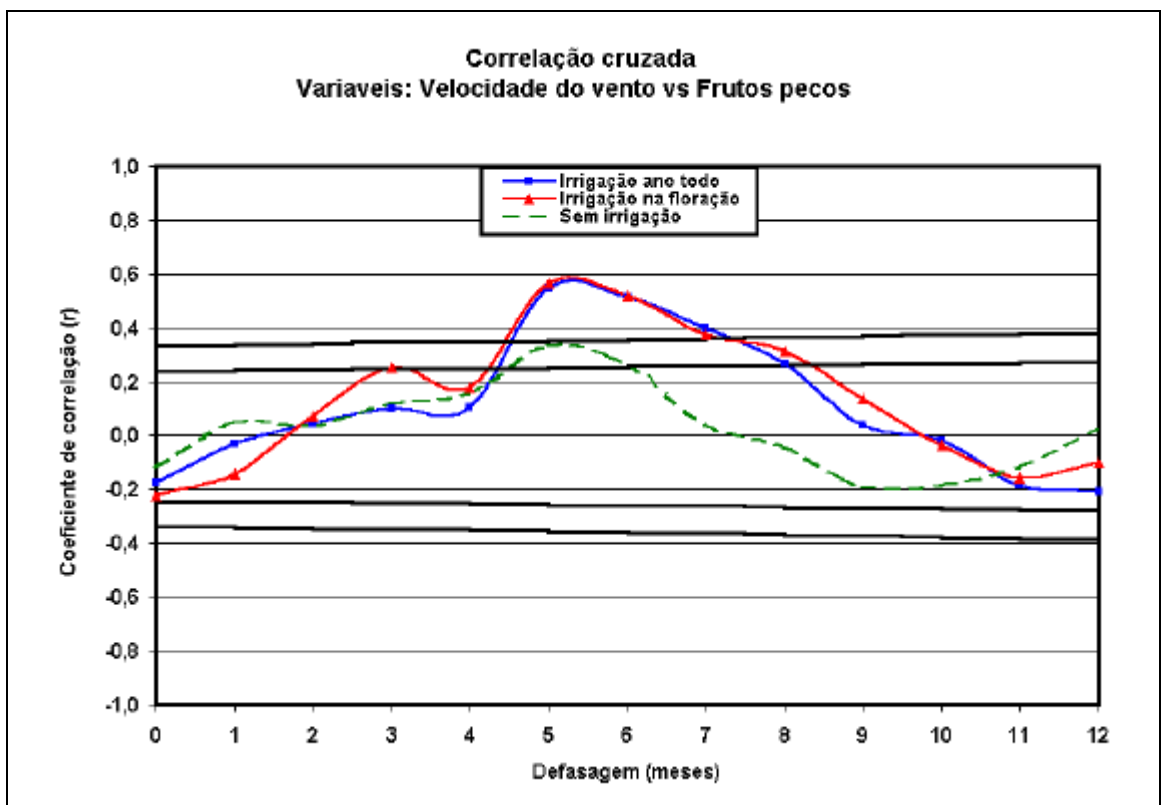


Figura 4.54. Correlação cruzada entre a variável velocidade do vento a 2 m de altura e a variável fenológica frutos pecos dos 3 tratamentos.

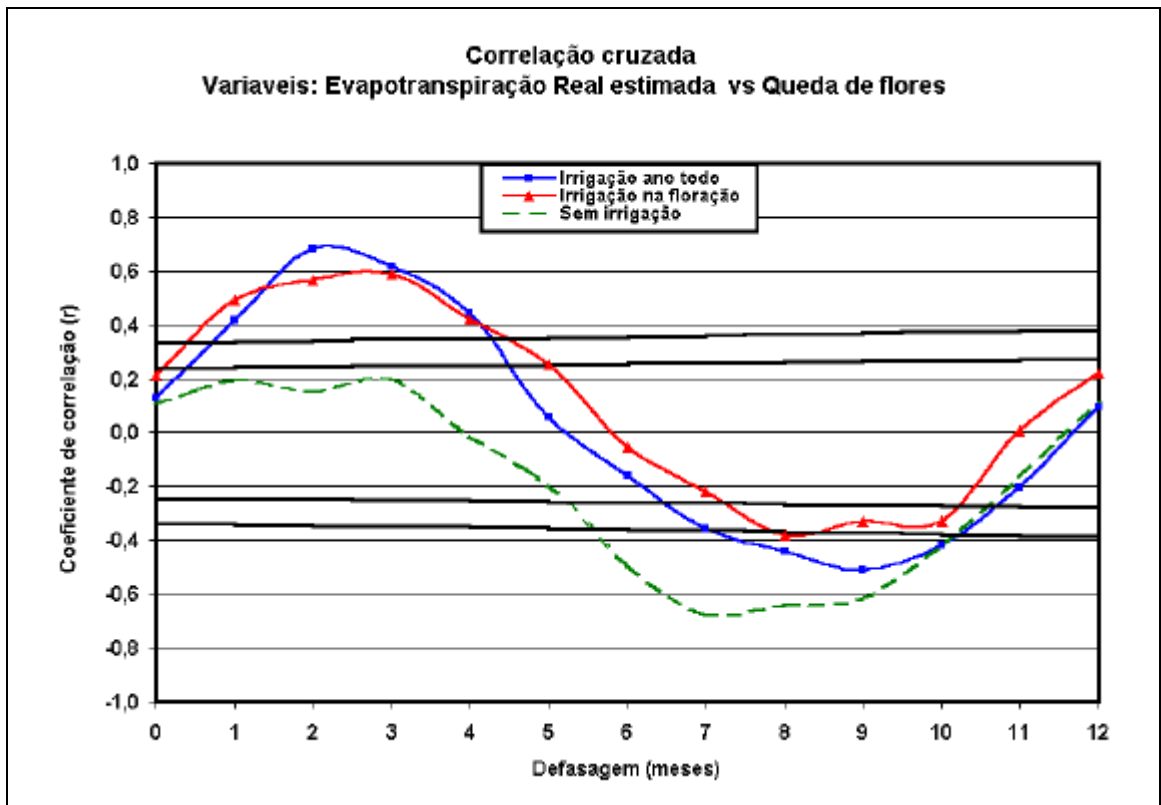


Figura 4.55. Correlação cruzada entre a variável evapotranspiração real estimada e a variável fenológica queda de flores dos 3 tratamentos.

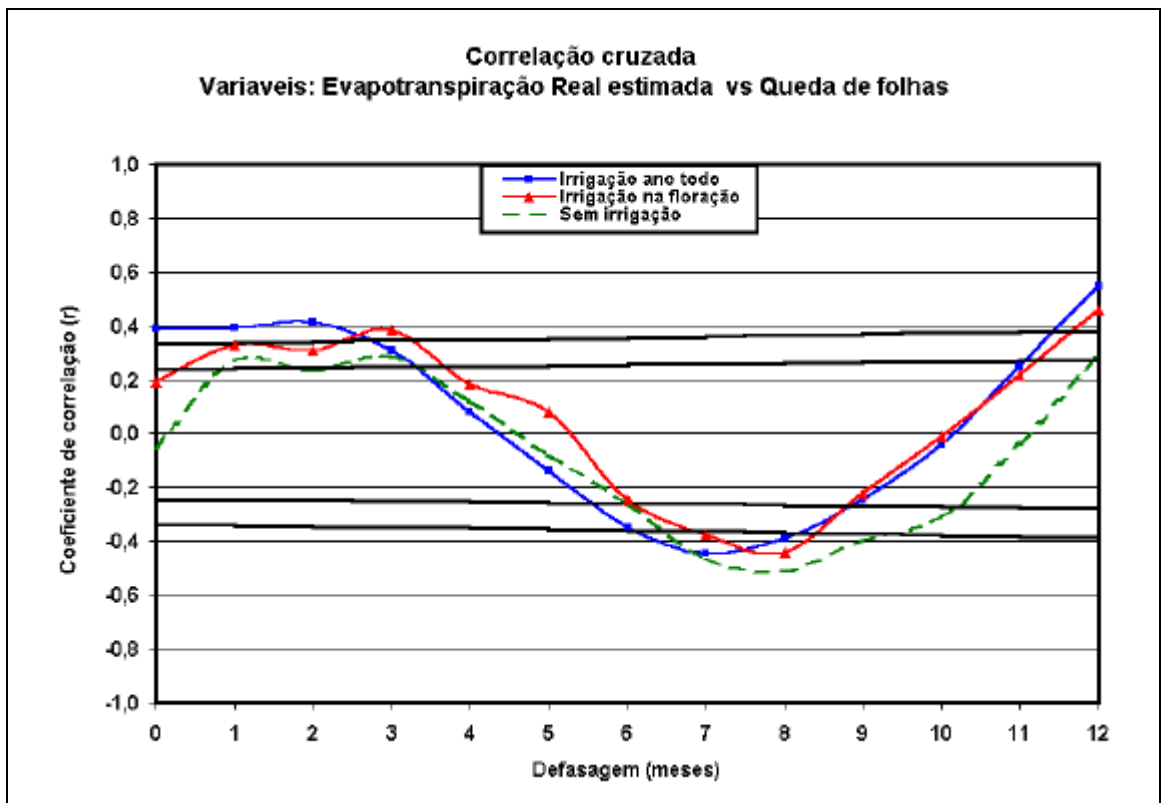


Figura 4.56. Correlação cruzada entre a variável evapotranspiração real estimada e a variável fenológica queda de folhas dos 3 tratamentos.

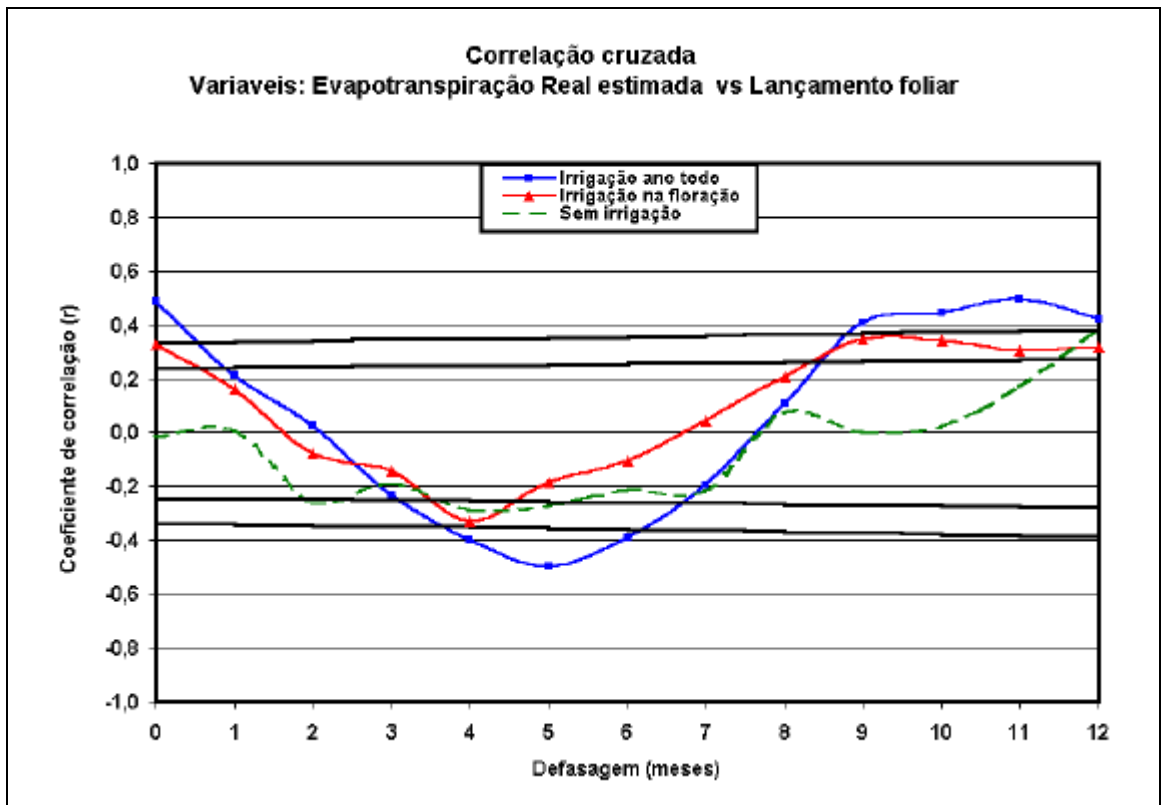


Figura 4.57. Correlação cruzada entre a variável evapotranspiração real estimada e a variável fenológica lançamento foliar dos 3 tratamentos.

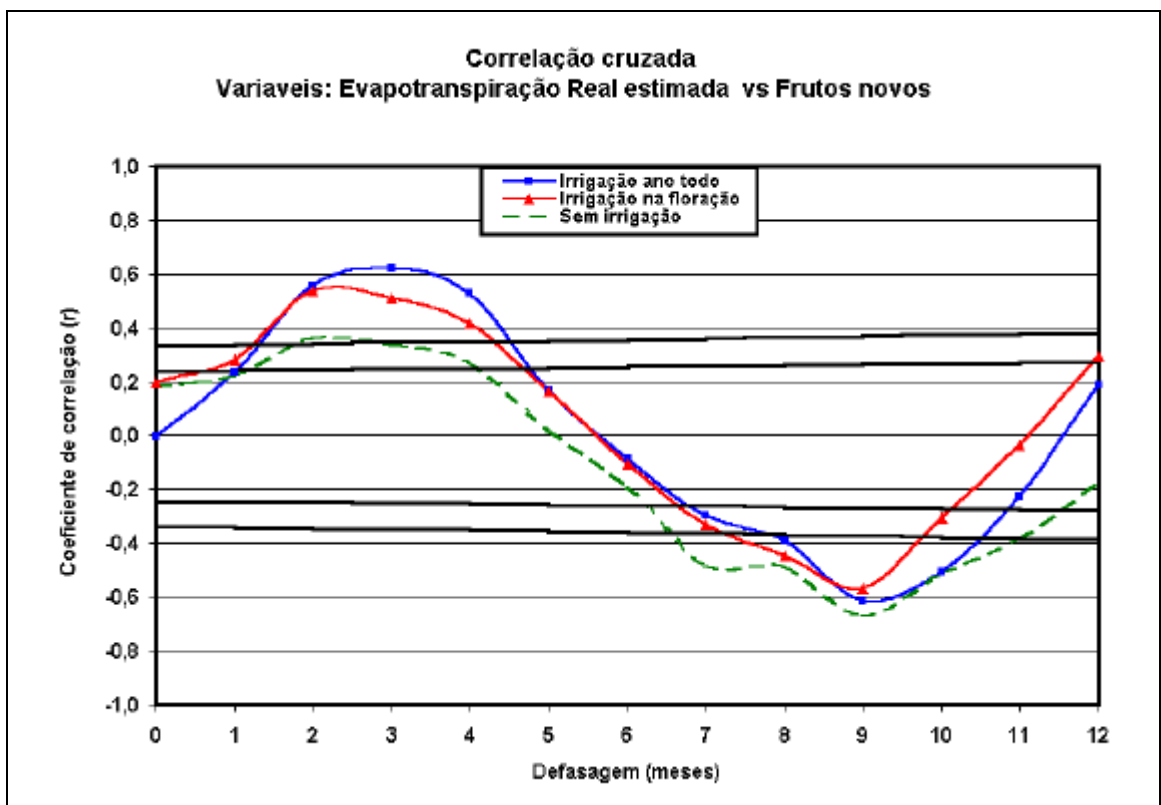


Figura 4.58. Correlação cruzada entre a variável evapotranspiração real estimada e a variável fenológica frutos novos dos 3 tratamentos.

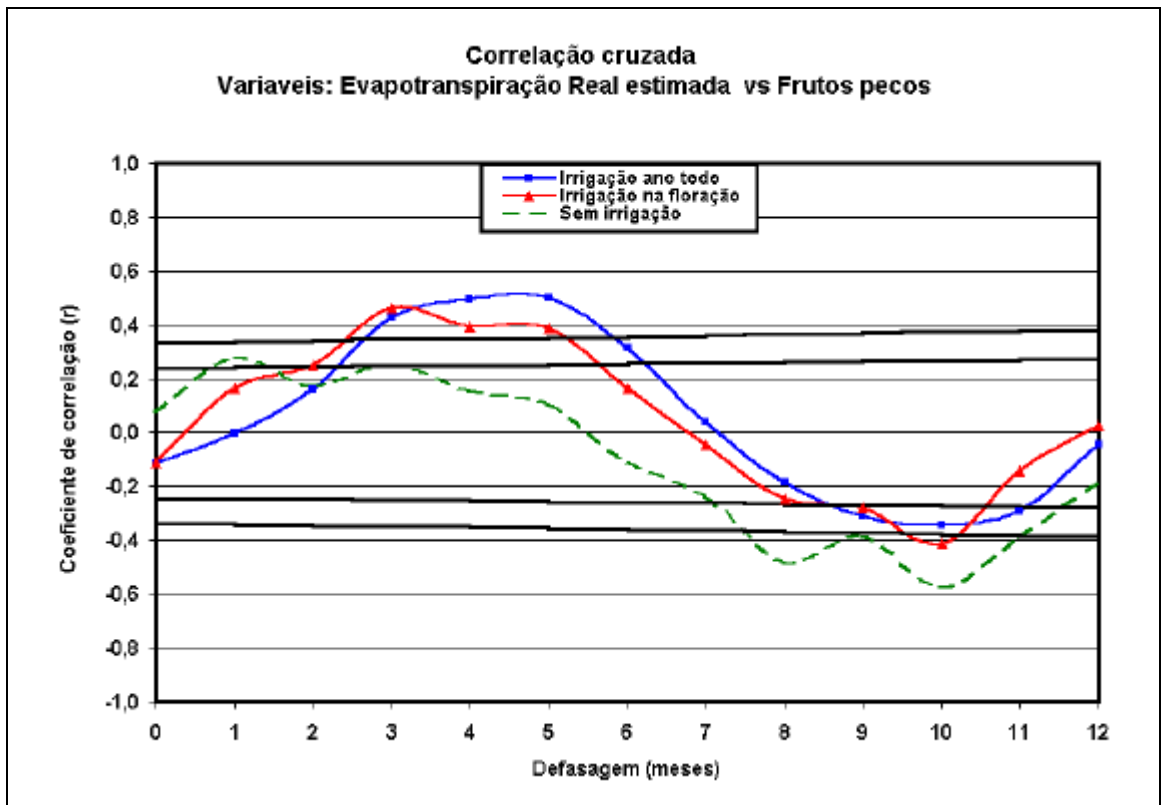


Figura 4.59. Correlação cruzada entre a variável evapotranspiração real estimada e a variável fenológica frutos pecos dos 3 tratamentos.

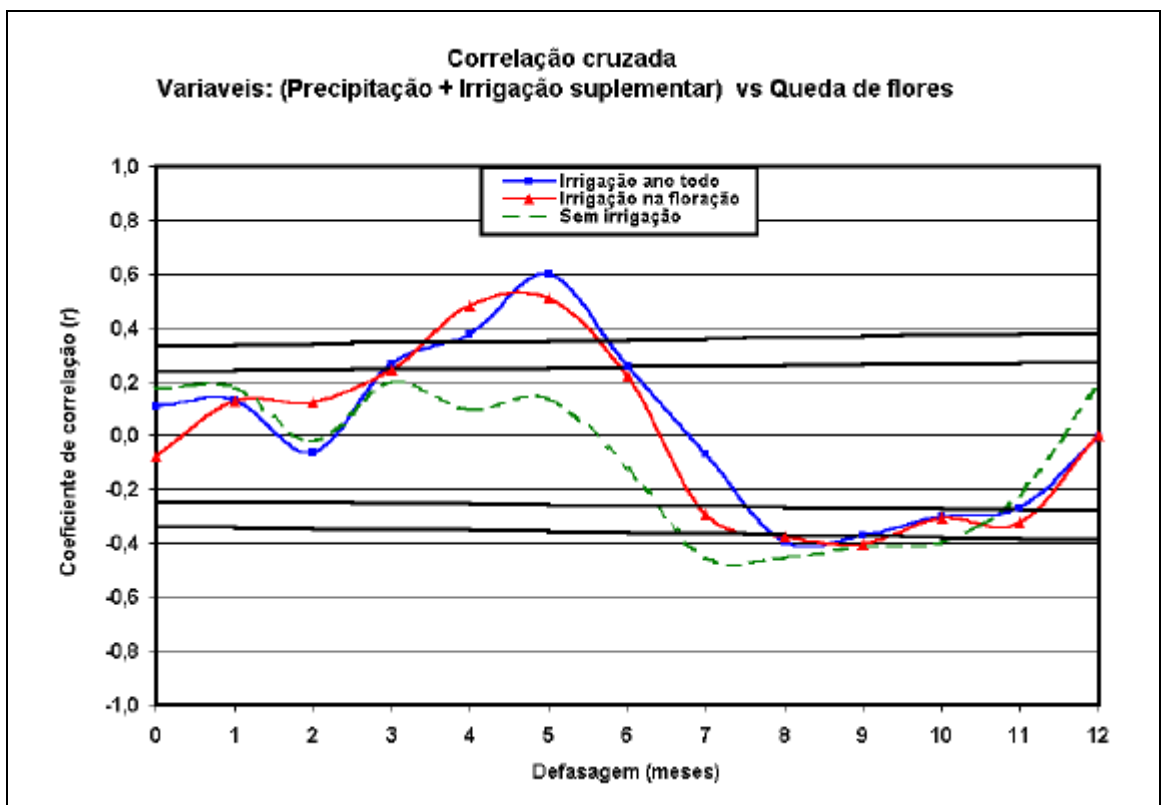


Figura 4.60. Correlação cruzada entre a variável (precipitação + irrigação suplementar) e a variável fenológica queda de flores dos 3 tratamentos.

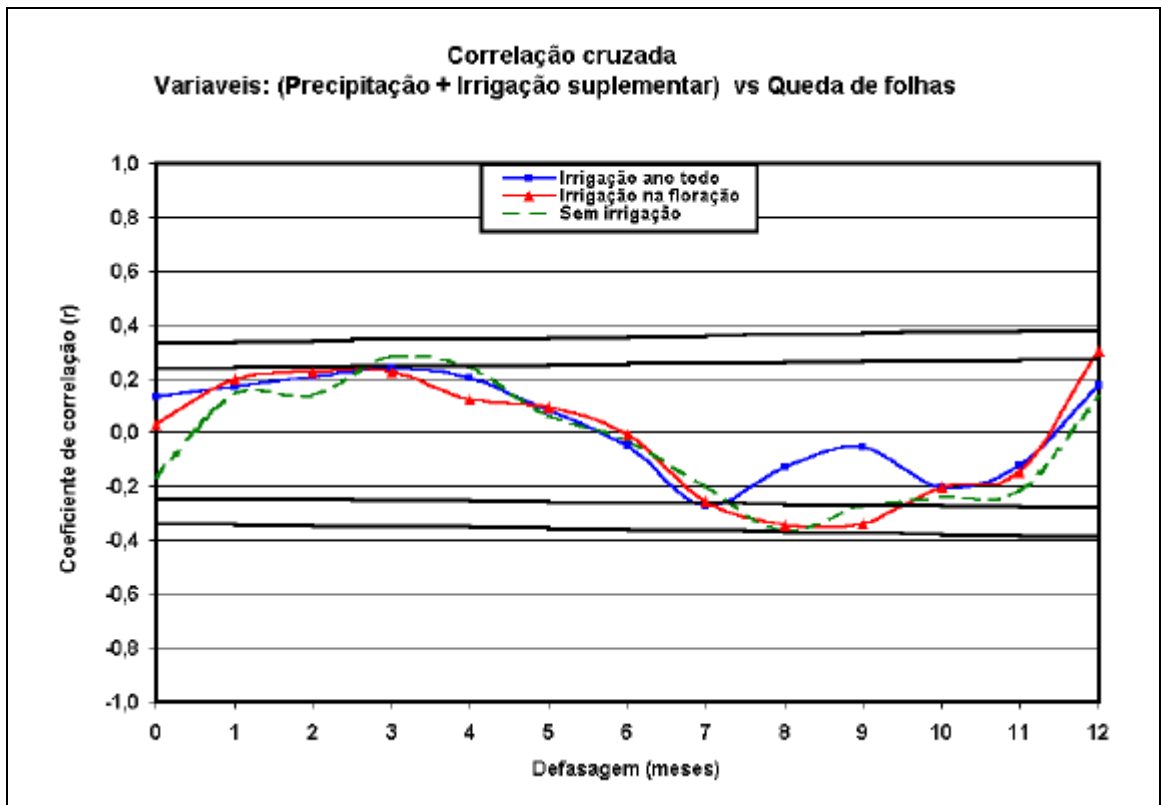


Figura 4.61. Correlação cruzada entre a variável (precipitação + irrigação suplementar) e a variável fenológica queda de folhas dos 3 tratamentos.

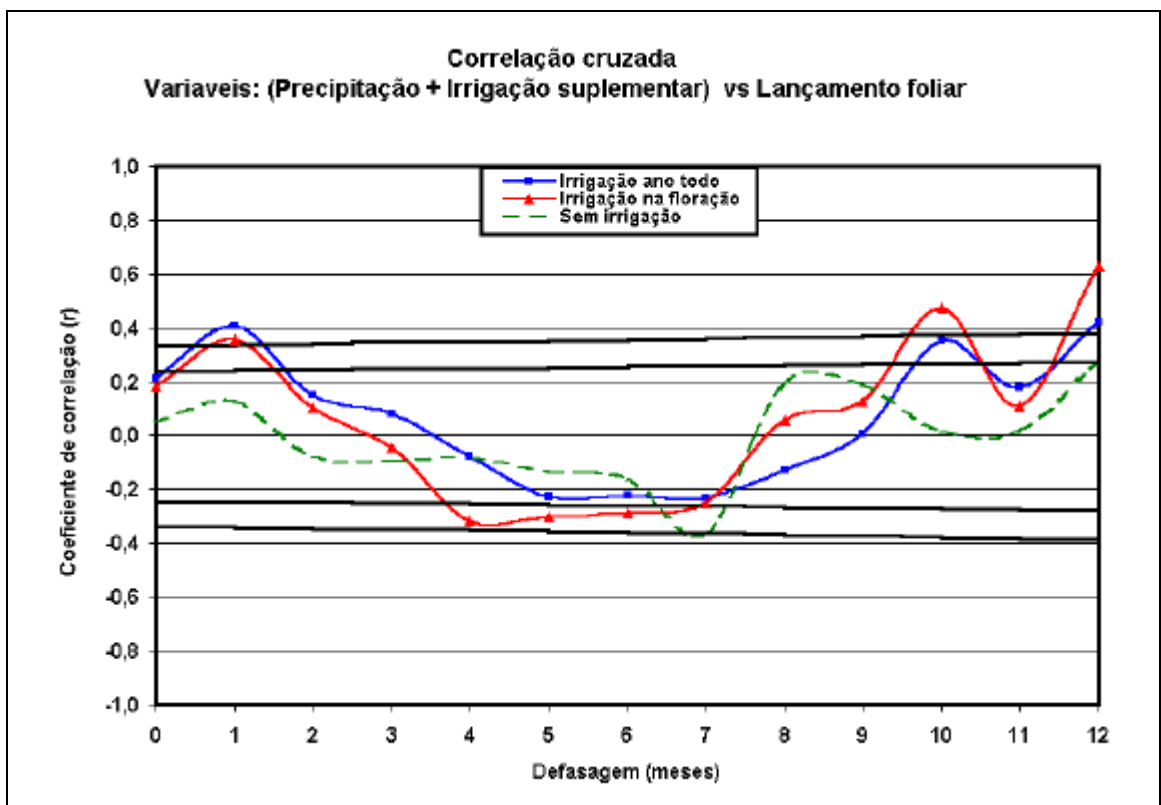


Figura 4.62. Correlação cruzada entre a variável (precipitação + irrigação suplementar) e a variável fenológica lançamento foliar dos 3 tratamentos.

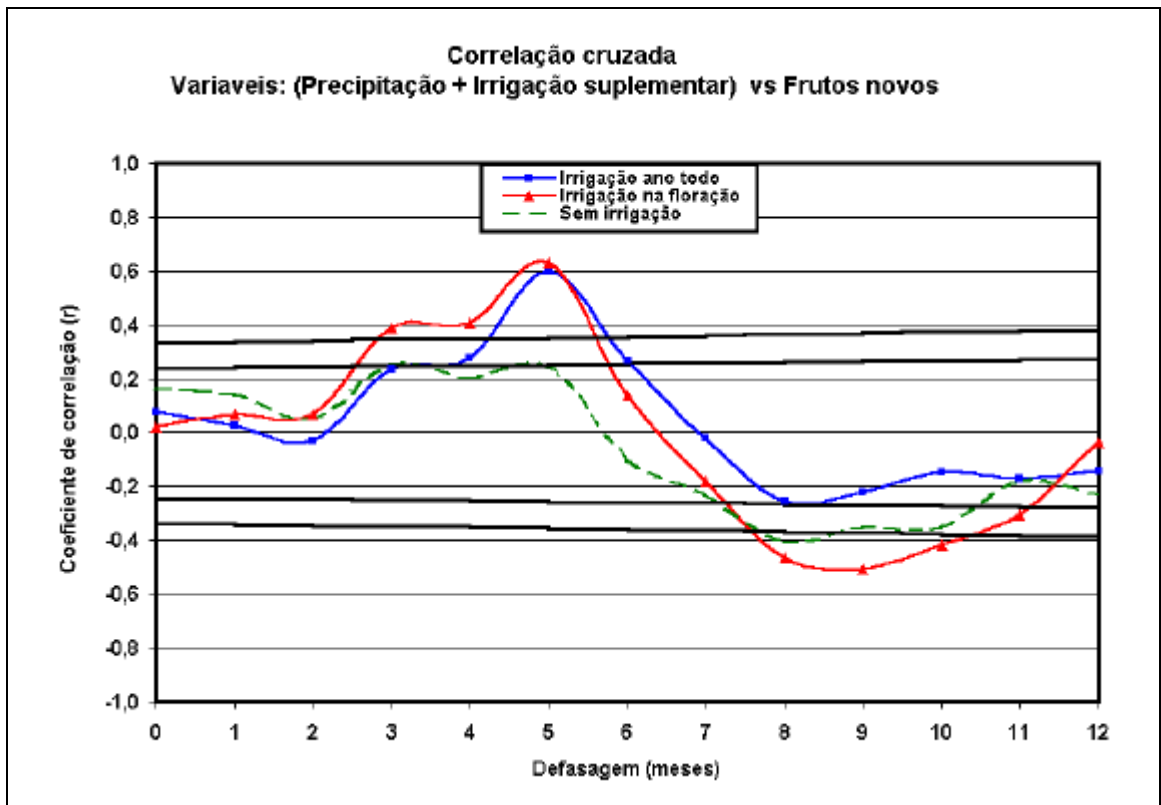


Figura 4.63. Correlação cruzada entre a variável (precipitação + irrigação suplementar) e a variável fenológica frutos novos dos 3 tratamentos.

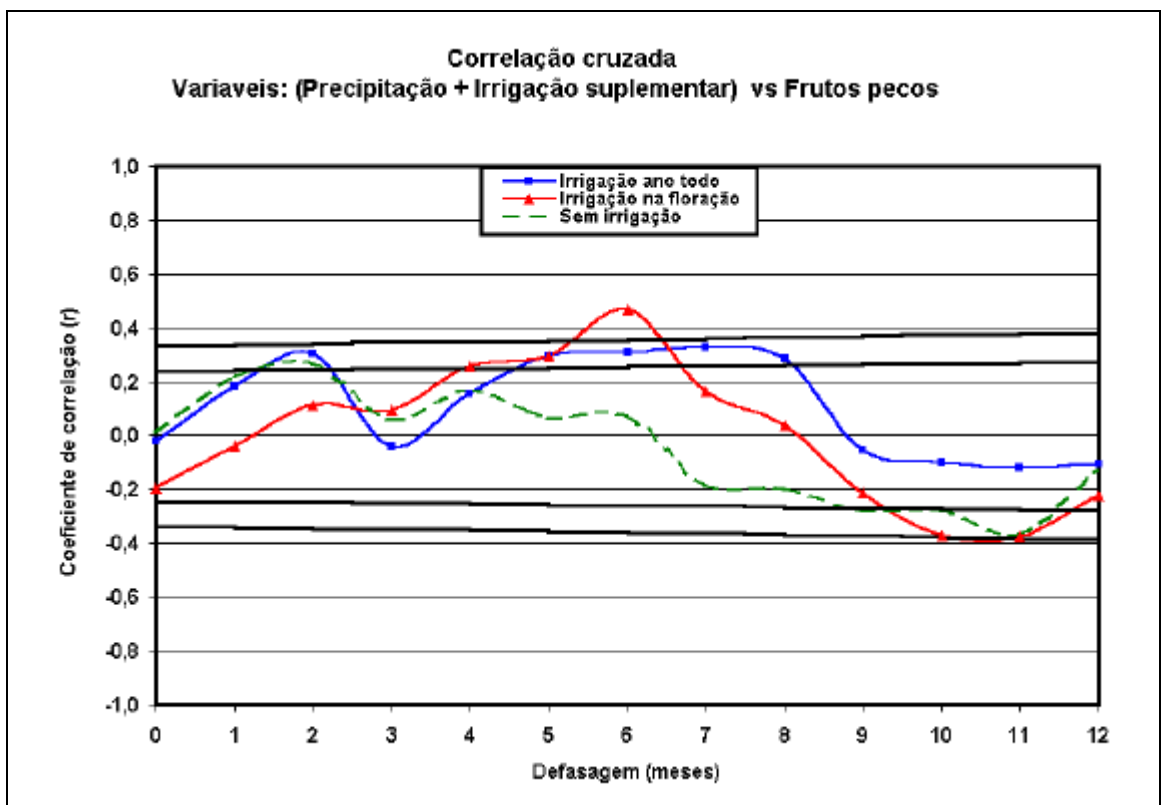


Figura 4.64. Correlação cruzada entre a variável (precipitação + irrigação suplementar) e a variável fenológica frutos pecos dos 3 tratamentos.

No que tange à variável lançamento foliar (Figura 4.17), percebe-se que a temperatura máxima não induz a correlações cruzadas significativas – embora ao contrapor os tratamentos irrigados, percebe-se uma tênue tendência de comportamento cíclico – exceto uma ligeira tendência na defasagem 12 meses (+0,29*).

Os efeitos das irrigações suplementares, entretanto, são notórios, em intensidade e defasagem temporal. Percebe-se da Figura 4.17, que nos tratamentos irrigados a temperatura máxima e lançamento foliar estão negativamente correlacionadas com três (tratamento 2) a quatro (tratamento 3) meses de defasagem; e positivamente correlacionadas a nove meses de defasagem, independentemente da estratégia de irrigação, entre as adotadas, ressalte-se. É possível conjecturar, também, que quanto mais equilibrada a disponibilidade de água à cultura, mais evidente é o efeito, pelo menos aparente, do acoplamento das séries da temperatura máxima e do lançamento foliar.

Com relação à correlação cruzada entre a frutificação, variável fenológica frutos novos (Figura 4.18), e a temperatura máxima o comportamento segue muito proximamente o padrão encontrado para a queda de flores, indicativo da floração. As dissimilaridades entre as duas comparações mencionadas neste parágrafo é que enquanto para a queda de flores a correlação com a temperatura máxima apresenta coeficientes bastante significativos quando a comparação é feita sem defasagem temporal, no caso dos frutos novos a correlação cai, mantendo a significância a 99% apenas para o tratamento 2. Nos demais a significância estatística situa-se ao redor de 95%. Nas defasagens intermediárias, enquanto no caso da queda de flores as correlações negativas atingem seu valor mínimo com seis meses de defasagem, para o tratamento não irrigado, e de sete a oito meses, para os tratamentos irrigados; quando se trata da frutificação, a tendência é não haver interferência da água suplementar, pois todos os três tratamentos seguem o mesmo comportamento, apresentando valores de correlação cruzada mínima na defasagem seis meses.

Relativamente aos frutos pecos, Figura (4.19), o tratamento testemunha registra valores de correlação cruzada significativos a 95% na defasagem de sete meses e significância de 99% na defasagem de 12 meses. Entretanto, a aplicação de água tende a reforçar a correlação entre os frutos pecos e a temperatura máxima, estabelecendo um padrão de correlação positiva significativa crescente desde a defasagem dois até quatro meses após o evento meteorológico com pico positivo aos três meses. A Figura 4.19, também mostra entre oito e nove meses de defasagem quanto mais homogênea é a distribuição de água, tanto menor a correlação com os pecos fisiológicos, observado pelos picos negativos de correlação cruzada.

As Figuras 4.20 a 4.24 mostram as correlações entre a variável meteorológica temperatura mínima e as variáveis fenológicas.

Comparando-se as séries temporais da temperatura mínima com a variável fenológica queda de flores (Figura 4.20), são observados, aproximadamente, os mesmos comportamentos relatados sobre a temperatura máxima. Este não é um fato a estranhar tendo em vista que as temperaturas máxima e mínimas apresentam a mesma periodicidade. Entretanto, é perceptível a majoração das correlações com defasagem, neste caso, em torno de sete meses para o tratamento sem irrigação, altamente significativos – diferente dos efeitos aparentes da temperatura máxima sobre este mesmo tratamento, cuja defasagem temporal sugere seis meses e menor correlação cruzada – e de oito a nove meses, para os tratamentos com irrigação. Nota-se, também, que as estratégias de irrigações adotadas fortaleceram as correlações de curto prazo, um e dois meses após o evento meteorológico, temperaturas mínimas.

Avaliando a variável queda de folhas (Figura 4.21), nota-se grande similaridade com o comportamento aparente descrito para a temperatura máxima. Aparentemente, no entanto, os efeitos da temperatura mínima de curto prazo, embora significativos estatisticamente, não se revelam tão pronunciados como os da temperatura máxima. Os efeitos aparentes da temperatura mínima, com defasagem semestral, por seu turno, apresentaram-se mais evidentes que os da temperatura máxima.

Em similaridade com a variável queda de folhas, o lançamento foliar, contraposto à temperatura mínima (Figura 4.22), apresenta comportamento semelhante com a temperatura máxima, com retardamento de aproximadamente um mês nos efeitos.

Quanto à comparação entre as séries de temperatura mínima e frutos novos, a tendência é a mesma que para a comparação com a queda de flores, com a diferença que para

a frutificação, os valores de correlação cruzada tendem a fortalecer a correlação, seja positiva ou negativamente.

As relações entre os pecos fisiológicos e as temperaturas mínimas, a Figura 4.24 revela que a irrigação suplementar tende a retardar o acoplamento entre as curvas, em aproximadamente dois meses. O padrão observado, para o tratamento sem irrigação é correlação positiva e significativa (+0,35**) um mês após o evento meteorológico e pico de correlação negativa com sete a oito meses de defasagem (-0,36** e -0,41**, respectivamente). Com a irrigação, qualquer que seja a estratégia, dentre as adotadas, as correlações positivas estabeleceram-se em uma de três meses (+0,36** e +0,43**, respectivamente para os tratamentos 1 e 2) e o pico negativo entre nove (-0,41** e -0,38**, para os tratamentos 1 e 2) e dez meses (-0,40** e -0,35*, para os tratamentos 1 e 2).

As Figuras 4.25 a 4.29, mostram as correlações entre a variável meteorológica temperatura média e as variáveis fenológicas.

Sobre as coincidências do ciclo da temperatura média e da queda de flores (Figura 4.25), é obvio, que as observações seriam as mesmas que as relatadas sobre as temperaturas máxima e mínima, caso estas duas últimas revelassem o mesmo padrão, como é, aproximadamente o caso. Entretanto, para a temperatura média, embora o comportamento geral seja aproximadamente o mesmo que para a temperatura mínima, as ordens de grandezas das correlações, positivas e negativas, mais notórias aparentam ser menos vigorosas.

Digno de nota, é que a queda de flores correlaciona-se tanto positiva como negativamente com ordens de grandeza decrescentes para as temperaturas mínima, máxima e média (Figuras 4.20, 4.15 e 4.25).

Sobre a queda de folhas (Figura 4.26), os efeitos da temperatura média, parecem ser intermediários, comparando-os com as temperaturas máxima e mínima.

Os efeitos aparentes da temperatura média sobre o lançamento foliar (Figura 4.27) apresenta-se bastante similar ao da temperatura mínima.

O fortalecimento verificado na comparação entre as correlações cruzadas das séries de temperatura mínima e frutificação e das séries temperatura mínima e queda de flores, também são visíveis quando essas séries fenológicas são comparadas com a temperatura média (Figura 4.28). Entretanto, aparece aqui uma similaridade com a série das temperaturas máximas, qual seja a de antecipar em aproximadamente um mês, no caso dos tratamentos com irrigação, os valores extremos da correlação cruzada.

Avaliando as correlações entre os frutos pecos (Figura 4.29) e as temperaturas médias observa-se um comportamento muito similar ao da temperatura mínima.

Fazendo um balanço das correlações cruzadas entre as temperaturas e as variáveis fenológicas, pode-se concluir que a temperatura média, grosseiramente, segue os mesmos padrões da temperatura mínima, com alguma influência da máxima. Para futuros trabalhos com estudos da fenologia no tempo, é recomendável, embora seja mais trabalhoso estudar-se as séries fenológicas contra as temperaturas máxima e mínima, tendo em vista que com estas variáveis meteorológicas, as fenológicas mostram correlações mais vigorosas, tanto positiva quanto negativamente.

É de mencionar também que as defasagens temporais detectadas de seis meses da temperatura em relação à frutificação concorda com o relato de ALVIM (1975), referindo-se a reflexos negativos na produção quando a temperaturas médias mensais caem a valores abaixo de 22°C.

As Figuras 4.30 a 4.34, mostram as correlações entre a variável meteorológica umidade relativa e as variáveis fenológicas.

Levando-se em conta o critério estatístico da significância, pelo menos as probabilidades usuais de 95% e 99%, qualquer variável fenológica correlaciona-se negativamente com a umidade relativa.

A variável queda de flores (Figura 4.30), do tratamento testemunha apresenta dois períodos de defasagem temporal significativos, do ponto de vista estatístico. Um de prazo mais curto, até cinco meses, com pico em dois meses (-0,48**). O de mais longo prazo entre sete e 11 meses, com pico em dez a 11 meses (-0,52**). A Figura 4.30 mostra que ambas as estratégias de irrigação utilizadas neste trabalho potencializaram a correlação entre a umidade

relativa e a queda de flores (picos de $-0,66^{**}$ e $-0,60^{**}$, respectivamente para os tratamentos 1 e 2, com defasagem de dois meses). Entretanto, também é possível verificar que, por outro lado, as irrigações suprimiram as correlações de mais longo prazos.

Com relação à queda das folhas (Figura 4.31) percebe-se que as irrigações abrandaram e retardaram a correlação negativa entre as séries no curto prazo, ainda que talvez tenham o aparecimento de uma segunda fase de correlação negativa com respostas próximas um ano após.

Quando irrigada a cultura teve os efeitos negativos da umidade relativa potencializados quanto à variável lançamento foliar (Figura 4.32), no curto prazo, defasagem zero ($-0,37^{**}$, $-0,49^{**}$ e $-0,50^{**}$, respectivamente para os tratamentos 3, 2 e 1.). Em compensação, aparentemente, amenizaram nas correlações futuras esses efeitos.

No que concerne à frutificação (Figura 4.33) os efeitos das irrigações foram provocar um padrão de correlação negativo nas defasagens de um a quatro meses, com pico em dois meses ($-0,47^{**}$, para qualquer estratégia de irrigação adotada neste trabalho).

De modo similar, os frutos pecos (Figura 4.34) tiveram um acréscimo de correlação com as irrigações entre dois e cinco meses de correlação, com pico entre três a quatro meses, dependendo da estratégia de irrigação adotada.

As Figuras 4.35 a 4.39 mostram as correlações entre a variável meteorológica irradiância solar global e as variáveis fenológicas.

A irradiância solar global pode ser interpretada como a quantidade de energia radiante em ondas curtas, disponíveis à fotossíntese. A observação do comportamento dessa variável e os efeitos, ao menos aparentes, na fenologia é interessante em razão da discussão sobre se o cacaueteiro é ou não uma planta de sol ou de sombra. Que a planta não utiliza do potencial de energia luminosa disponível em locais ensolarados, já foi discutido na revisão da literatura, considerando o posicionamento dos estômatos nas folhas. Então, se o cacaueteiro for uma planta de sombra, o excesso de luminosidade teria conseqüências danosas. Se for tolerante à sombra então as conseqüências serão reduzidas.

Avaliando apenas o tratamento sem irrigação na Figura 4.35, para a variável queda de flores nota-se que os maiores coeficientes de correlação são positivos ($+0,47^{**}$) e os menores valores ($-0,36^{**}$). Isto leva a considerar que a importância da irradiância solar global com a queda de flores apresenta três momentos, o primeiro de curto prazo até dois meses, com coeficientes de correlação cruzada positivos ($+0,38^{**}$ e $+0,44^{**}$, respectivamente para um e dois meses de defasagem); o segundo momento de médio prazo – talvez por esgotamento da planta ou caracterizando uma fase de "repouso" da planta conforme sugerem LEITE & VALLE (2000) – a excessiva atividade no primeiro momento exija uma retração da atividade, que parece estar traduzida pelo menor coeficiente de correlação cruzada na defasagem de seis meses. No terceiro momento, 11 ($+0,43^{**}$) a 12 ($+0,47^{**}$) meses após os eventos fenológicos a planta volta à atividade reprodutiva e os efeitos, aparentes ao menos, da radiação tornariam a um máximo positivos. Observando na mesma Figura 4.35 os efeitos das diferentes estratégias de irrigações suplementares percebe-se que estas alongam os ciclos criando apenas dois momentos, o primeiro, mantido em curto prazo, mas dilatado no tempo, passando a um intervalo de tempo de quatro meses de efeitos positivos, entre um e quatro meses após o evento meteorológico, com pico mantido com dois meses de defasagem ($+0,70^{**}$, $0,65^{**}$ e $0,44^{**}$, respectivamente para os tratamentos 1, 2 e 3); e o segundo momento situando agora na defasagem de oito ($-0,41^{**}$ e $-0,36^{*}$, respectivamente para os tratamentos 1 e 2) a nove ($-0,43^{**}$ e $-0,29^{*}$) meses.

O padrão do comportamento da variável queda de folhas (Figura 4.36), praticamente, não altera com a inclusão da irrigação como fator. O que é notável é a redução da correlação entre a queda das folhas e a irradiância solar global, no curto prazo, quando se inclui a irrigação. Isto quer dizer que a inclusão da irrigação reduziria a ação da irradiância solar na queda das folhas.

A irradiância solar, pelo menos do ponto de vista da significância estatística, tem pouca importância na variável lançamento foliar. É o que se depreende da Figura 4.37, quando se avalia apenas o tratamento não irrigado. Entretanto, nos tratamentos irrigados percebe-se um progressivo incremento de importância. Quando irrigada a cultura do cacaueteiro, as defasagens com coeficientes de correlação cruzada mais notáveis são zero ($+0,46^{**}$ e $+0,39^{**}$, respectivamente para os tratamentos 1 e 2); quatro ($-0,35^{*}$) para o tratamento 2; quatro

(-0,41**) e cinco (-0,47**) para o tratamento 1 e as defasagens nove (+0,42** e +0,28*, para os tratamentos 1 e 2) e 11 (+0,42** e +0,31**, também para os tratamentos 1 e 2).

Na Figura 4.38 pode ser visto o aumento da importância da irradiância solar global nos efeitos sobre a frutificação. Aqui a interferência da irrigação é marcante, em especial quando se avalia a estratégia de irrigação. Os efeitos positivos da irradiância solar global no caso do tratamento 2, quando a irrigação foi processada nas fases de pico da formação da almofada floral e floração, atingem um coeficiente de correlação cruzada de +0,64** para dois e +0,60** para três meses de defasagem entre o evento meteorológico e o efeito fenológico em discussão. Por seu turno, quando a estratégia de irrigação é igual à do tratamento 1, os coeficientes de correlação são um pouco menores (+0,55** e +0,59**, para dois e três meses de defasagem). Entretanto, a irradiância solar apresenta menores coeficientes de correlação cruzada a nove meses de defasagem (-0,54**, -0,41** e -0,33*, respectivamente para os tratamentos 1, 2 e 3). Com um ano de defasagem a irradiância solar global é significativa apenas para o tratamento sem irrigação.

A resposta aparente da formação dos frutos pecos à irradiância solar global pode ser analisada na Figura 4.39. Percebe-se que o padrão comportamental da variável fenológica varia apenas em intensidade, em relação à irradiância solar. No tratamento sem irrigação as correlações excetuada a defasagem de oito meses, é não significativa. Entretanto, nos tratamentos irrigados, a variável irradiância solar global ganha evidência entre três e cinco meses de defasagens, com pico em quatro meses (+0,48** e +0,52**, para os tratamentos 1 e 2, respectivamente).

Do exposto não se pode afirmar, categoricamente, que nas condições em que o experimento foi levado a cabo, a irradiância solar tenha sido um elemento danoso. Pelo menos matematicamente, se por um lado, explica boa parte da queda das folhas, não favoreceu o lançamento foliar, ou seja se não promove as estruturas transformadoras de energia radiante em química, por outro lado, incentiva o florescimento e frutificação, ainda que também, talvez pela competição interna das estruturas da planta por fotossintetizados, possa ser responsabilizada, em parte, pelo surgimento de pecos fisiológicos.

As Figuras 4.40 a 4.44 mostram as correlações entre a variável meteorológica fotoperíodo e as variáveis fenológicas.

A variável fotoperíodo é um elemento astronômico, não meteorológico, que merece destaque. Sendo astronômico foi calculada e não medida ou estimada a partir de outros elementos meteorológicos, não integrando-os, portanto. Já foi demonstrado que tem periodicidade estritamente anual. São muitos os eventos que se correlacionam com essa variável, como por exemplo cio de animais, florescimento de plantas, etc. Considerando que as variáveis fenológicas respondam aos mais diversos elementos ambientais, e neste trabalho discute-se alguns deles, tendo alguns periodicidades variadas, se é que as possuem, então a correlação das variáveis fenológicas com uma variável astronômica é de grande valia para interpretar se os elementos discutidos anteriormente têm de fato validade, visto que na ordem de precedência os eventos astronômicos antecedem aos meteorológicos.

A Figura 4.40 mostra a correlação cruzada entre o fotoperíodo e a queda de flores, ou a floração. Pode-se perceber que na defasagem zero, a influência do fotoperíodo sobre a floração aproxima-se de zero, ou seja, perde a importância quando o sistema é irrigado. Entretanto, à medida que o fotoperíodo cresce, ou seja a duração do período diurno aumenta, ou do noturno diminui, a queda de flores diminui, ou seja, a floração se reduz. Ao contrário, quando o fotoperíodo diminui, ou seja, o período noturno tem duração maior, a floração ou a queda de flores aumenta. Isto quer dizer que a floração do cacaueteiro é fotossensível, o que não é surpresa tendo em vista ser uma planta de origem equatorial e este experimento ter sido conduzido quase no limite tropical. O mesmo pode ser observado no tratamento não irrigado. O que varia é defasagem de tempo entre o evento astronômico e a resposta fenológica. Esta resposta se aproxima temporalmente do momento do evento, ou seja a resposta fenológica é percebida com um intervalo de tempo menor, se o suprimento de água for adequado. Entretanto, também pode ser percebido que a intensidade da resposta da variável fenológica floração ao evento astronômico não varia consideravelmente de intensidade.

No tratamento sem irrigação na defasagem zero a correlação cruzada entre fotoperíodo e queda de flores é significativo (+0,34**). Defasado entre quatro e cinco meses a correlação assume seu valor mínimo (-0,39**), voltando a subir até o valor máximo entre 10 e 12 meses após o evento, com pico em 11 meses (+0,50**).

Nos tratamentos irrigados, e em ambos a irrigação ocorreu na fase de floração, na defasagem zero, a correlação entre fotoperíodo e queda de flores é quase nula, inclusive numericamente, assume valores mínimos entre dois e quatro meses após o evento astronômico, com pico negativo três meses após ($-0,48^{**}$ e $-0,52^{**}$, respectivamente para os tratamentos 1 e 2). Note-se que a interferência do fotoperíodo é maior no tratamento 2. Voltando a se elevar, atinge correlação positiva máxima entre oito ($+0,46^{**}$ e $+0,55^{**}$, para os tratamentos 1 e 2) e nove ($+0,49^{**}$ e $0,55^{**}$, para os mesmos tratamentos) meses após o evento astronômico.

Assim, pode-se inferir que um fator que significativamente induz a floração é a oscilação do fotoperíodo, entretanto, a intensidade da floração é regido por outros fatores.

Genericamente, a Figura 4.41 mostra a resposta da variável queda de folhas ao fotoperíodo obedece ao mesmo padrão da queda de flores. A irrigação, neste caso, não altera a resposta temporal da variável queda de folhas ao fotoperíodo, embora modifique a intensidade com que o fotoperíodo atua na queda de folhas, reduzindo-o, muito embora, não o ponto de torna-la não significativa, estatisticamente.

A Figura 4.42 mostra a ação do fotoperíodo no lançamento foliar. Essa ação, de modo genérico, é inversa à mostrada nos dois casos precedentes. Ou seja, quando há irrigação suplementar, ou seja disponibilidade de água, a correlação cruzada entre o lançamento foliar e o fotoperíodo é significativo ($+0,47^{**}$ e $+0,41^{**}$, para os tratamentos 1 e 2 contra $+0,19_{ns}$, para o tratamento testemunha). Quando não há irrigação suplementar os efeitos do fotoperíodo apresenta periodicidade mas com significância estatística menor que os 95% utilizados como menor probabilidade, neste trabalho. Em todos os tratamentos essa ação se prolonga por mais dois meses, caindo a partir daí até atingir o menor valor de correlação cruzada sete meses após o evento astronômico ($-0,47^{**}$ e $-0,43^{**}$, para os tratamentos 1 e 2 e $-0,18_{ns}$, para o tratamento não irrigado).

A correlação entre a frutificação e o fotoperíodo encontra-se sumarizada na Figura 4.43. O padrão de comportamento assemelha-se ao descrito na relação entre as variáveis fotoperíodo e queda de flores. Na defasagem zero, os tratamentos com irrigação apresentam correlação cruzada praticamente nula, numericamente, com a série do fotoperíodo. O coeficiente de correlação cai atingindo os valores mínimos, para os tratamentos com irrigação, entre as defasagens dois e três meses ($-0,33^*$ e $-0,45^{**}$, para os tratamentos 1 e 2, em ambos os casos), enquanto no tratamento sem irrigação o valor mínimo ocorre entre dois ($-0,36^{**}$) e três ($-0,37^{**}$) meses. A partir daí a correlação volta a crescer atingindo o valor máximo, para os tratamentos com irrigação entre as defasagens oito ($+0,38^{**}$ e $+0,48^{**}$, para os tratamentos 1 e 2) e nove ($-0,38^{**}$ e $-0,50^{**}$, para os tratamentos 1 e 2) meses, enquanto para o tratamento sem irrigação os valores máximos são atingidos entre nove ($+0,40^{**}$) e dez ($+0,43^{**}$) meses. Dessa descrição percebe-se que os tratamentos com irrigação promovem uma antecipação em, aproximadamente, um mês a frutificação, após o evento astronômico, em relação ao tratamento testemunha.

O comportamento da correlação cruzada entre as séries do fotoperíodo e a dos frutos pecos (Figura 4.43) seguem a mesma tendência da frutificação, também com uma antecipação da resposta fisiológica em relação ao ciclo astronômico. A diferença é a defasagem temporal que no caso dos pecos fisiológicos adiantam-se em cerca de um mês às respostas da frutificação. A defasagem temporal entre os tratamentos com irrigação e o testemunha, passa a, aproximadamente, dois meses.

Uma observação interessante que se pode fazer nessas figuras relacionando o fotoperíodo é que as curvas de correlação cruzada entre os dados fenológicos e a variável astronômica são muito suaves.

As Figuras 4.45 a 4.49 mostram as correlações entre a variável meteorológica insolação e as variáveis fenológicas. O que se percebe dessas curvas relacionando a insolação – ou número de horas diárias média de brilho solar, ou seja, o período médio da duração astronômica do dia (fotoperíodo) em que ocorre a irradiância solar direta – é que embora apresentem fortes similaridades entre si, por vezes significativos estatisticamente, avaliando uma variável fenológica por vez, aparentemente não apresentam um padrão cíclico definido, pelo menos com períodos até 12 meses.

As Figuras 4.50 a 4.54 mostram as correlações entre a variável meteorológica velocidade média do vento a dois metros de altura e as variáveis fenológicas.

Ao avaliar-se conjuntamente as Figuras 4.50 a 4.54, nota-se que o padrão de comportamento das correlações cruzadas entre as variáveis fenológicas e a velocidade média do vento, nota-se que as curvas apresentam apenas uma aparente irregularidade, porque em todas os picos de correlação concentram-se ao redor de seis meses e, aproximadamente dez a 11 meses de defasagens.

Para a variável queda de flores (Figura 4.50) a correlação com o vento é praticamente nula, do ponto de vista da significância estatística. Para o tratamento 2 a correlação mais evidente situa-se ao redor de seis meses, ainda que do ponto de vista da significância a correlação do tratamento 2 apenas ligeiramente maior que a do 1, enquanto que para o tratamento 1, ao redor de 10 meses de defasagem.

Quando a variável fenológica estudada é a queda de folhas (Figura 4.51), então nota-se que a irrigação atenua os efeitos da correlação com o vento. Quanto maior o tempo em que a disponibilidade de água é integral, menor a correlação com vento, embora a tendência cíclica mantenha-se presente.

Estudando o lançamento foliar (Figura 4.52), no tratamento sem irrigação, a correlação, positiva, entre a velocidade do vento e a variável fenológica é significativa apenas entre 11 a 12 meses de defasagem, entretanto, observando as curvas dos tratamentos com irrigação suplementar, estes também apresentam correlação significativa e positiva entre 11 a 12 meses de defasagem. No entanto, percebe-se outro momento importante, para os tratamentos irrigados, que é a época entre seis e sete meses após o evento meteorológico, quando a tendência é de um significativo coeficiente de correlação negativo.

As curvas para a variável frutificação (Figura 4.53) mostram os mesmos comportamentos que o da queda de flores, com a característica de ser mais notáveis.

A velocidade do vento somente apresenta coeficiente de correlação, positiva e significativa com a variável frutos pecos (Figura 4.54) entre cinco e sete meses, nos tratamentos com irrigação, não importando a estratégia adotada.

As Figuras 4.55 a 4.59, mostram as correlações entre a variável meteorológica evapotranspiração real estimada e as variáveis fenológicas.

A evapotranspiração confrontada com a queda de flores (Figura 4.55) apresenta um padrão de um "s" invertido. Para os tratamentos com irrigação, as defasagens entre um e quatro meses apresentam correlação positiva com pico entre dois e três meses de defasagem, isto é a utilização da água por evapotranspiração induziria a floração com efeitos prolongados por até quatro meses. Por outro lado, no tratamento sem irrigação, o coeficiente negativo indica que altas taxas de evapotranspiração reduzem a floração entre seis e dez meses após, no tratamento sem irrigação, período este reduzido a oito a dez meses após, nos tratamentos com irrigação, sendo mais evidente no tratamento 1, em que há abundância de água durante todo o ciclo.

Com relação à queda de folhas (Figura 4.56), a evapotranspiração do tratamento 1 apresenta correlação positiva e significativa desde a defasagem zero até dois meses após. No tratamento 2 apenas na defasagem 3 meses. Merece destaque, no entanto, as defasagens sete e oito meses, quando não importa qual o tratamento, a correlação cruzada é significativa, negativamente. Finalmente, nos tratamentos com irrigação as correlações voltam a ser positivas e significativas com 12 meses de defasagem.

Para o lançamento foliar (Figura 4.57) o destaque fica por conta do tratamento 1, no qual ocorre alternância de sinal nos valores de correlação e em 2/3 das defasagens a correlação é significativa. Positivo nas defasagens zero, nove a 12 e negativa de quatro a seis meses de defasagens. Interessante notar que os valores absolutos dos coeficientes de correlação cruzada entre essas variáveis, quando significativos, são muito semelhantes, ao redor de $|0,40|^{**}$. Para o tratamento 2, ainda que sem a mesma significância, o comportamento é similar no longo prazo.

A análise da variável frutos novos (Figura 4.58) acompanham os padrões ditados pela queda das flores, exceto pelo fato de que a similaridade entre as três curvas é bastante marcante, indicando que a relação entre a frutificação e a evapotranspiração modifica-se magnitude, com a irrigação, mas não altera o padrão de dependência temporal. Quanto mais disponível a água estiver à cultura ao longo do tempo, maior a correlação na defasagem de três meses.

No que se refere aos frutos pecos (Figura 4.59) os efeitos da evapotranspiração são positivamente dominantes no curto-médio prazos, defasagens de três a cinco meses. Ao contrário, a evapotranspiração tem efeitos negativamente significativos no longo prazo, oito a 11 meses, para o tratamento sem irrigação. Isto parece corroborar a hipótese da competição interna por fotossintetizados pelas estruturas da planta. Assim, quanto maior os esforços fisiológicos da planta maior a relação que esta terá com os pecos fisiológicos.

As Figuras 4.60 a 4.64 mostram as correlações entre a variável meteorológica (precipitação + irrigação suplementar) e as variáveis fenológicas. Comparada com o total de água aplicada à cultura por precipitação e irrigação suplementar com a queda de flores (Figura 4.60) percebe-se que a água parece exercer seus efeitos positivos, do ponto de vista do sinal matemático da correlação cruzada, entre quatro e cinco meses após a aplicação da água, em especial de maneira suplementar. Por outro lado, no tratamento sem irrigação é evidente o padrão de correlação negativa entre sete e dez meses após a precipitação, que se reduz a oito a nove meses, no caso dos tratamentos irrigados.

Os padrões comportamentais da variável queda de folhas quando comparada com a série de aplicação de água, qualquer que seja a fonte (Figura 4.61), mostra um aspecto cíclico positivo entre um e três meses após a aplicação da água e negativo, entre sete e dez meses, mas sem apresentar marcada significância.

O lançamento foliar (Figura 4.62) quando confrontado com a água aplicada, apresenta um comportamento bastante irregular, mas que fornecem algumas informações, como por exemplo, que nos tratamentos com irrigação existe um pico de correlação positiva significativo defasado de um mês da aplicação de água, que nesses mesmos tratamentos ocorre outro pico positivo e significativo defasado de um ano após a aplicação de água.

No caso dos frutos novos (Figura 4.63), a água aplicada parece exercer um efeito positivo marcante cinco meses após a aplicação de água nos tratamentos irrigados. O tratamento 2 é aquele em que ocorre maior oscilação periódica significativa com a aplicação de água.

A quantidade de água aplicada atua sobre o aparecimento dos frutos pecos (Figura 4.64) de maneira altamente significativa apenas no tratamento 2, defasado de seis meses da aplicação de água. No tratamento 1 esse comportamento também ocorre, defasado, no entanto entre cinco e oito meses, embora com significância inferior. No tratamento sem irrigação a maior correlação é negativa, medianamente significativa, com defasagem de 11 meses.

4.1.2.1.2.2. Correlação cruzada entre as séries fenológicas de diferentes tratamentos

Os resultados das correlações cruzadas entre as séries fenológicas comparadas entre os diferentes tratamentos, aos pares, encontram-se sintetizados nas Figuras 4.65 a 4.67.

Ao analisar as correlações cruzadas entre séries fenológicas iguais de tratamentos diferentes temos que a similaridade entre os tratamentos 1 e 2, ambos irrigados, no que se refere à floração somente se dá nos extremos das defasagens adotadas, zero e 11 e 12 meses. Isto leva a crer que ambos os tratamentos apresentam comportamentos similares, embora a estratégia de irrigação seja diferente. A frutificação e os frutos pecos seguem aproximadamente o mesmo padrão. A queda de folhas e lançamento foliar, somente são similares entre os dois tratamentos, na defasagem zero.

Comparando o tratamento 1 com o 3, a queda de flores apresenta a maior similaridade com nove meses de diferença entre as séries. A queda de folhas somente na defasagem zero, indicando independência da irrigação. O lançamento foliar apresenta seus melhores acoplamentos entre as séries com zero e sete meses de defasagem. A frutificação apresentam maiores similaridades a zero e dez meses de defasagem. Os frutos pecos com nove meses.

A comparação do tratamento 2 com o 3 revela melhor acoplamento entre as séries de dados do que entre os tratamentos 1 e 3. Entretanto, esse acoplamentos são significativamente correlacionados na defasagem nula e de oito a 12 meses de defasagem.

Estas observações parecem corroborar as conclusões a que se chegou neste trabalho avaliando os tratamentos pela análise canônica e às conclusões de AUGUSTO (1997).

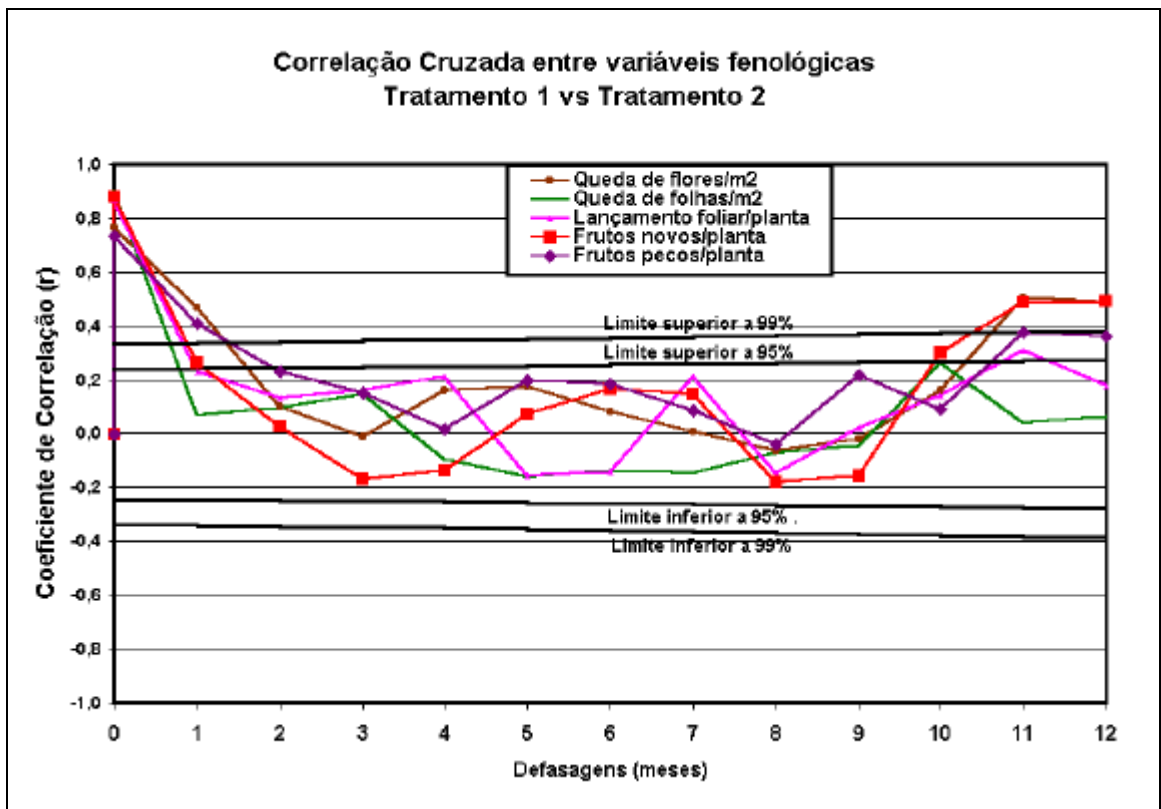


Figura 4.65. Correlações cruzadas comparando séries temporais das variáveis fenológicas tratamentos 1 e 2.

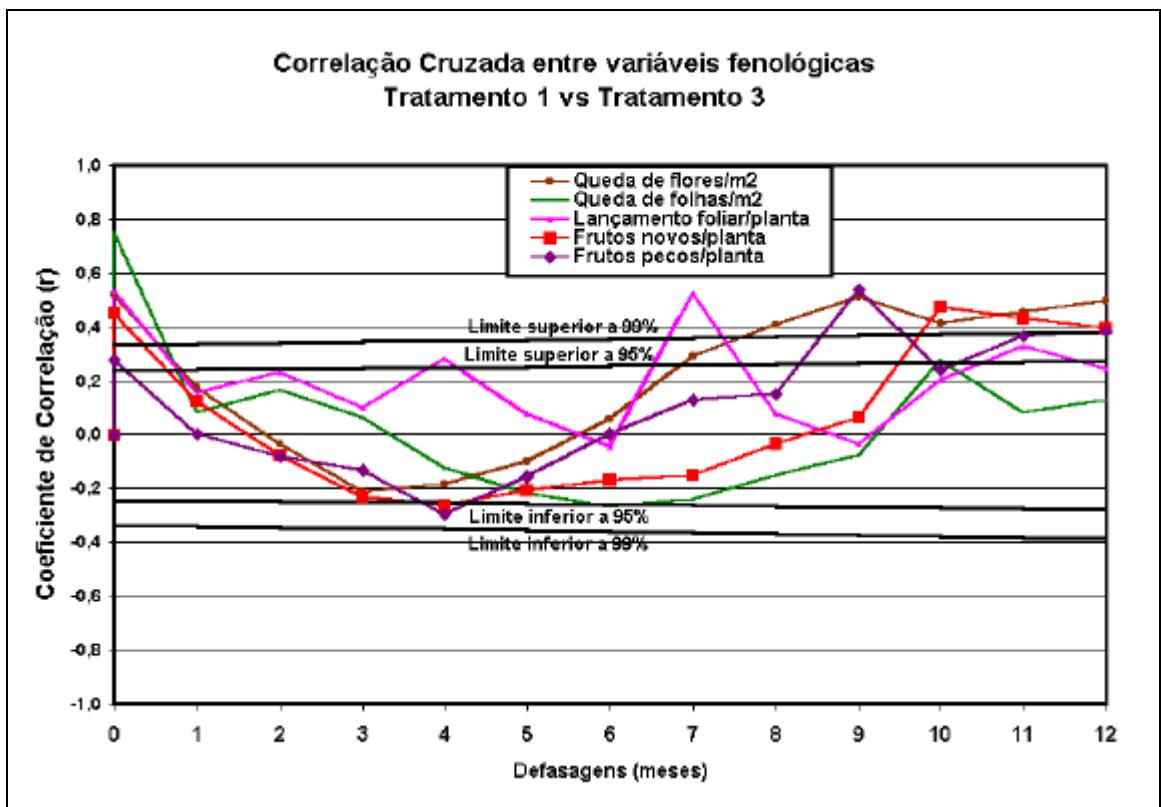


Figura 4.66. Correlações cruzadas comparando séries temporais das variáveis fenológicas tratamentos 1 e 3.

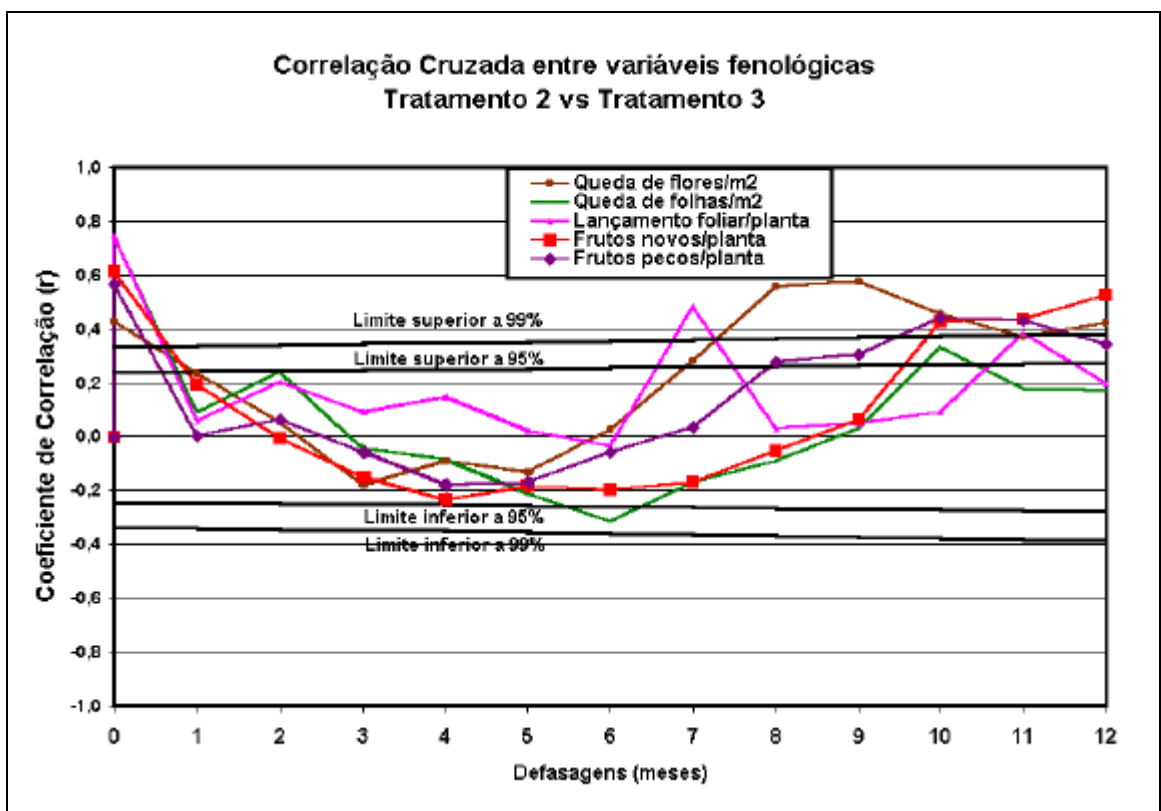


Figura 4.67. Correlações cruzadas comparando séries temporais das variáveis fenológicas tratamentos 2 e 3.

4.1.2.2. Análise espectral

4.1.2.2.1. Análise autoespectral

Os resultados da análise autoespectral, expresso pela estatística poder espectral janelado, das séries temporais encontram-se sintetizados nas Figuras 4.68 a 4.73. A Figura 4.68 representa graficamente os resultados das variáveis meteorológicas coletadas na estação meteorológica. A Figura 4.69. compara os resultados da variável evapotranspiração real estimada para cada tratamento. A Figura 4.70. compara os resultados da variável (precipitação + irrigação suplementar). As Figuras 4.71. a 4.73. comparam os resultados obtidos das variáveis fenológicas para cada tratamento.

Concentrando-se na análise autoespectral da variável fotoperíodo – variável astronômica de periodicidade anual, praticamente perfeita, já que a excentricidade da órbita terrestre é de apenas 0,017 (sendo nula para uma circunferência) – percebe-se que, ao menos para este tipo de dados a análise harmônica revela-se mais eficiente em revelar a periodicidade. Se não veja-se alguns dados da análise harmônica pela variância relativa, percentual em relação à variância total, do harmônico associado a cada período, para o fotoperíodo (24-0,00; 12-99,95; 8-0,00; 6-0,00; 4-0,00). Compare-se agora com os dados dessas mesmas freqüências de periodicidade na análise autoespectral: (24-0,50; 12-0,72; 8-0,46; 4-0,00). Para uma visão geral comparativa entre os resultados das duas análises – que em princípio, neste trabalho têm a mesma aplicação, embora a análise harmônica tenha o tempo como domínio, enquanto na espectral o domínio seja na freqüência de ocorrência dos eventos – observe-se simultaneamente as Figuras 4.3 e 4.68.

Pela Figura 4.68, avaliando simultaneamente as temperaturas máxima, mínima e média, nota-se que o espectro concentra-se primordialmente na periodicidade anual. (12-0,61; 12-0,67 e 12-0,66, respectivamente para as temperaturas máxima, mínima e média). Então, é possível perceber a maior similaridade espectral entre as temperaturas mínima e média do que qualquer uma destas, com a máxima, bem como a menor tendência desta última variável, na concentração espectral na periodicidade anual. Provavelmente, esta seja a razão do comportamento das temperaturas média e mínima, quando confrontadas com as variáveis fenológicas, na análise de correlação cruzada, anterior, serem similares. Também, possivelmente, seja esta a razão da menor correlação das variáveis fenológicas com a temperatura máxima, já que a periodicidade anual desta, ser mais fraca. Haja visto a forte, regular e uniforme correlação cruzada das variáveis fenológicas com o fotoperíodo, variável calculada de periodicidade estritamente anual.

Os resultados da fotoperíodo (12-0,72), irradiância solar global (12-0,58) e insolação (12-0,42), também apresentar periodicidade anual, sendo que a clareza dessa periodicidade, que podem ser aquilatados pelos valores numéricos, é maior no fotoperíodo, obviamente, seguido pela irradiância solar global e finalmente insolação.

A precipitação apresentou periodicidade anual (12-0,31), mas não detectou o segundo pico semestral, revelado pela análise harmônica.

A umidade relativa e a velocidade do vento, por sua vez, confirmando os resultados obtidos na análise harmônica de Fourier, não apresentaram tendência de periodicidade.

Quanto à variável evapotranspiração real (Figura 4.69), pode-se vislumbrar que para o tratamento 1, considerando-se que a estratégia adotada para irrigação tenha atendido plenamente as necessidades de água pela cultura, a periodicidade da evapotranspiração deste tratamento foi anual (12-0,58), seguindo *pari passu* o comportamento da irradiância solar global (12-0,58). Por outro lado o comportamento da variável evapotranspiração real, dos outros dois tratamentos tiveram comportamento mais semelhantes entre si do que, quando confrontados com o tratamento 1.

Quanto à água aplicada, precipitada adicionando-se a irrigação suplementar (Figura 4.70), nota-se que a periodicidade anual é mais evidente na água adicionada ao tratamento 2, até mesmo quando comparada com o 3, no qual a água foi restrita apenas à precipitação atmosférica.

Nas Figuras 4.71 a 4.73 pode-se avaliar as periodicidades de cada variável fenológica associadas a cada um dos três tratamentos.

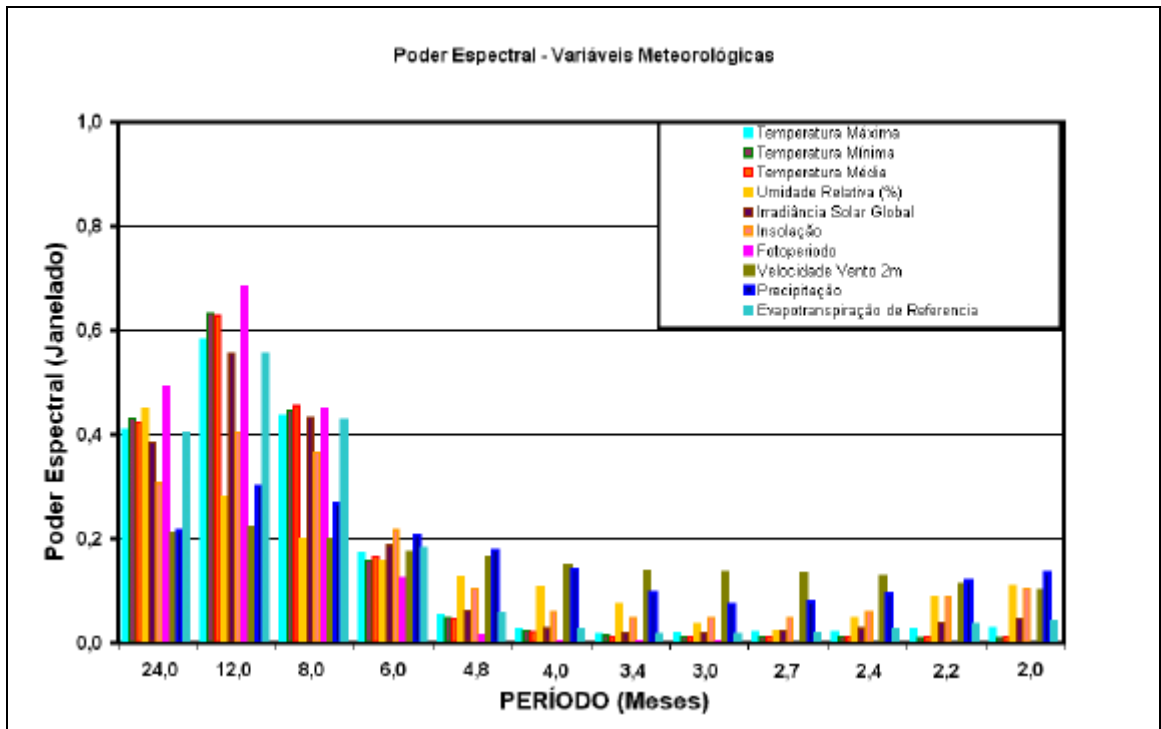


Figura 4.68. Poder espectral janelado das variáveis meteorológicas.

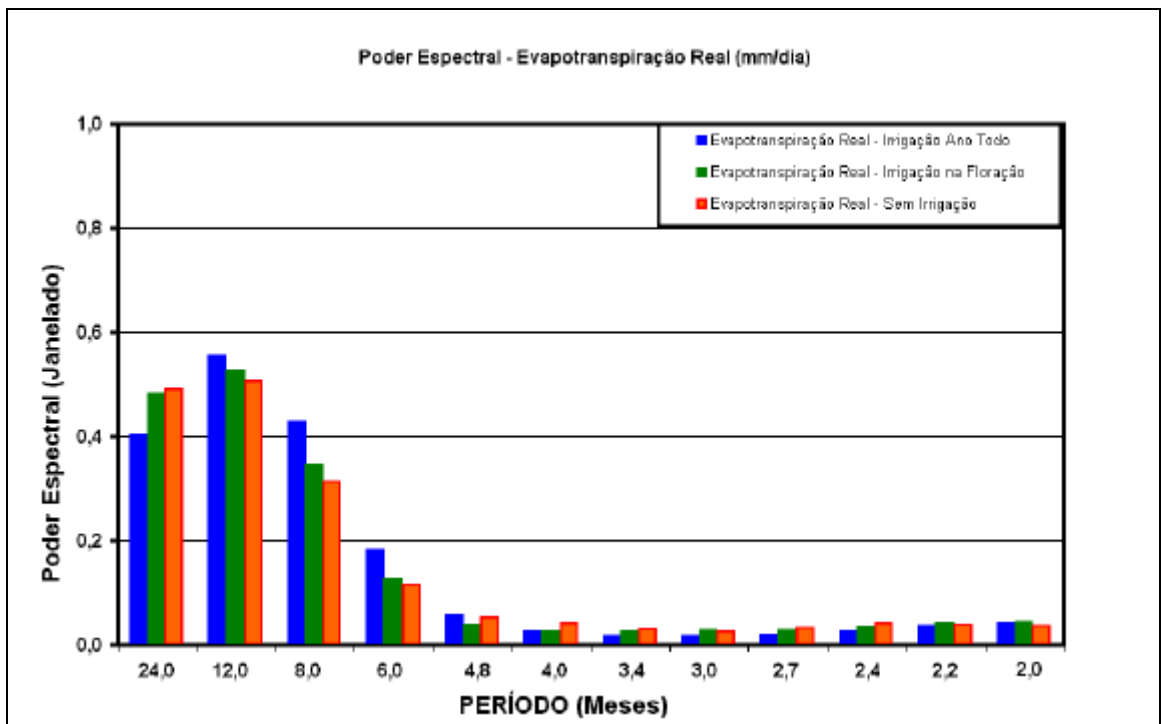


Figura 4.69. Poder espectral janelado da variável evapotranspiração real estimada.

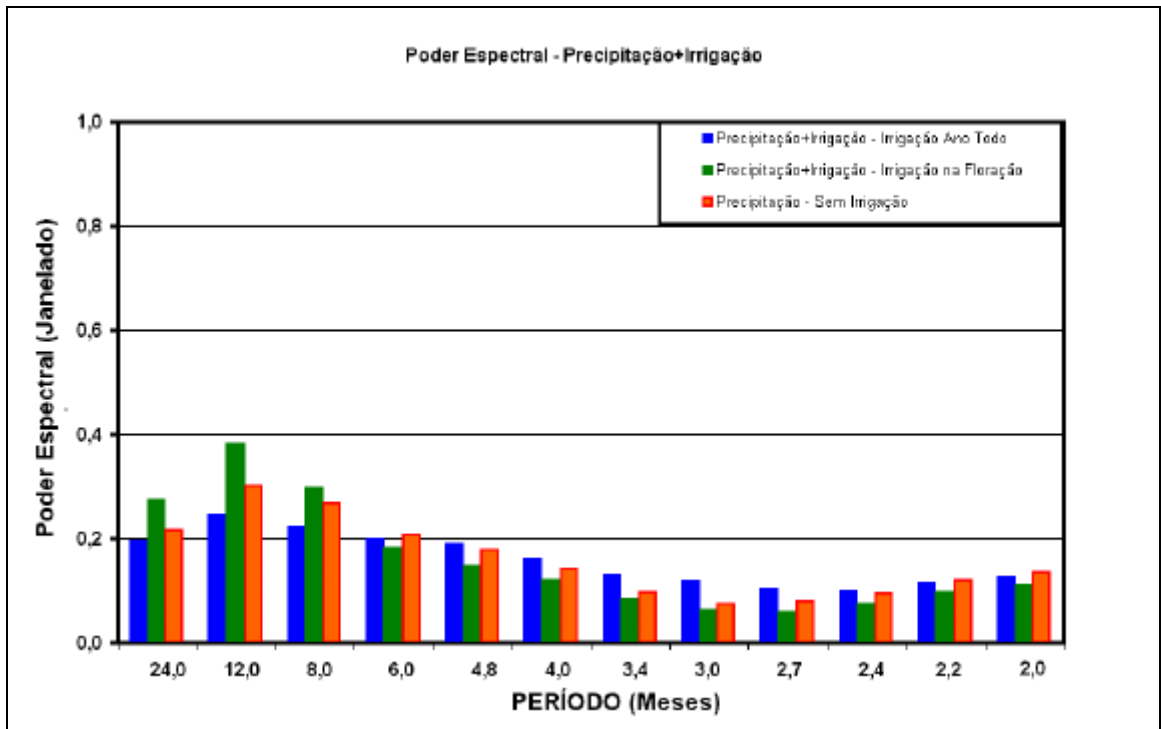


Figura 4.70. Poder espectral janelado da variável (precipitação + irrigações suplementares).

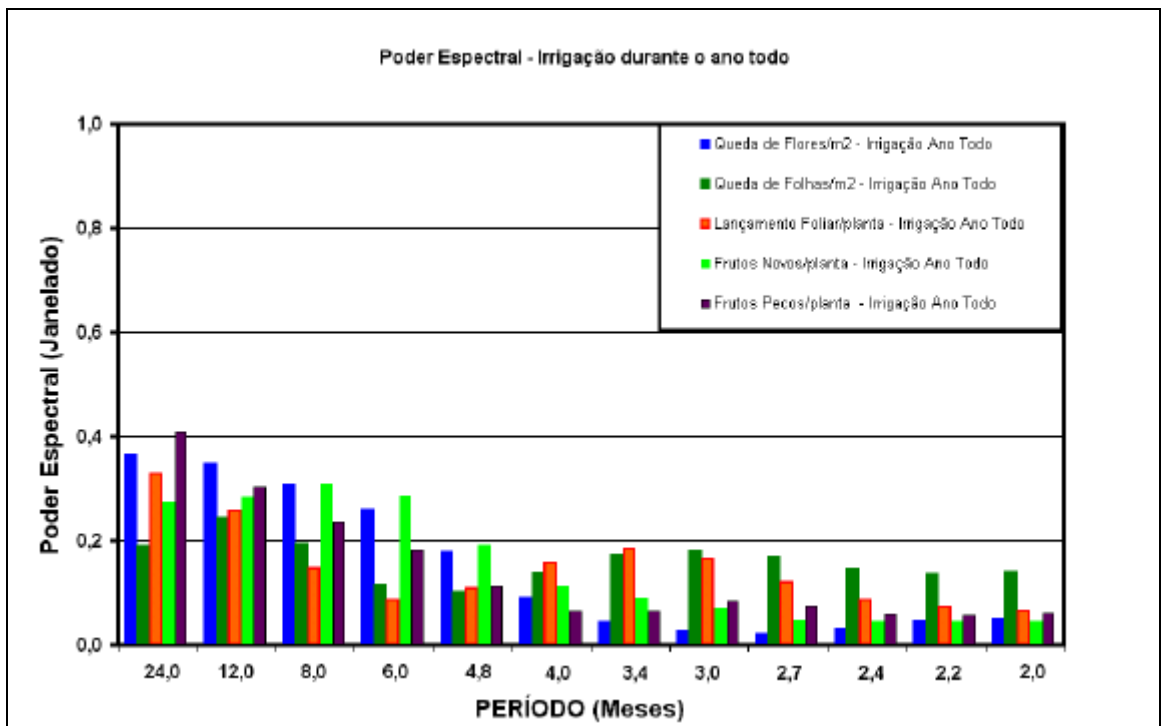


Figura 4.71. Poder espectral janelado das variáveis fenológicas do Tratamento 1.

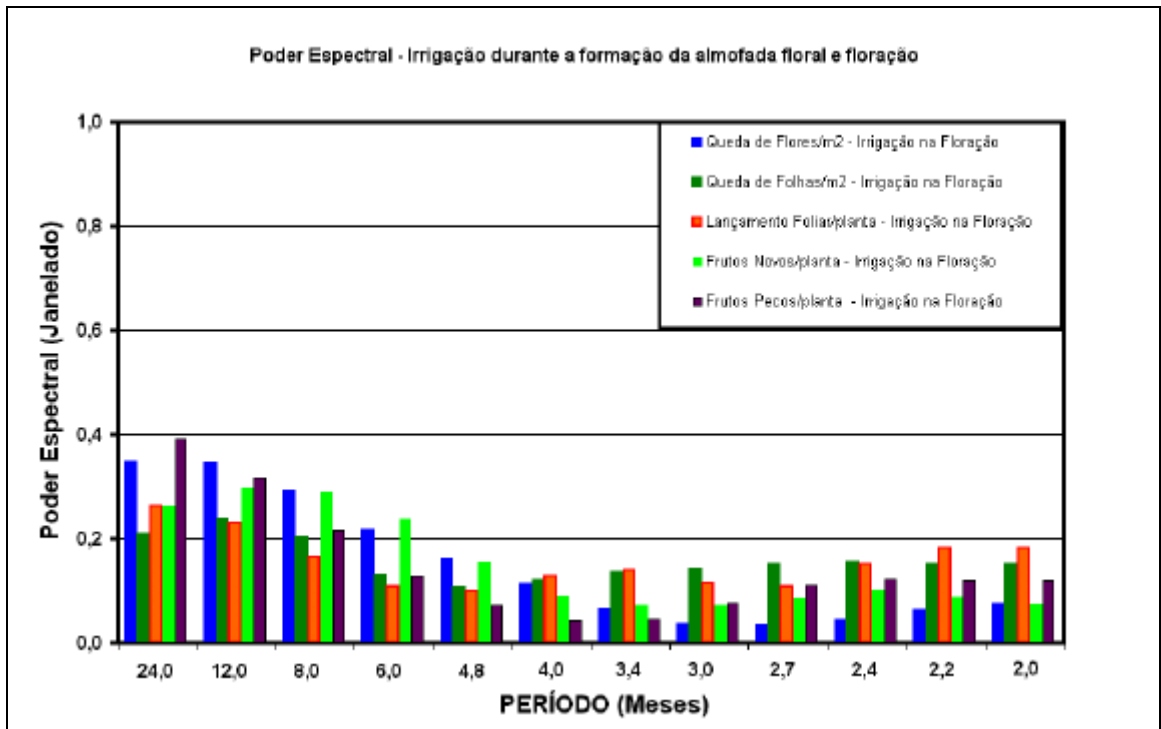


Figura 4.72. Poder espectral janelado das variáveis fenológicas do Tratamento 2.

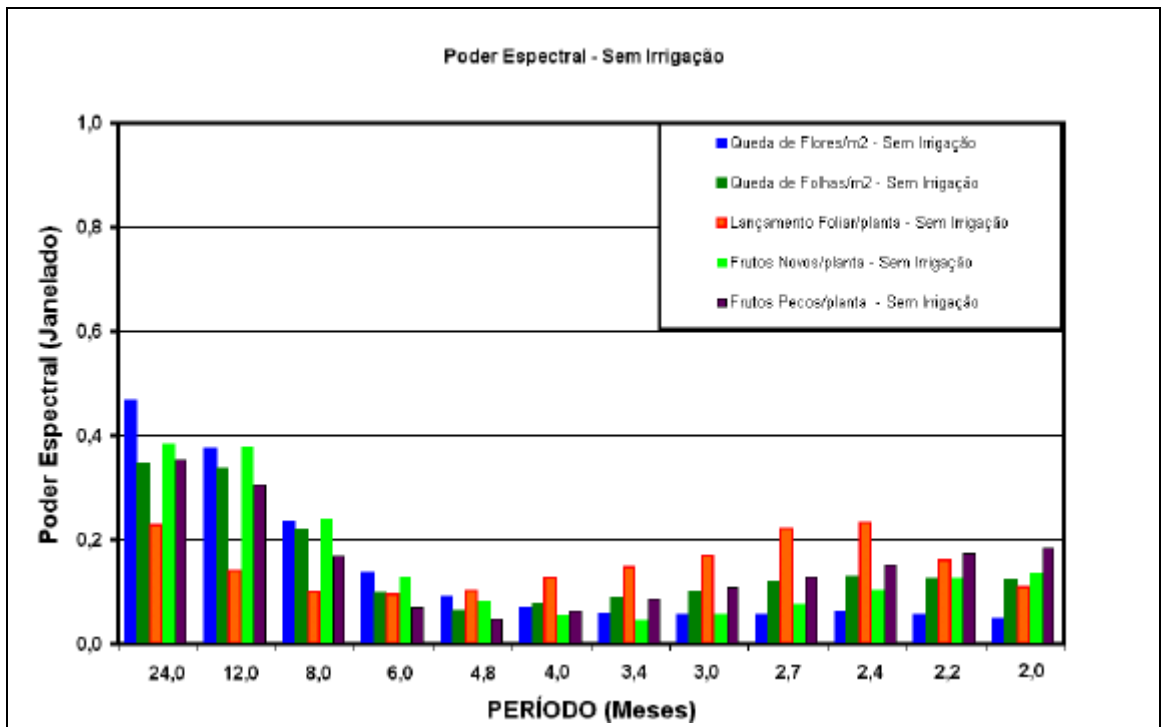


Figura 4.73. Poder espectral janelado das variáveis fenológicas do Tratamento 3.

As análises harmônicas e autoespectrais ao utilizarem os dados das variáveis fenológicas divergiram quanto aos resultados obtidos, talvez em razão das séries de dados não serem suficientemente longas. Avaliando a variável queda de flores, pela análise autoespectral, em todos os tratamentos, a componente periódica anual (12-0,35; 12-0,35; 12-0,38, respectivamente para os tratamentos 1, 2 e 3) e a aleatória (24-0,38; 24-0,35; 24-0,48, também para os tratamentos 1, 2 e 3), praticamente se equivalem. Percebe-se também que essa variável, do tratamento sem irrigação apresenta tendência mais forte de aleatoriedade. Observando as Figuras 4.6 a 4.8, da análise harmônica, ainda que a componente aleatória da variável queda de flores, do tratamento 3 esteja presente, periodicidades anuais e semestrais, se não marcantes, ao menos são evidentes.

Para a queda de folhas, a análise autoespectral, evidencia leve periodicidade anual para os tratamentos 1 e 2, (24-0,19; 12-0,25; 8-0,19; 6-0,11) para o tratamento 1 e (24-0,21; 12-0,24; 8-0,21; 6-0,12) para o tratamento 2. Por sua vez, no tratamento não irrigado, 3, as componentes aleatória (24-0,35) e anual (12-0,35) se mostram equivalentes. Pela análise harmônica, à semelhança da queda de flores, se a periodicidade anual não é marcante, ao menos é evidente, para todos os tratamentos adotados.

Enquanto a análise harmônica revelou, para a variável lançamento foliar, leve periodicidade anual para os tratamentos com irrigação e nenhum pico que mereça destaque no tratamento testemunha, a análise autoespectral caracterizou esta variável em todos os tratamentos, principalmente, como aleatória (24-0,34; 12-0,26) para o tratamento 1, (24-0,27; 12-0,23) para o tratamento 2, (24-0,23; 12-0,14) e para o tratamento 3.

Para os frutos novos, a análise harmônica mostrou periodicidades predominantes semestral para o tratamento 1, semestral e anual para o 2 e de 16 meses para o 3. Por seu turno a análise autoespectral, para essa mesma variável, apontou leve predominância periódica anual e de oito meses para os tratamentos 1 (24-0,28; 12-0,28; 8-0,31; 6-0,29) e 2 (24-0,27; 12-0,30; 8-0,30; 6-0,24) e aleatória e anual para o tratamento 3 (24-0,39; 12-0,39; 8-0,24).

Para os frutos pecos, a análise harmônica mostrou aleatoriedade predominante para o tratamento 1, leve periodicidade anual para o 2 e entre 12 a 16 meses para o 3. Por seu turno a análise autoespectral, para essa mesma variável, apontou para aleatoriedade em todos os tratamentos (24-0,42; 12-0,31; 8-0,24) para o tratamento 1, (24-0,40; 12-0,32; 8-0,22) para o tratamento 2 e (24-0,36; 12-0,1; 8-0,17) para o tratamento 3.

4.1.2.2.2. Análise espectral cruzada

4.1.2.2.2.1. Análise espectral cruzada entre as variáveis meteorológicas e as variáveis fenológicas

Os resultados da análise espectral cruzada, em particular a estatística **coerência**, entre as séries meteorológicas e as séries fenológicas encontram-se sintetizados nas Figuras 4.74 a 4.123. As séries meteorológicas sempre se caracterizaram por séries de entrada e as fenológicas como de saída. Estas figuras apresentam na forma gráfica a estatística coerência, entre as séries meteorológicas e as fenológicas dos três tratamentos simultaneamente. Na discussão a seguir os números entre parênteses, seguirão o modelo (DF-CO), em que, CO os valores numéricos da estatística coerência entre as variáveis avaliadas considerando a defasagem temporal, DF, em meses.

A análise espectral cruzada da temperatura máxima e a queda de flores (Figura 4.74) mostrou a mesma defasagem de dois meses, apontada pela correlação cruzada (Figura 4.15), como aquela em que as frequências dos valores apresentam maior coerência, isto é, aquela em que a "correlação" entre as variáveis consideradas. Entretanto, ao contrário da correlação cruzada, mostrou que se por um lado é nessa defasagem, ou nessa frequência de onda, que as séries mais combinam, (2-0,60; 2-0,73; 2-0,38; para os tratamentos 1, 2 e 3, respectivamente), não mostrou a similaridade entre os tratamentos 1 e 2, apontada pela correlação cruzada. Mostrou uma nova defasagem de melhor coerência aos seis meses apenas para os tratamentos 2 e 3, mas não para o 1, fato que a correlação cruzada apontou. Ambas as

análises sugeriram uma ascensão da associação entre as curvas com 12 meses de defasagem, mas não na mesma intensidade.

Com relação à variável queda de folhas (Figura 4.75) resultou em mostrar que a séries se ajustam, também, com dois meses de defasagem (2-0,57; 2-0,53; 2-0,79, para os tratamentos 1, 2 e 3). Estes resultados não concordam exatamente com a correlação cruzada (Figura 4.16), que foi mais além, mostrando maior detalhamento da inter-relação.

Quanto ao lançamento foliar (Figura 4.75) a análise espectral indicou que essa variável para os tratamentos com irrigação estão bastante correlacionados, e em igual intensidade (2-0,63; 2-0,62, para os tratamentos 1 e 2), com a temperatura máxima na frequência associada a dois meses de defasagem, fato não detectado pela correlação cruzada (Figura 4.17).

Relativamente aos frutos novos a análise espectral (Figuras 4.76) mostrou na defasagem de dois meses comportamento similares aos resultados da correlação cruzada (Figura 4.18), entretanto, as tendências apontadas por esta segunda análise para defasagens maiores ou frequências menores, períodos maiores, portanto, não foram percebidas pela análise espectral.

Quanto aos frutos pecos (Figuras 4.76 e 4.19) ambas as análises apenas sinalizaram para fatos semelhantes na defasagem nove meses e, mesmo assim, apenas para os tratamentos como irrigação.

Considerando a relação entre as séries fenológicas e a temperatura mínima, os resultados da análise espectral cruzada e da correlação cruzada são mais similares. Para a variável queda de flores (Figura 4.77) ambas as análises reconheceram a correlação entre as variáveis na defasagem de dois meses, bem como a análise espectral insinuou a existência de outra frequência em que as séries se relacionam, 10 meses. Entretanto, a análise espectral cruzada não detectou a diferença de fase entre as ondas dos diferentes tratamentos.

Quanto à queda de folhas (Figura 4.78) a análise espectral mostrou correlação entre as séries na frequência correspondente a dois meses de defasagem, para os tratamentos irrigados e três meses para o não irrigado. Pela correlação cruzada (Figura 4.21) não existe essa defasagem entre as ondas dos tratamentos irrigados e não irrigado, bem como ocorre a sete meses de defasagem entre as séries fenológicas e meteorológica outra alta correlação, embora de caráter inverso, ou negativo.

Para a variável lançamento foliar (Figura 4.79) a análise espectral os resultados não apresentaram paralelismo com a correlação cruzada (Figura 4.22), especialmente para os tratamentos com irrigação. Entretanto, para o tratamento sem irrigação a espectral mostrou um sistemático reforço na coerência entre as séries para defasagens progressivamente maiores (2-0,18; 7-0,24; 10-0,33; 11-0,34), fato insinuado pela correlação cruzada, embora de significância estatística sem expressão.

Comparando os resultados obtidos pelas análises de correlação cruzada (Figura 4.23) e espectral cruzada (Figura 4.80), para a variável frutos novos relacionados com a temperatura mínima, pode-se considerar que, eliminando-se a questão das intensidades, retratados pelos valores absolutos, mostrar grande coincidência de tendências. Para ambas as análises as série se correlacionam nas defasagens dois e 10 meses. Pela espectral (2-0,45; 2-0,66; 2-0,26 e 10-0,14; 10-0,38; 10-0,26; para os tratamentos 1, 2 e 3, respectivamente) e pela correlação cruzada (0,49; 0,47 e 0,43, coeficientes correlação cruzada na defasagem dois meses e -0,67; -0,59; -0,44; na defasagem 10 meses, para os tratamentos 1, 2 e 3, respectivamente). Nota-se também que as respostas espectrais do tratamento 2 é a mais intensa de todas, independente da defasagem de importante correlação que se considere, sendo seguida pelo tratamento 1 com dois meses de defasagem e pelo tratamento 3 com 10 meses de defasagem.

O número de frutos pecos (Figura 4.81) também mostraram-se especialmente coerentes com dois e dez meses de defasagem, com as mesmas características de resposta espectral considerada para os frutos novos.

Com relação à temperatura média, o comportamento foi bastante similar ao da temperatura mínima, provavelmente devido à forte concordância espectral entre a temperatura média e a mínima (Figura 4.68).

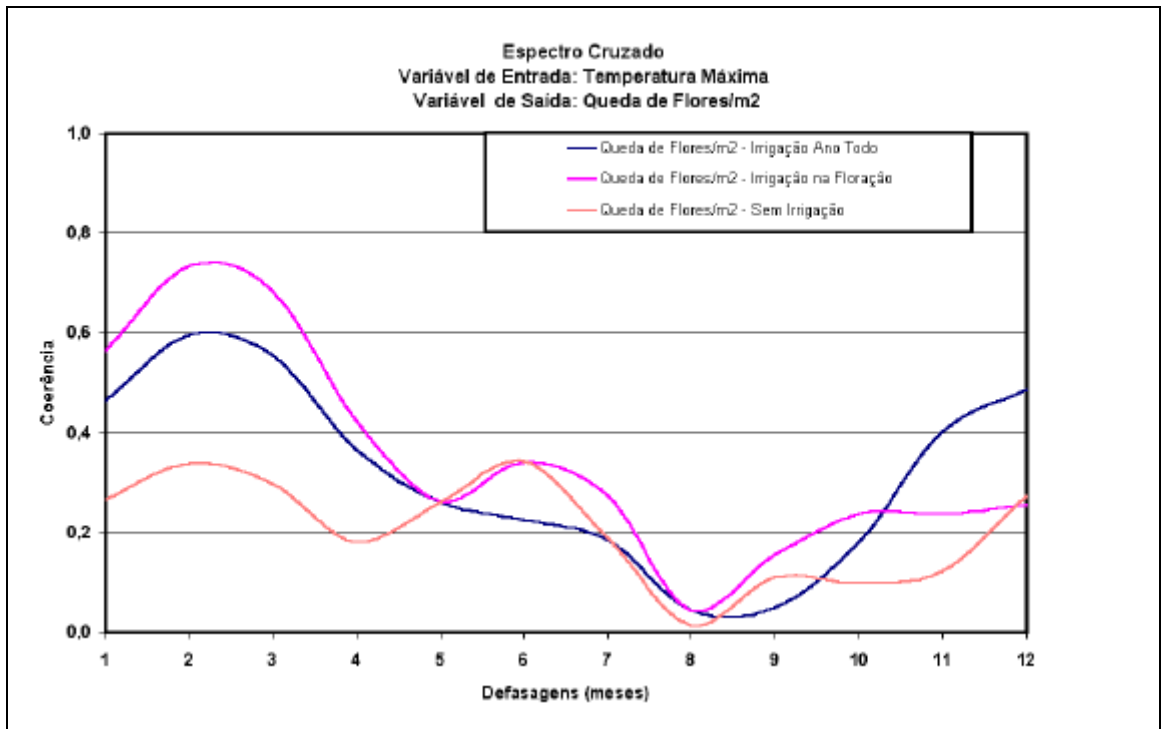


Figura 4.74. Estatística coerência entre a variável Temperatura máxima e a variável fenológica queda de flores.

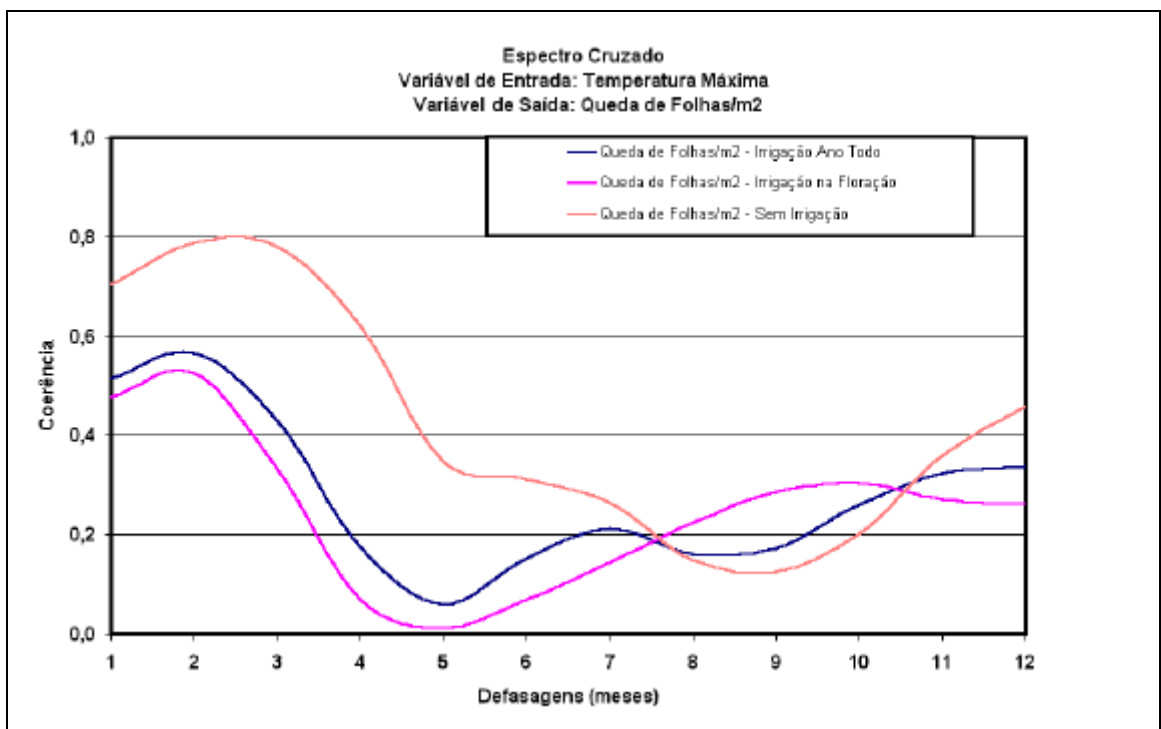


Figura 4.75. Estatística coerência entre a variável Temperatura máxima e a variável fenológica queda de folhas.

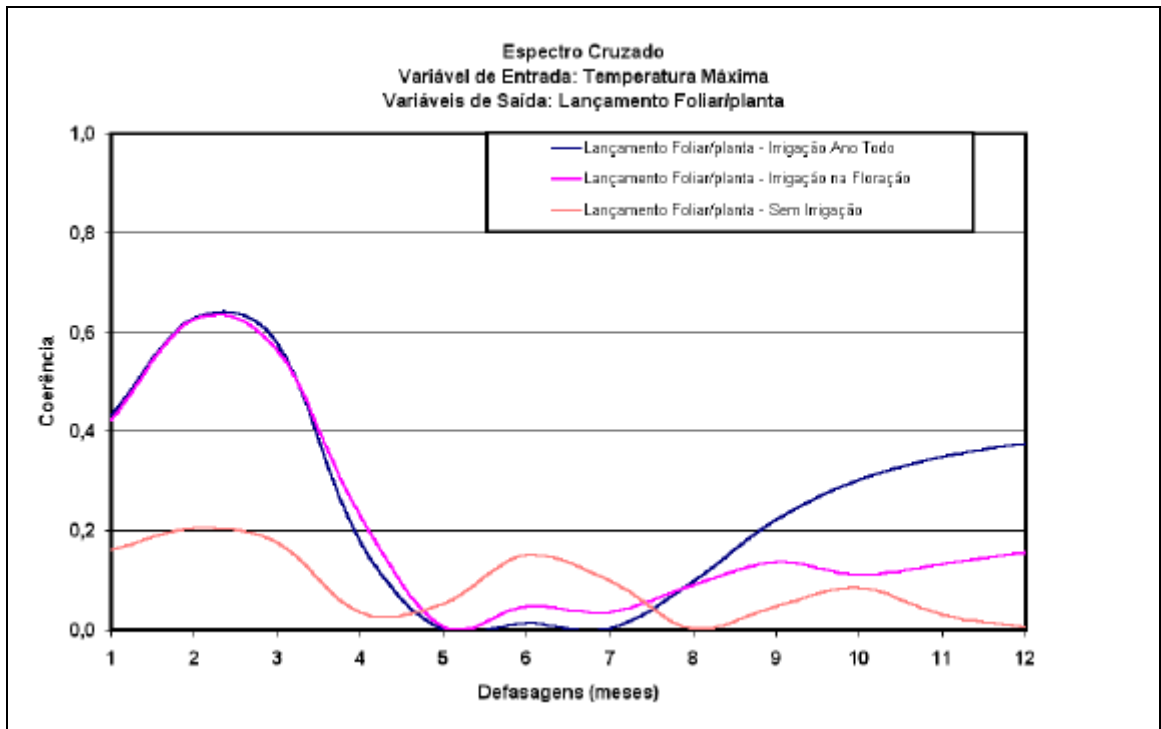


Figura 4.76. Estatística coerência entre a variável Temperatura máxima e a variável fenológica lançamento foliar.

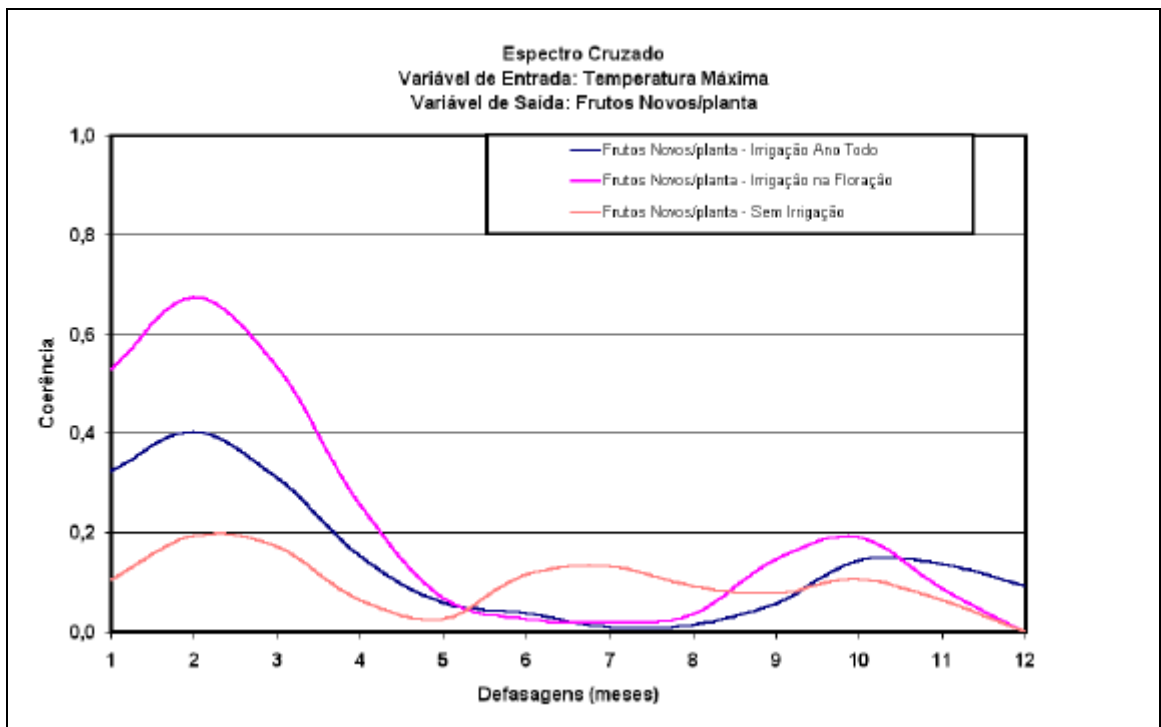


Figura 4.77. Estatística coerência entre a variável Temperatura máxima e a variável fenológica frutos novos.

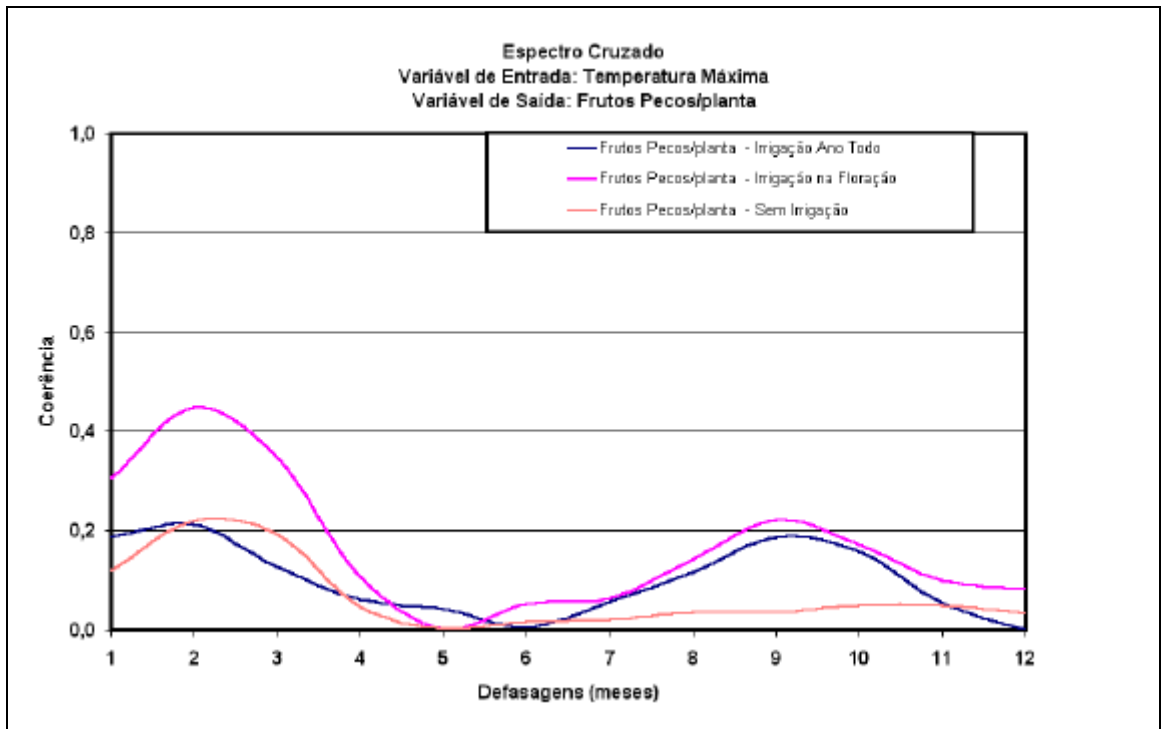


Figura 4.78. Estatística coerência entre a variável Temperatura máxima e a variável fenológica frutos pecos.

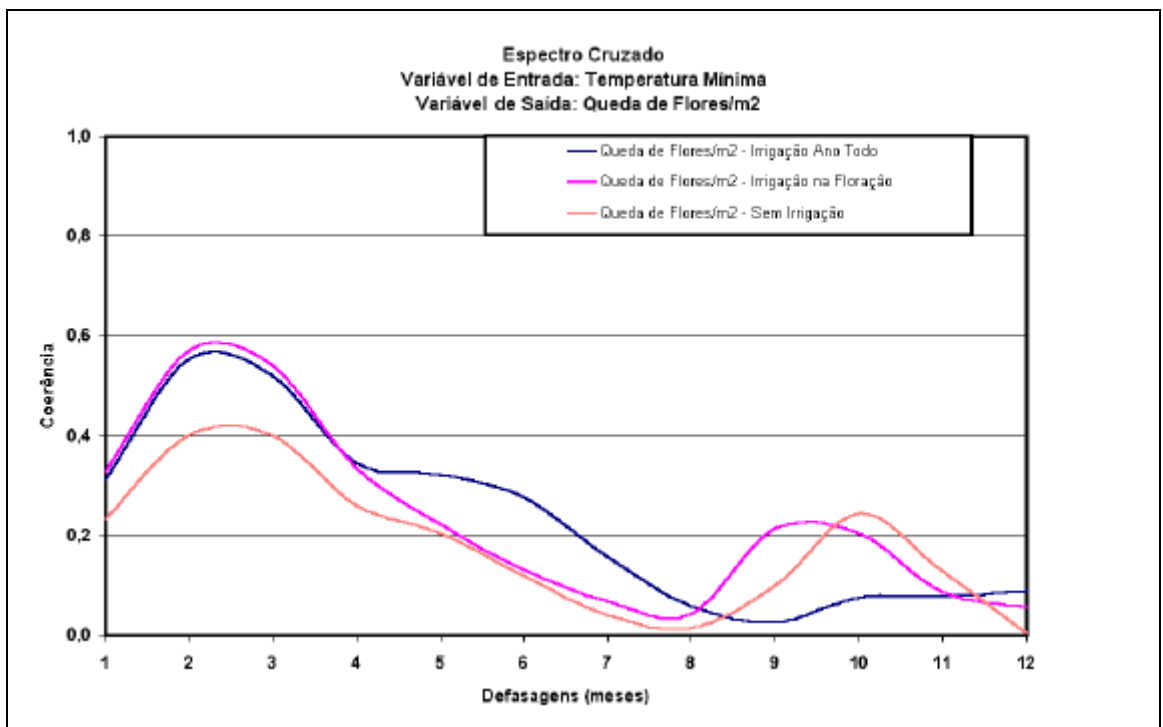


Figura 4.79. Estatística coerência entre a variável temperatura mínima e a variável fenológica queda de flores.

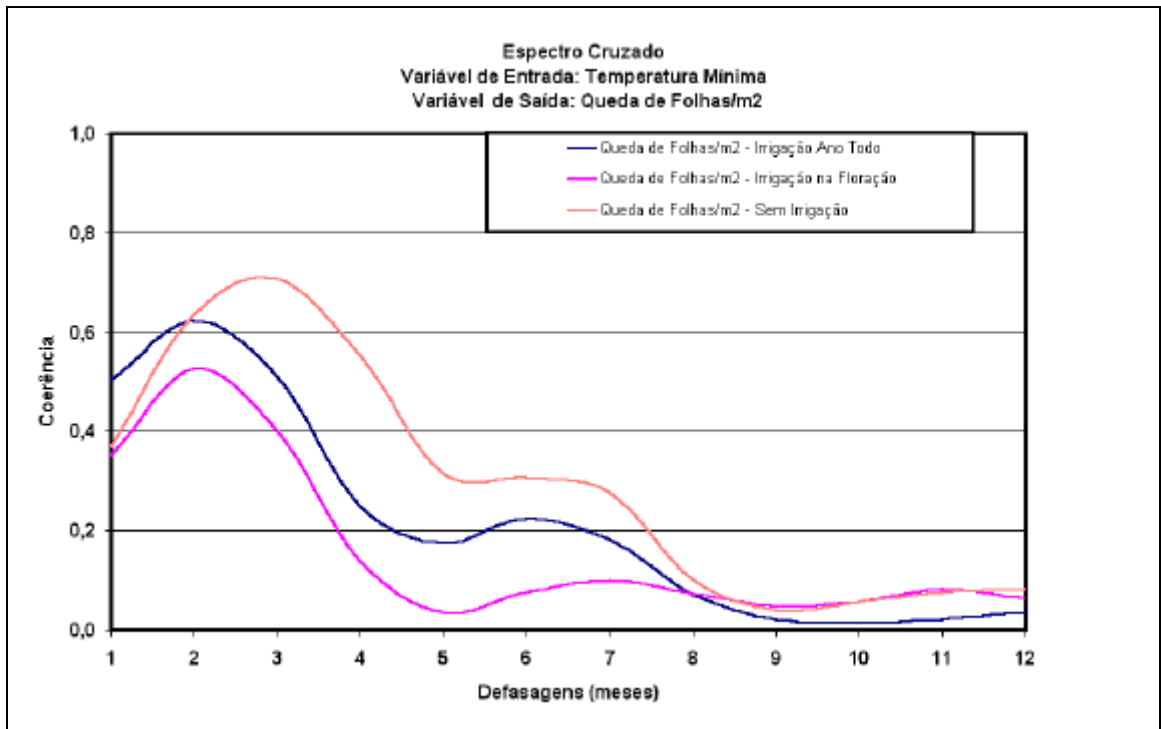


Figura 4.80. Estatística coerência entre a variável temperatura mínima e a variável fenológica queda de folhas.

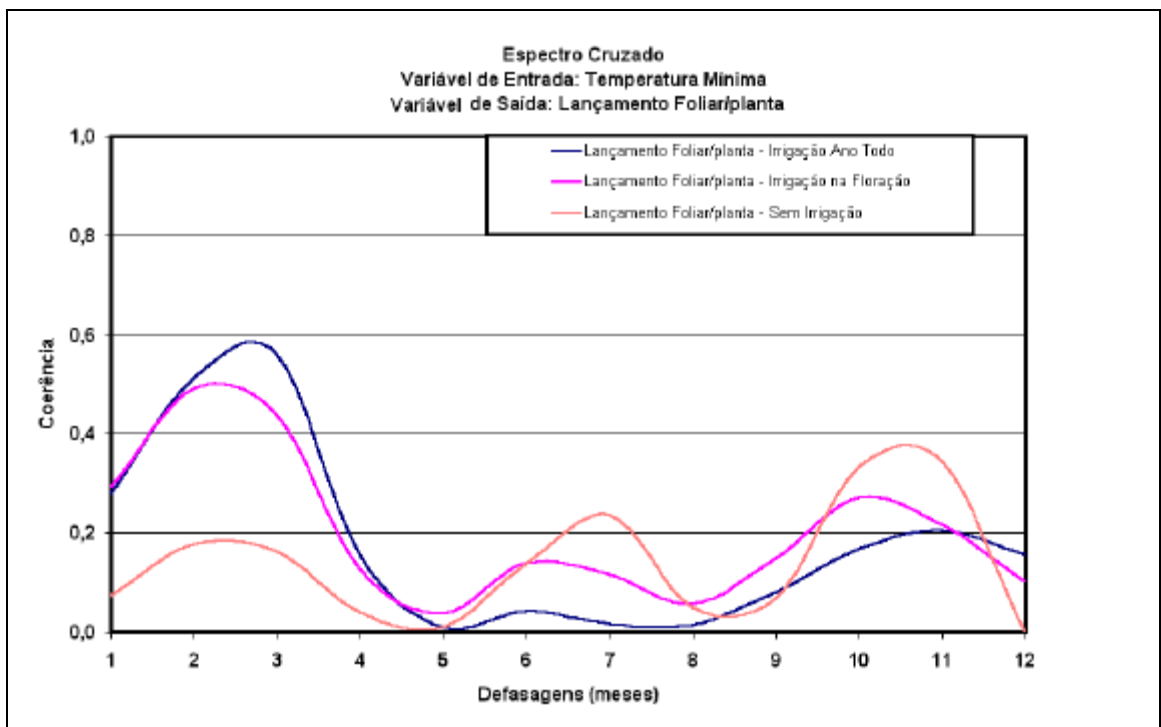


Figura 4.81. Estatística coerência entre a variável temperatura mínima e a variável fenológica lançamento foliar.

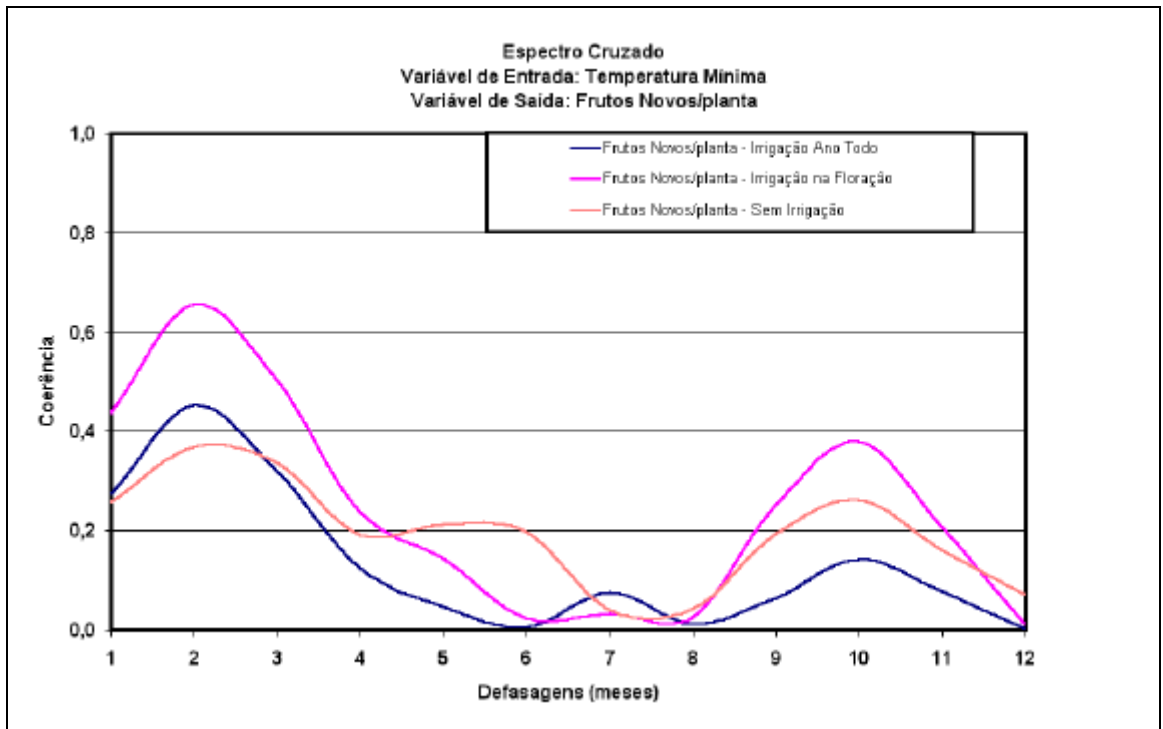


Figura 4.82. Estatística coerência entre a variável temperatura mínima e a variável fenológica frutos novos.

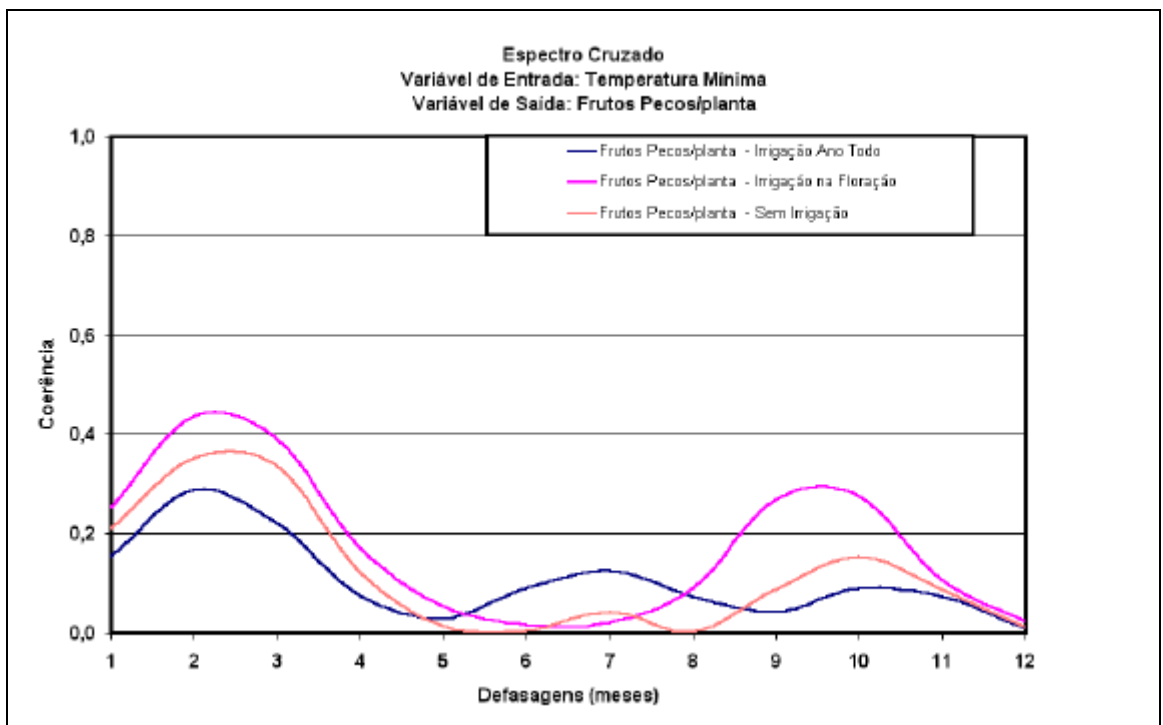


Figura 4.83. Estatística coerência entre a variável temperatura mínima e a variável fenológica frutos pecos.

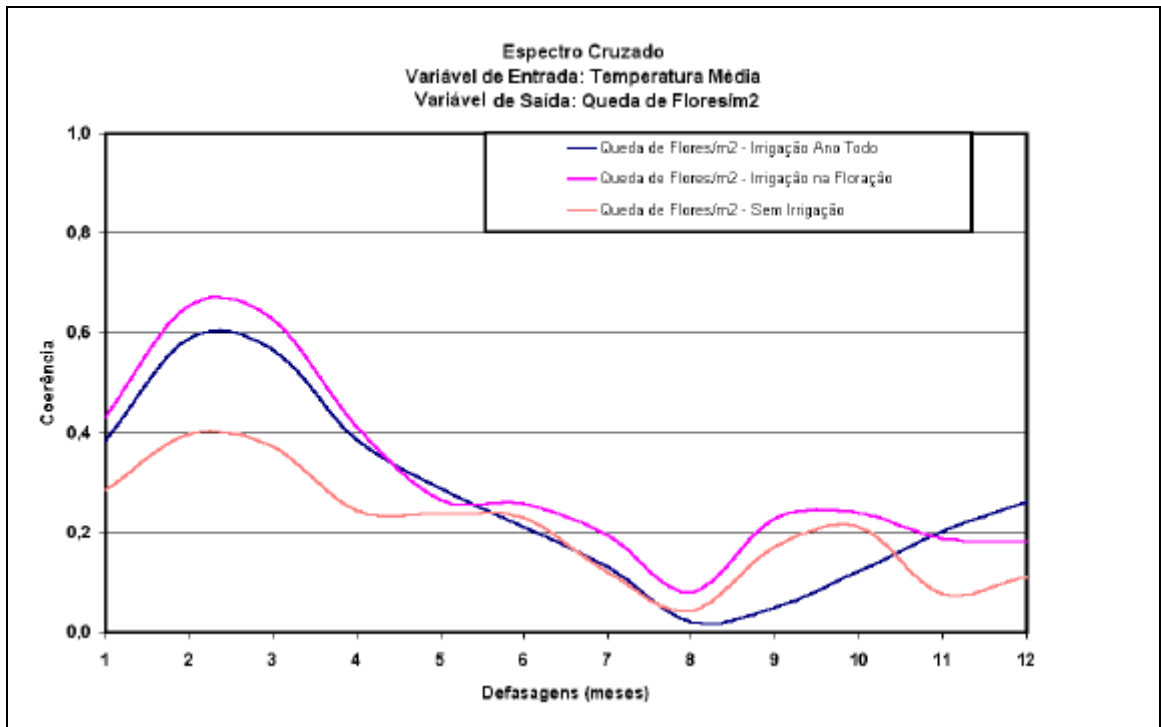


Figura 4.84. Estatística coerência entre a variável temperatura média e a variável fenológica queda de flores.

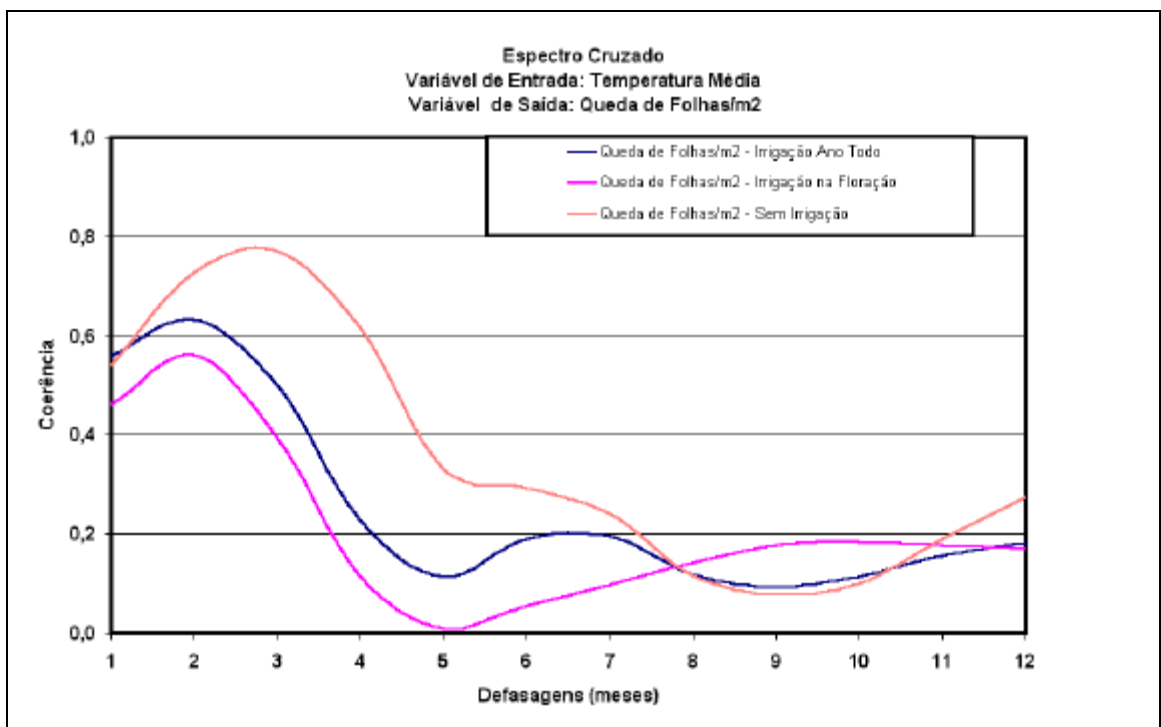


Figura 4.85. Estatística coerência entre a variável temperatura média e a variável fenológica queda de folhas.

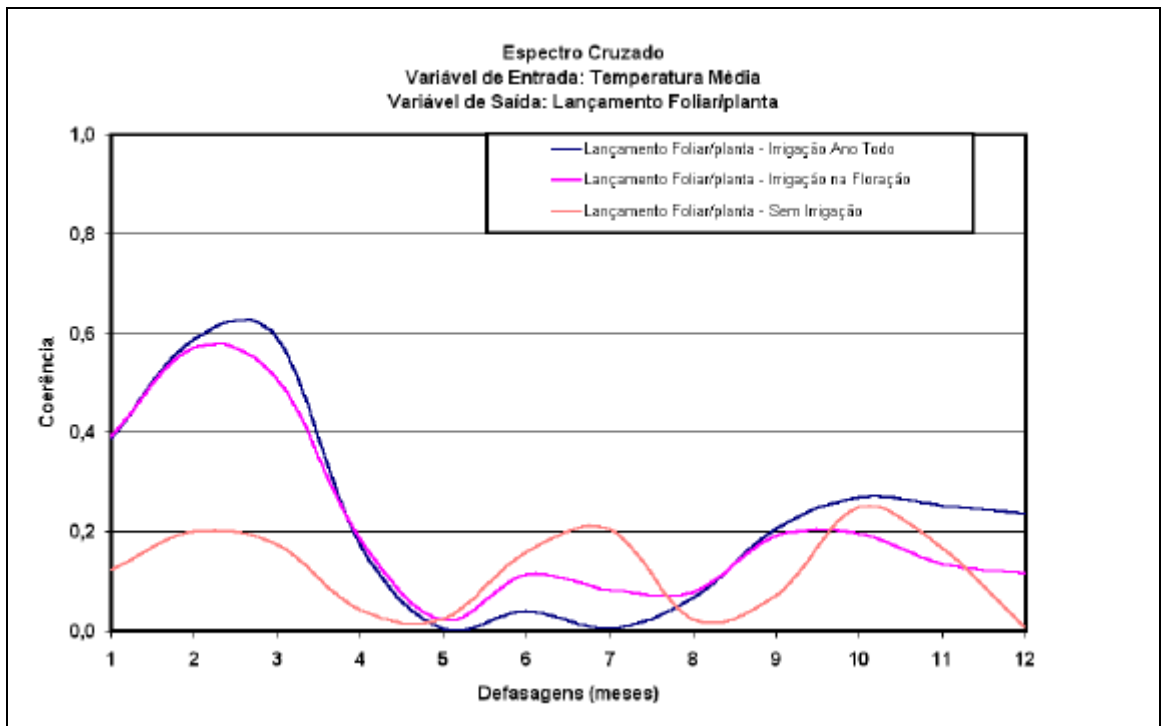


Figura 4.86. Estatística coerência entre a variável temperatura média e a variável fenológica lançamento foliar.

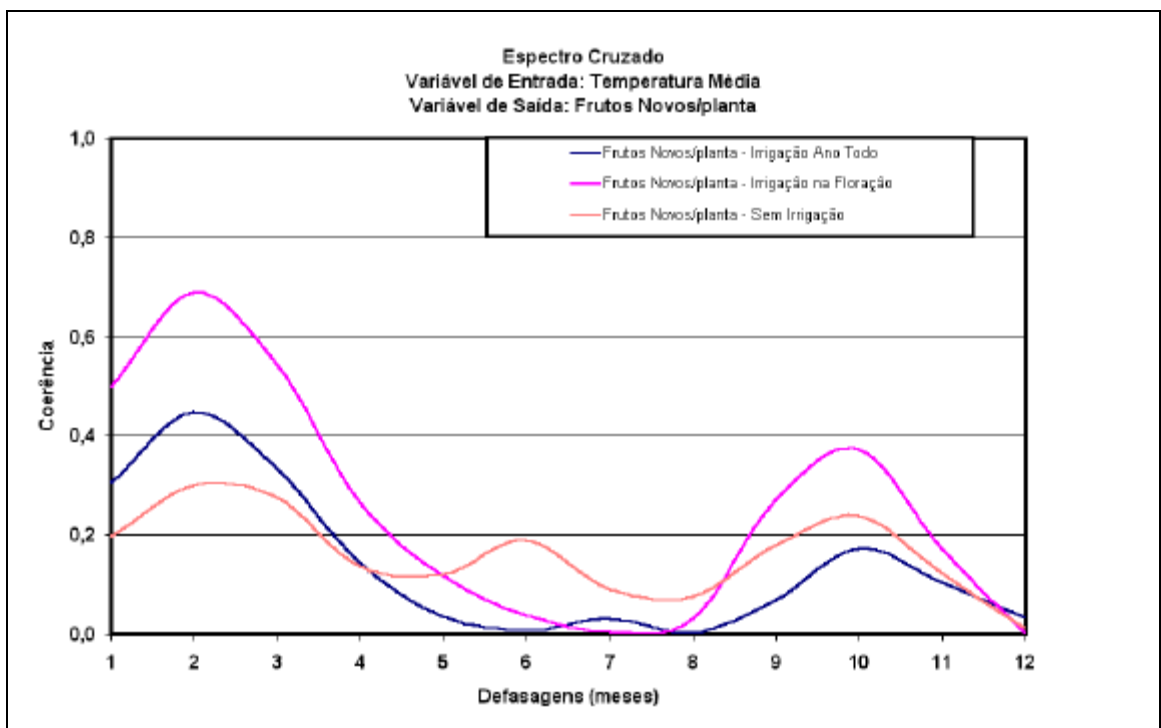


Figura 4.87. Estatística coerência entre a variável temperatura média e a variável fenológica frutos novos.

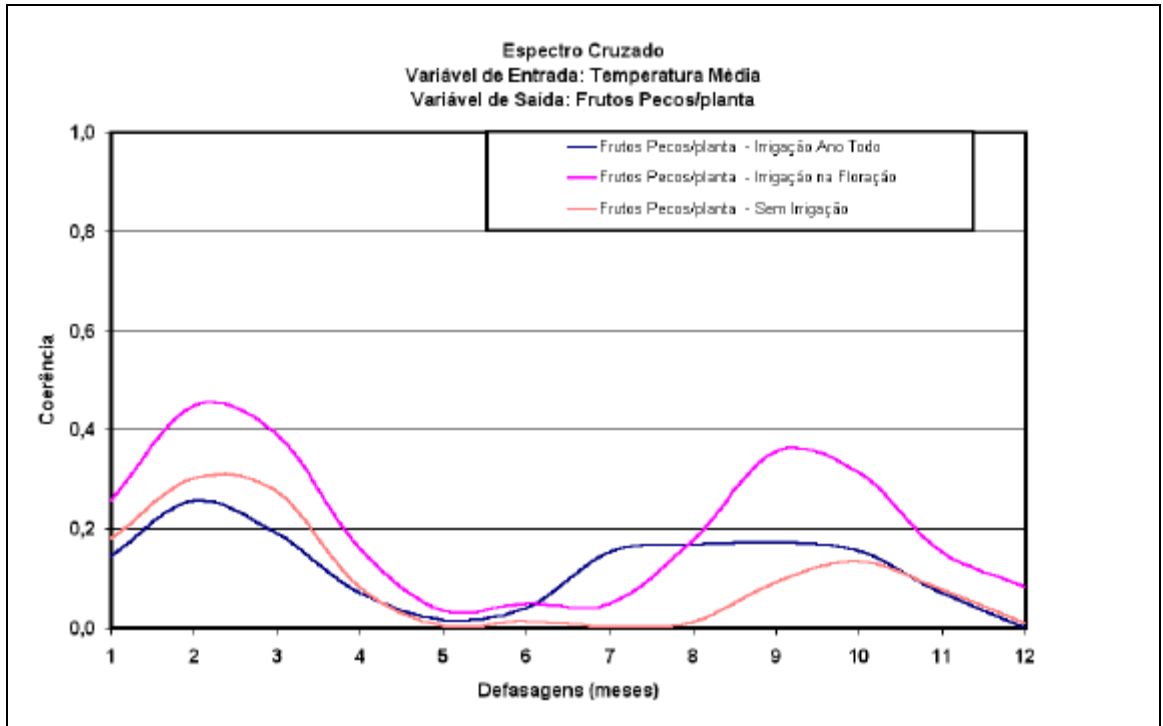


Figura 4.88. Estatística coerência entre a variável temperatura média e a variável fenológica frutos pecos.

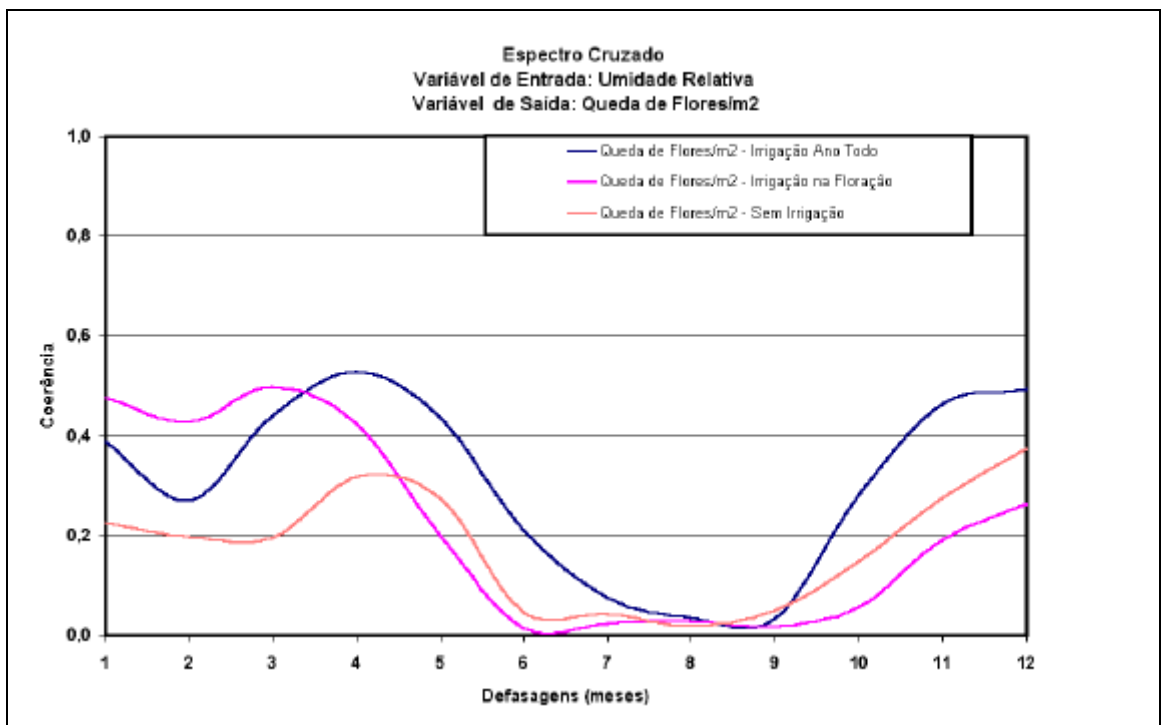


Figura 4.89. Estatística coerência entre a variável umidade relativa e a variável fenológica queda de flores.

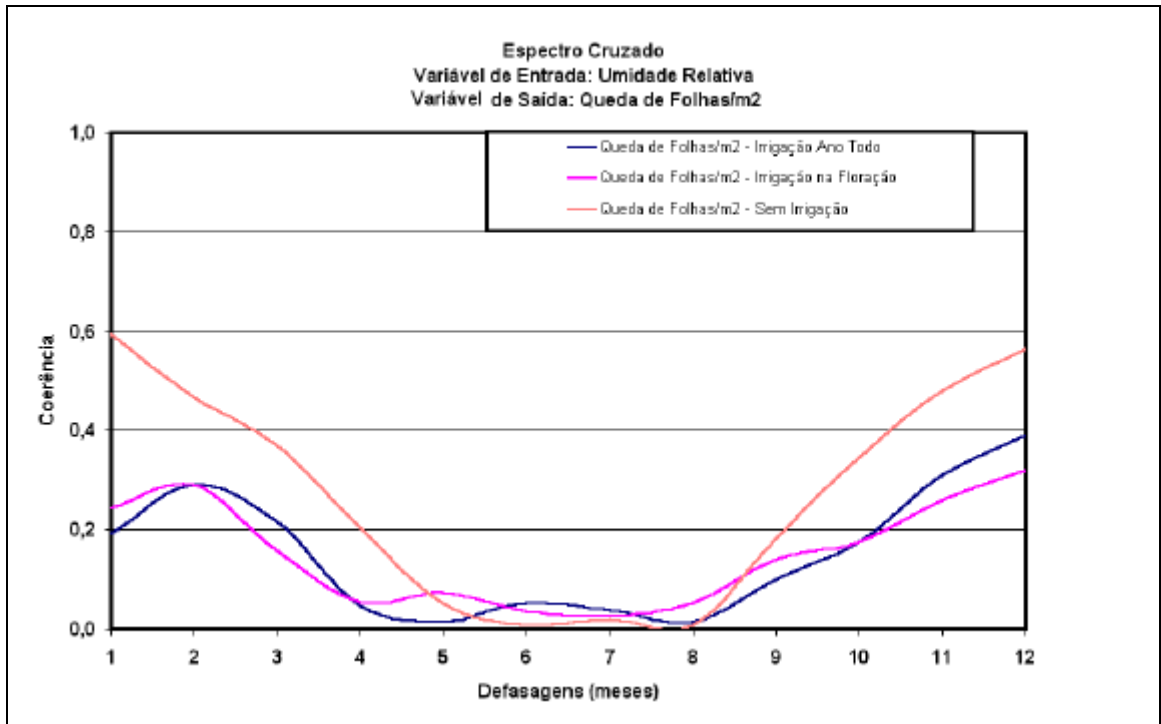


Figura 4.90. Estatística coerência entre a variável umidade relativa e a variável fenológica queda de folhas.

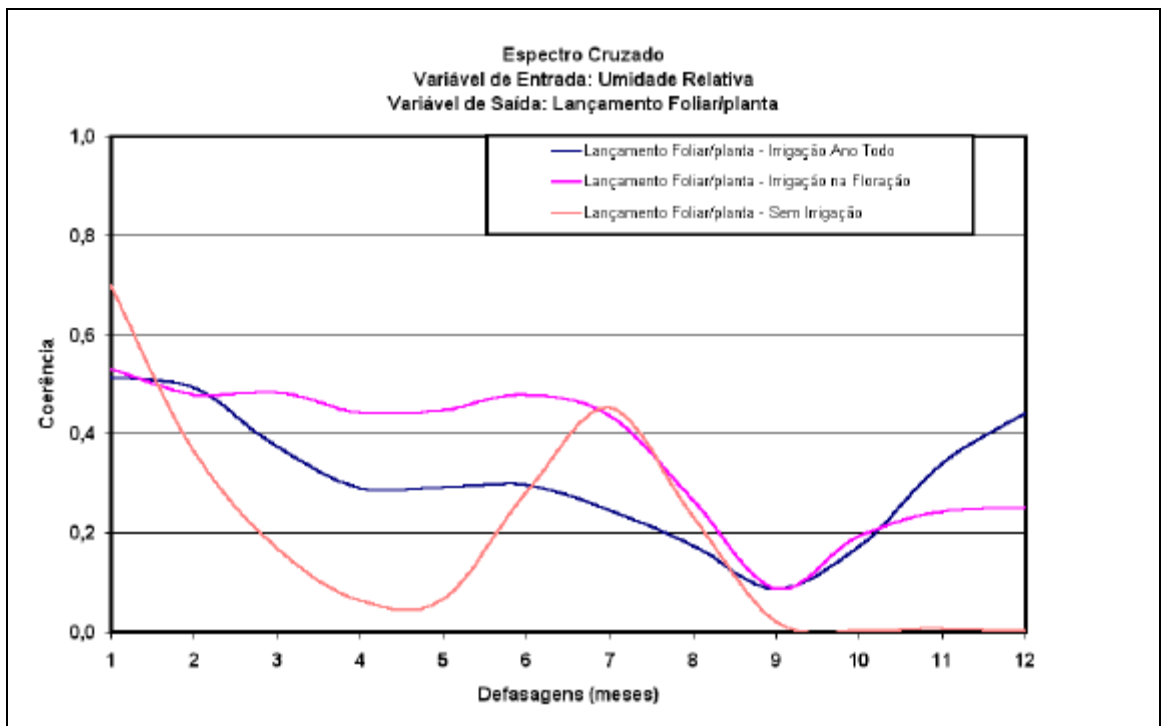


Figura 4.91. Estatística coerência entre a variável umidade relativa e a variável fenológica lançamento foliar.

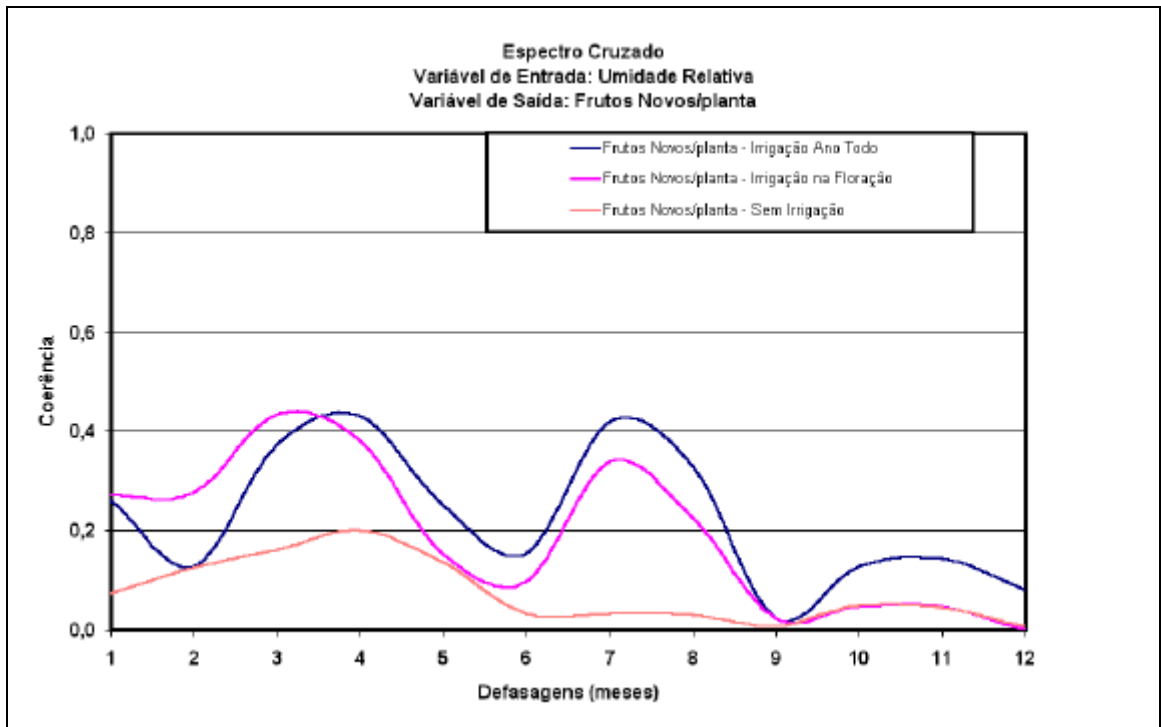


Figura 4.92. Estatística coerência entre a variável umidade relativa e a variável fenológica frutos novos.

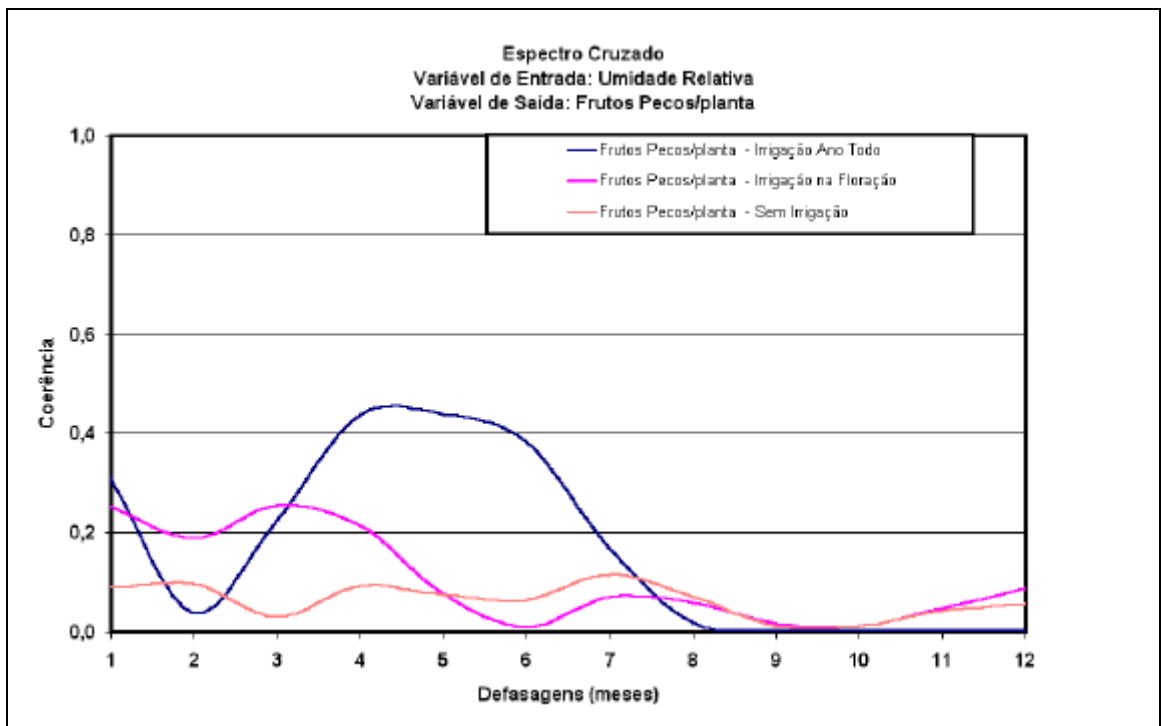


Figura 4.93. Estatística coerência entre a variável umidade relativa e a variável fenológica frutos pecos.

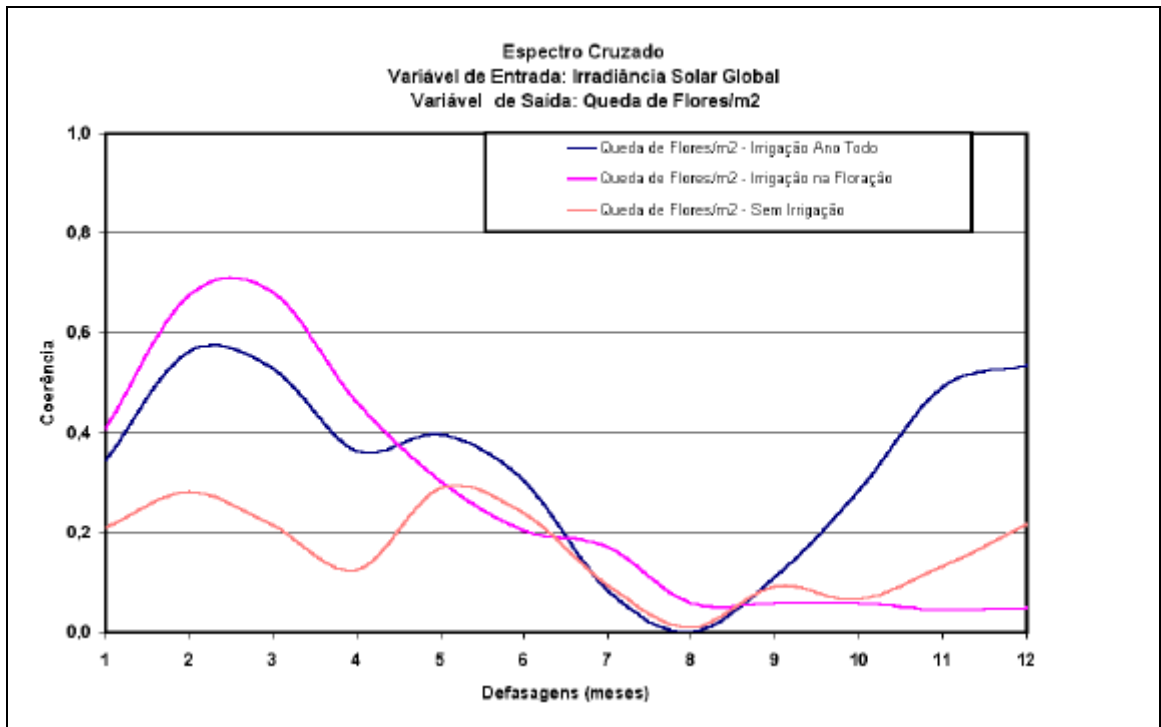


Figura 4.94. Estatística coerência entre a variável irradiância solar global e a variável fenológica queda de flores.

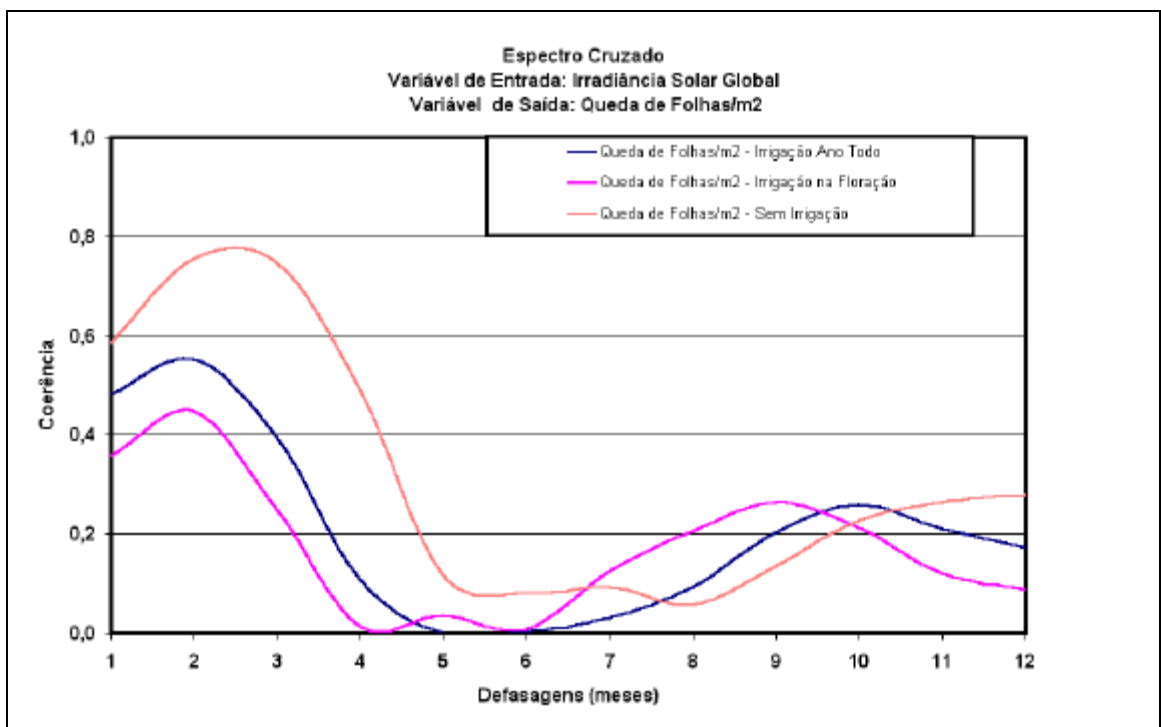


Figura 4.95. Estatística coerência entre a variável irradiância solar global e a variável fenológica queda de folhas.

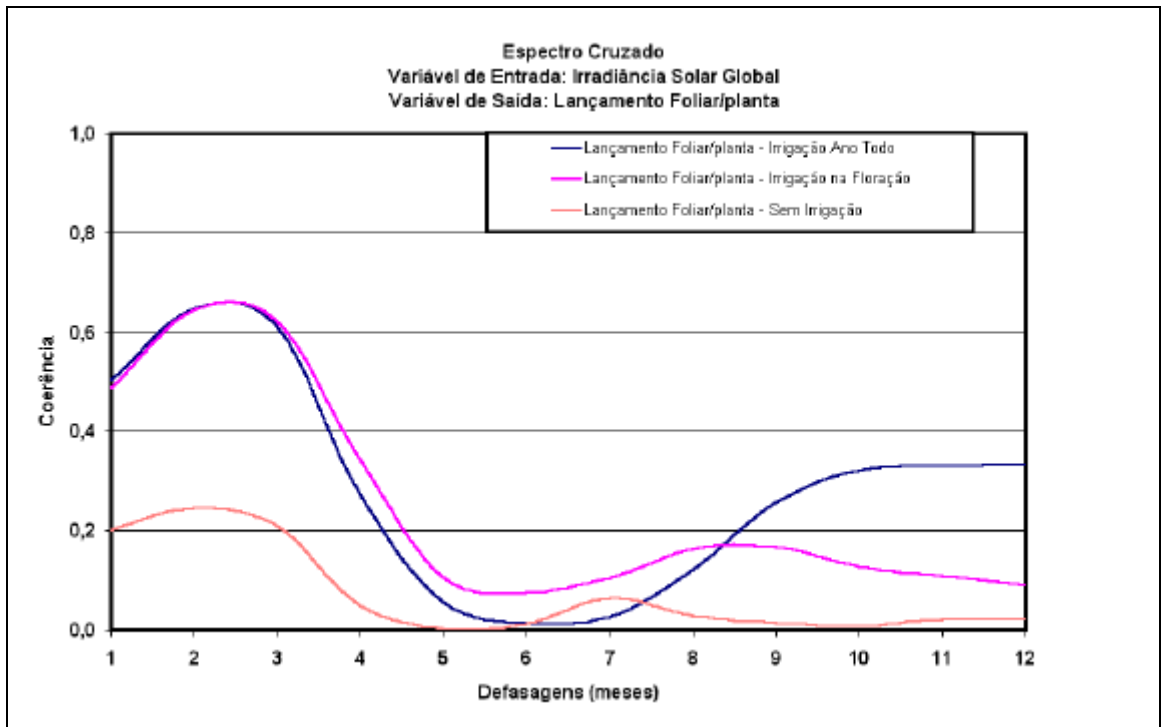


Figura 4.96. Estatística coerência entre a variável irradiância solar global e a variável fenológica lançamento foliar.

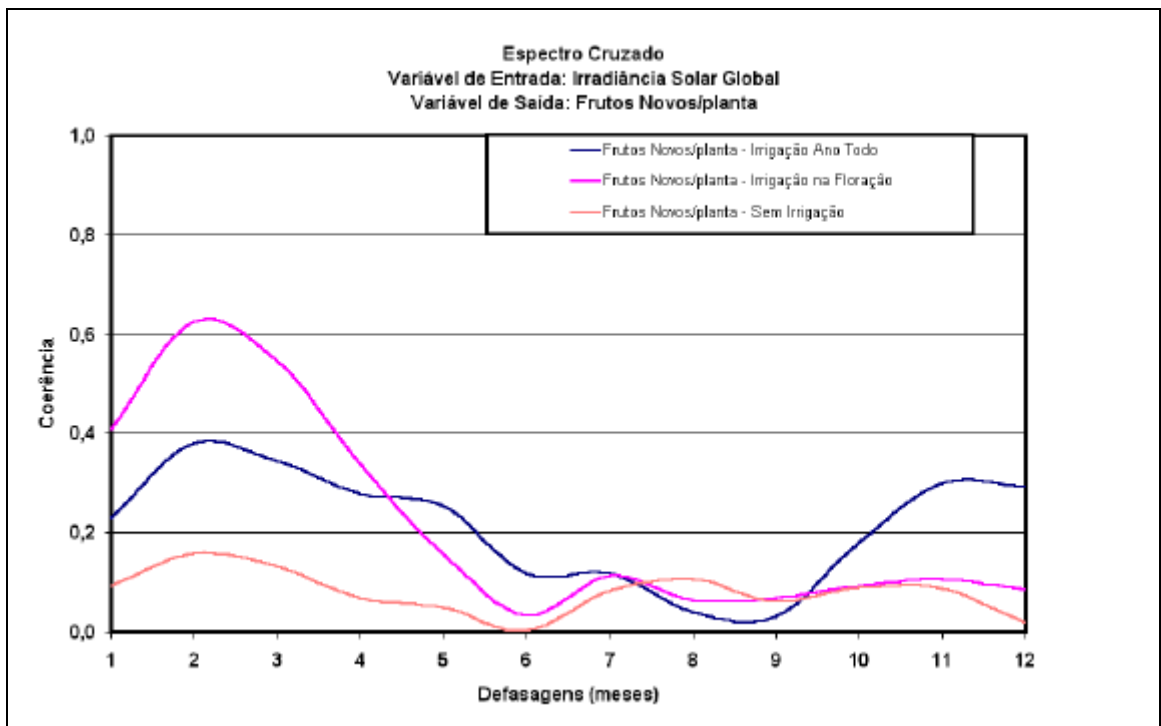


Figura 4.97. Estatística coerência entre a variável irradiância solar global e a variável fenológica frutos novos.

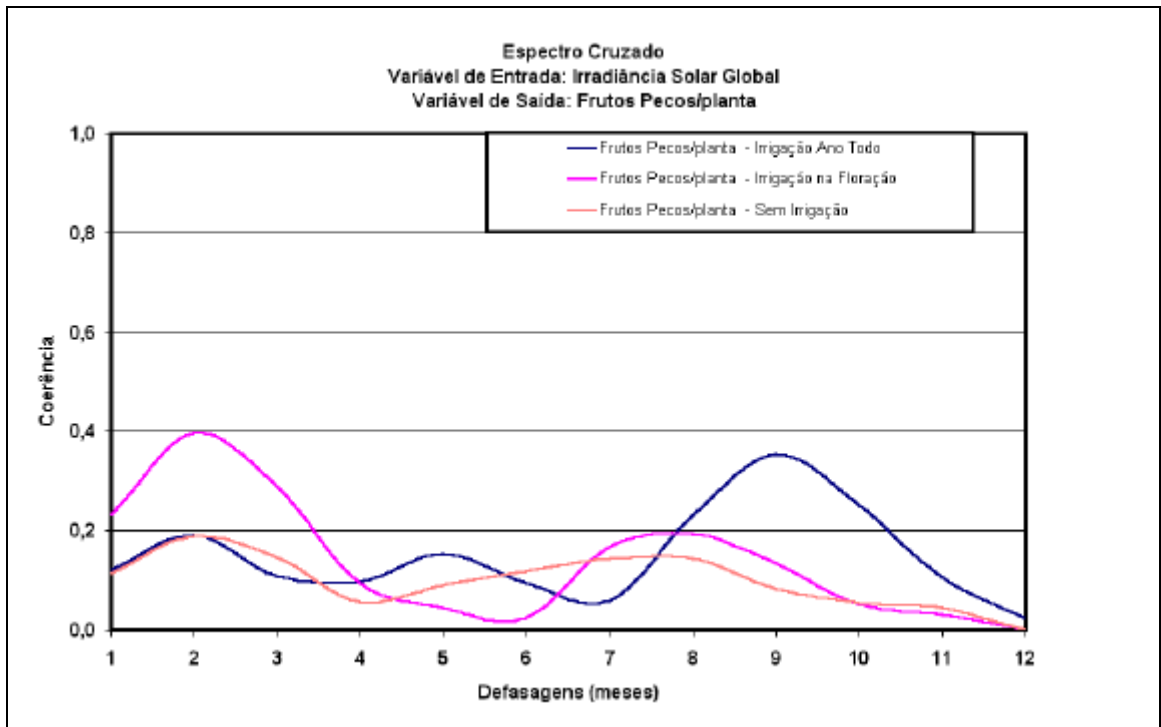


Figura 4.98. Estatística coerência entre a variável irradiância solar global e a variável fenológica frutos pecos.

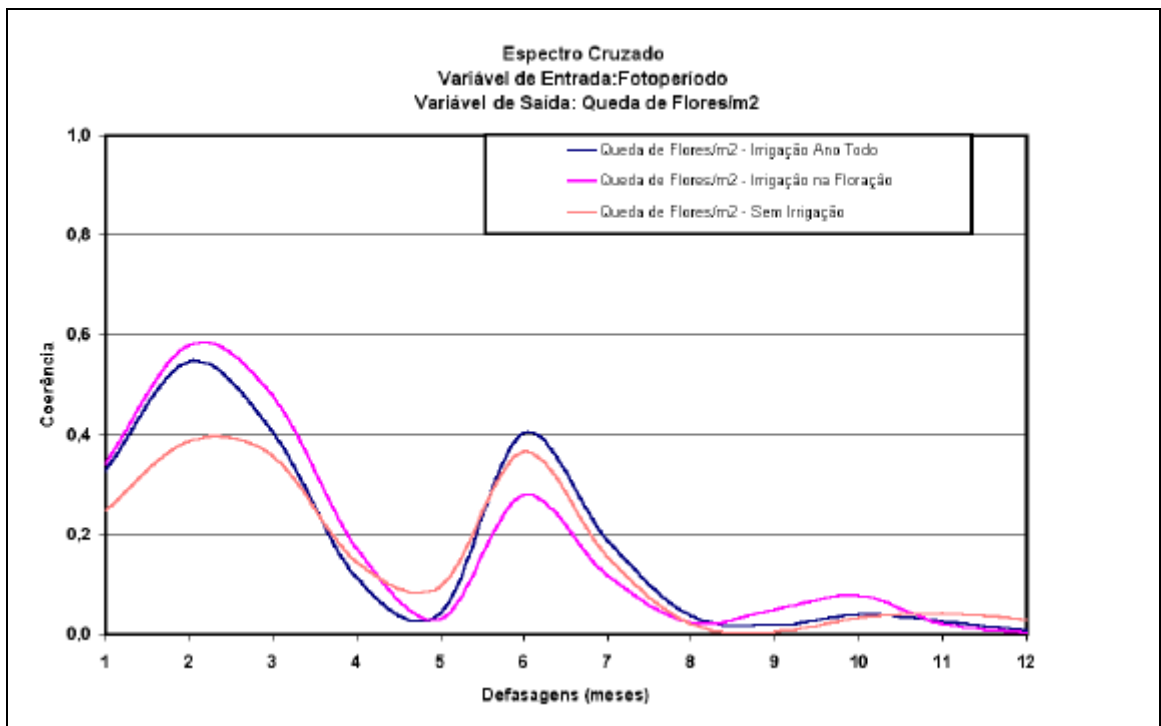


Figura 4.99. Estatística coerência entre a variável fotoperíodo e a variável fenológica queda de flores.

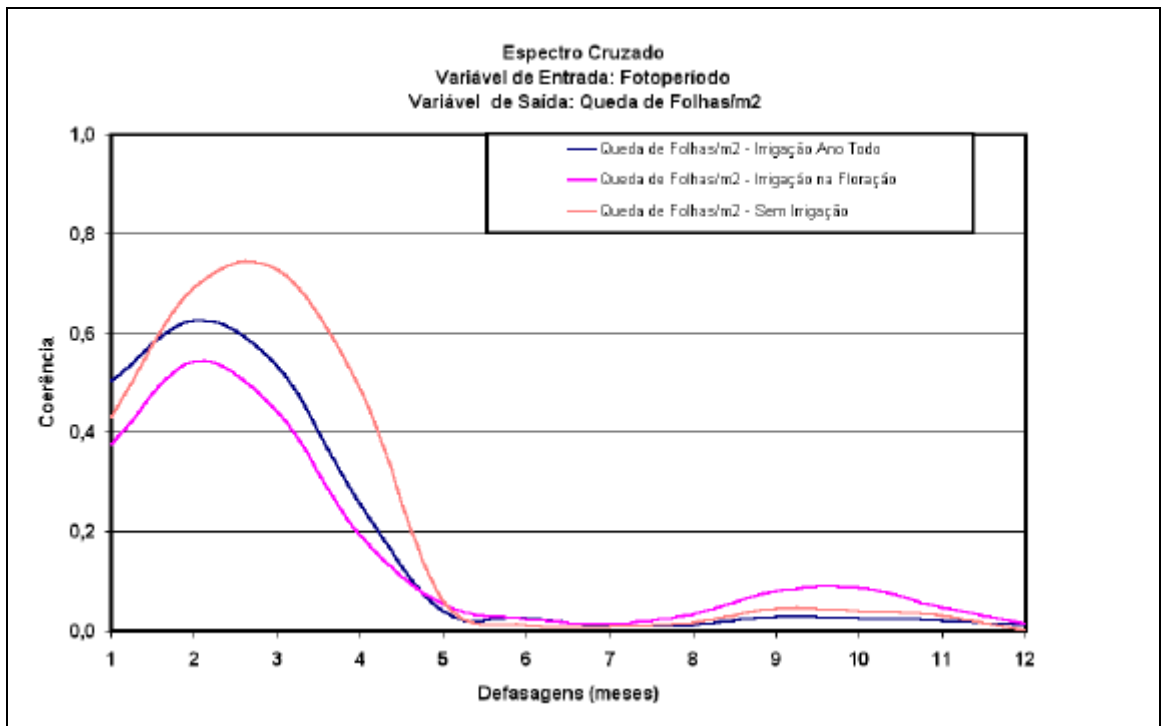


Figura 4.100. Estatística coerência entre a variável fotoperíodo e a variável fenológica queda de folhas.

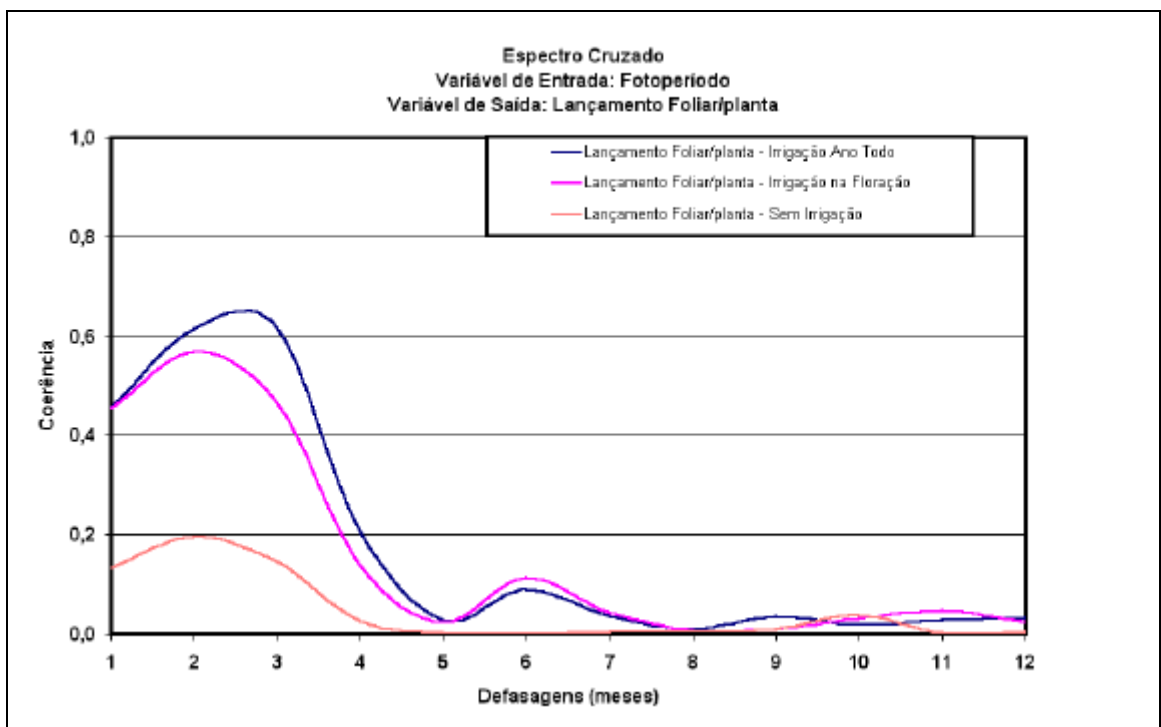


Figura 4.101. Estatística coerência entre a variável fotoperíodo e a variável fenológica lançamento foliar.

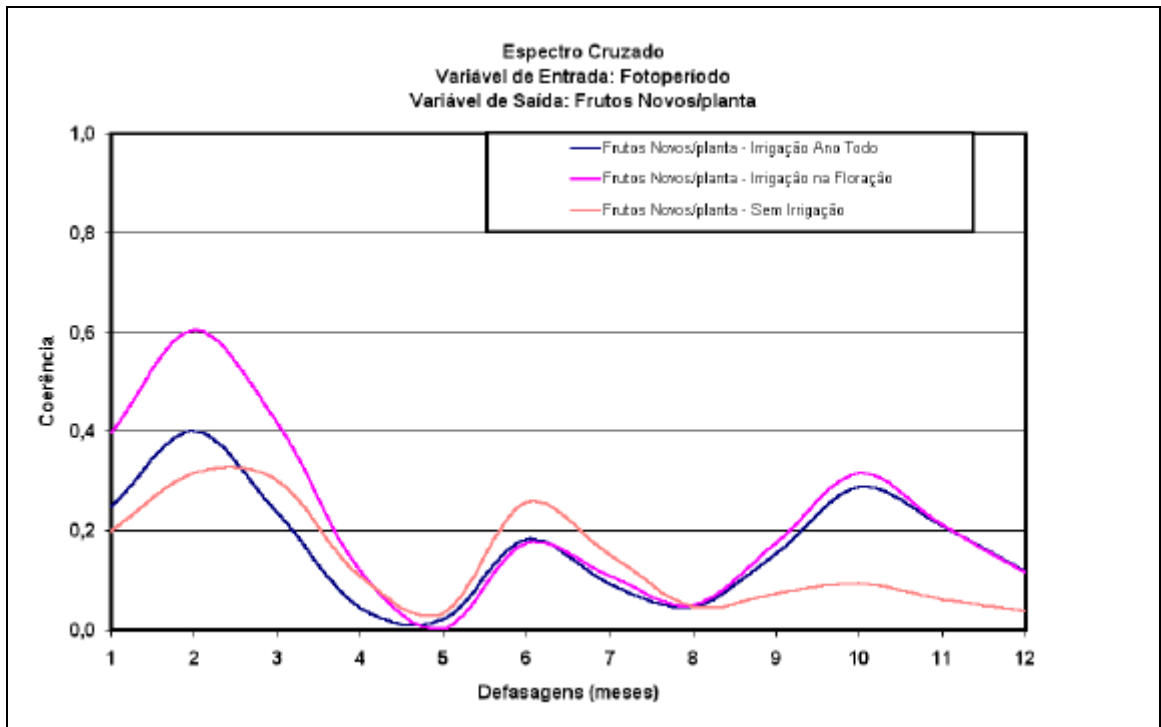


Figura 4.102. Estatística coerência entre a variável fotoperíodo e a variável fenológica frutos novos.

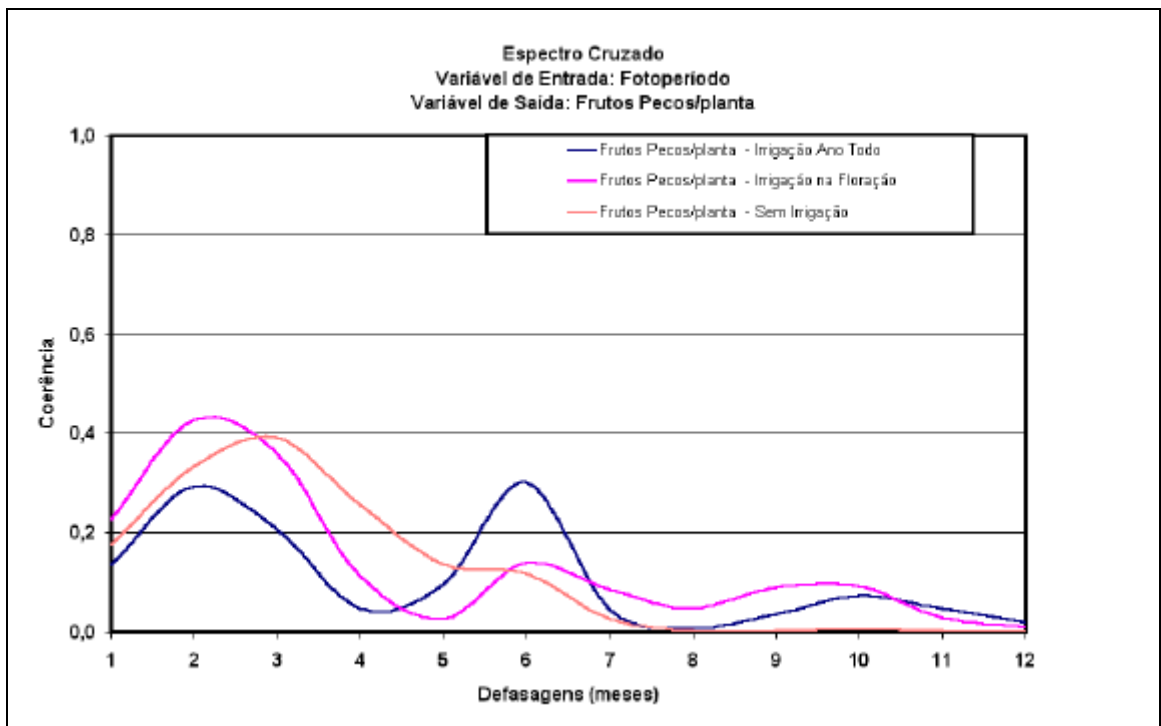


Figura 4.103. Estatística coerência entre a variável fotoperíodo e a variável fenológica frutos pecos.

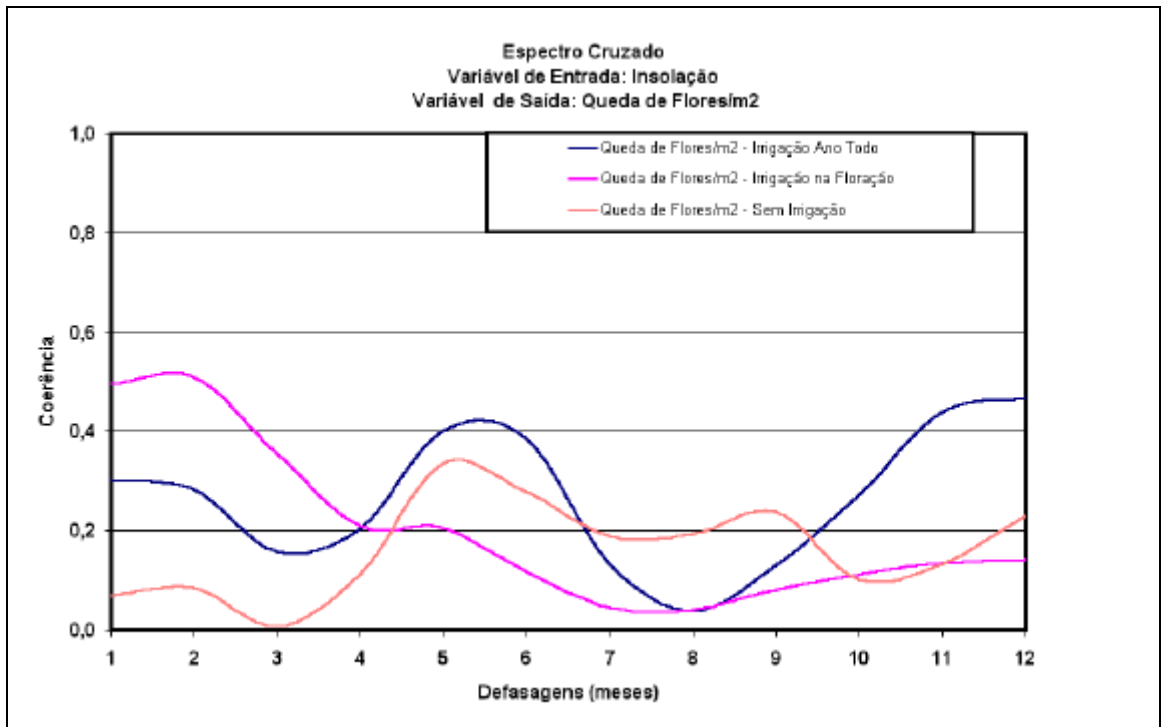


Figura 4.104. Estatística coerência entre a variável insolação e a variável fenológica queda de flores.

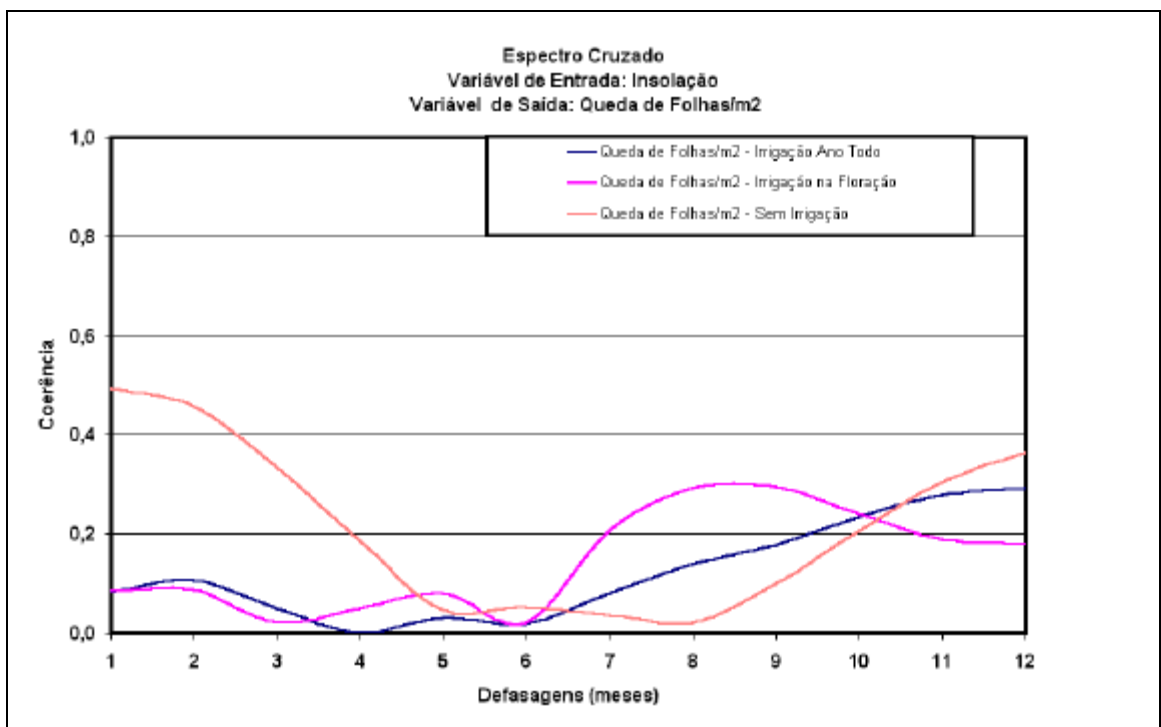


Figura 4.105. Estatística coerência entre a variável insolação e a variável fenológica queda de folhas.

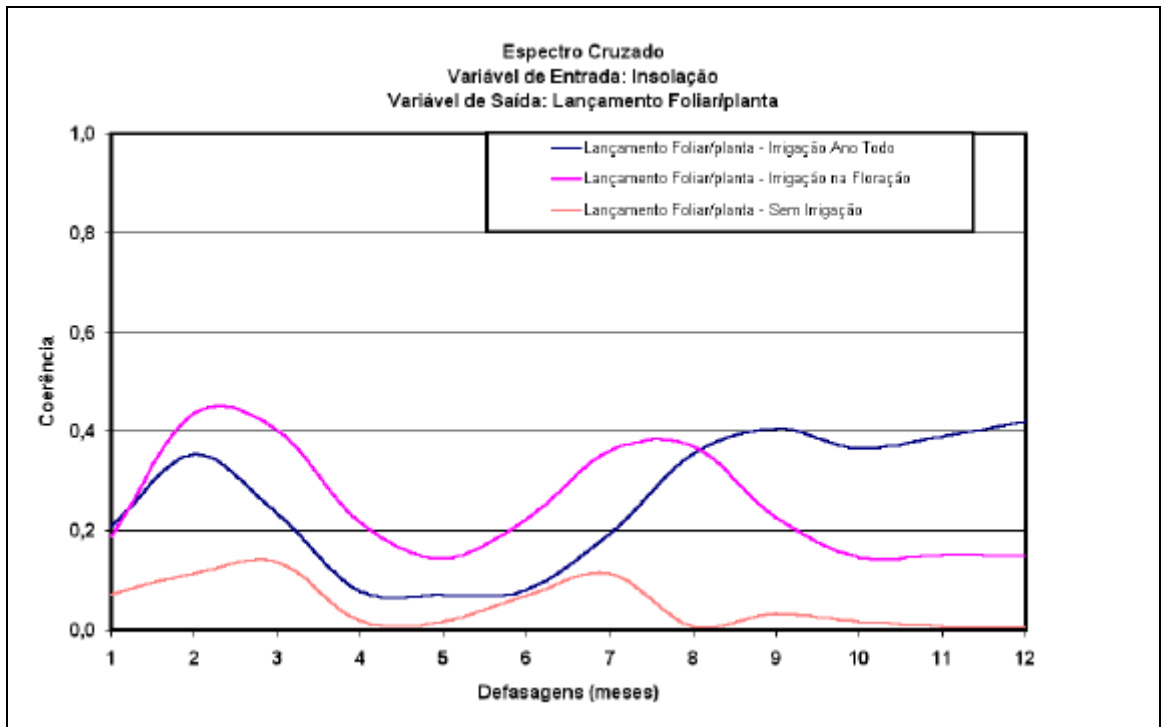


Figura 4.106. Estatística coerência entre a variável insolação e a variável fenológica lançamento foliar.

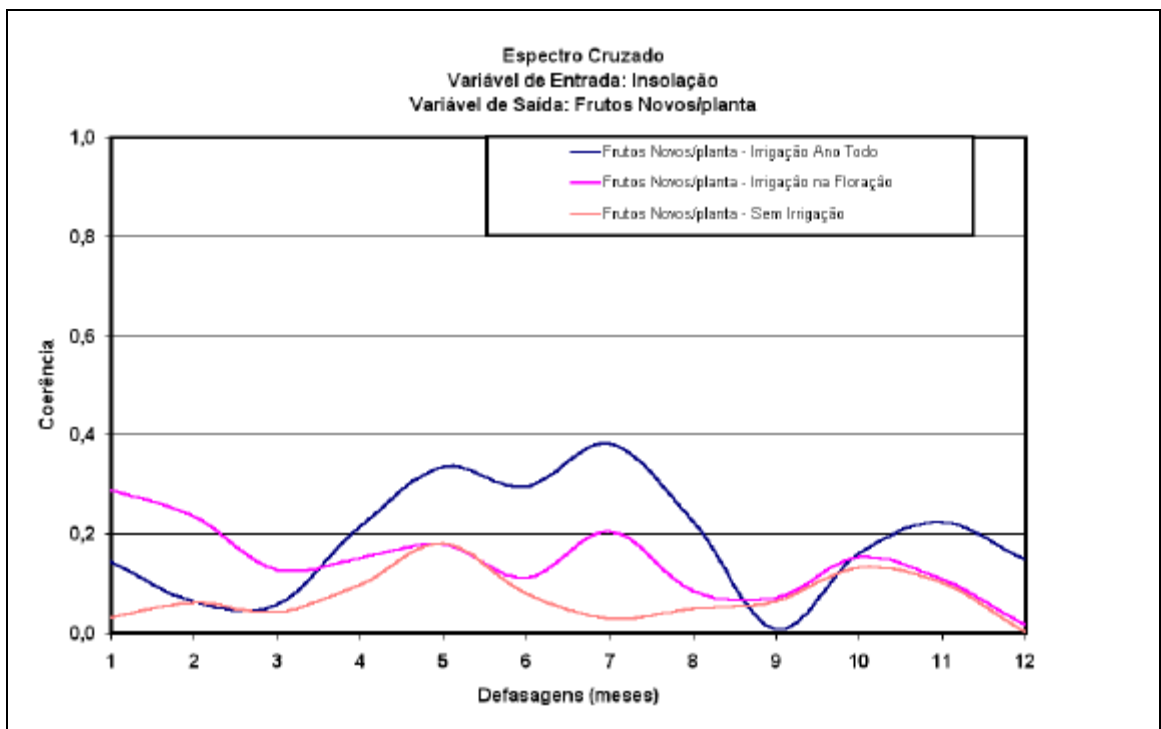


Figura 4.107. Estatística coerência entre a variável insolação e a variável fenológica frutos novos.

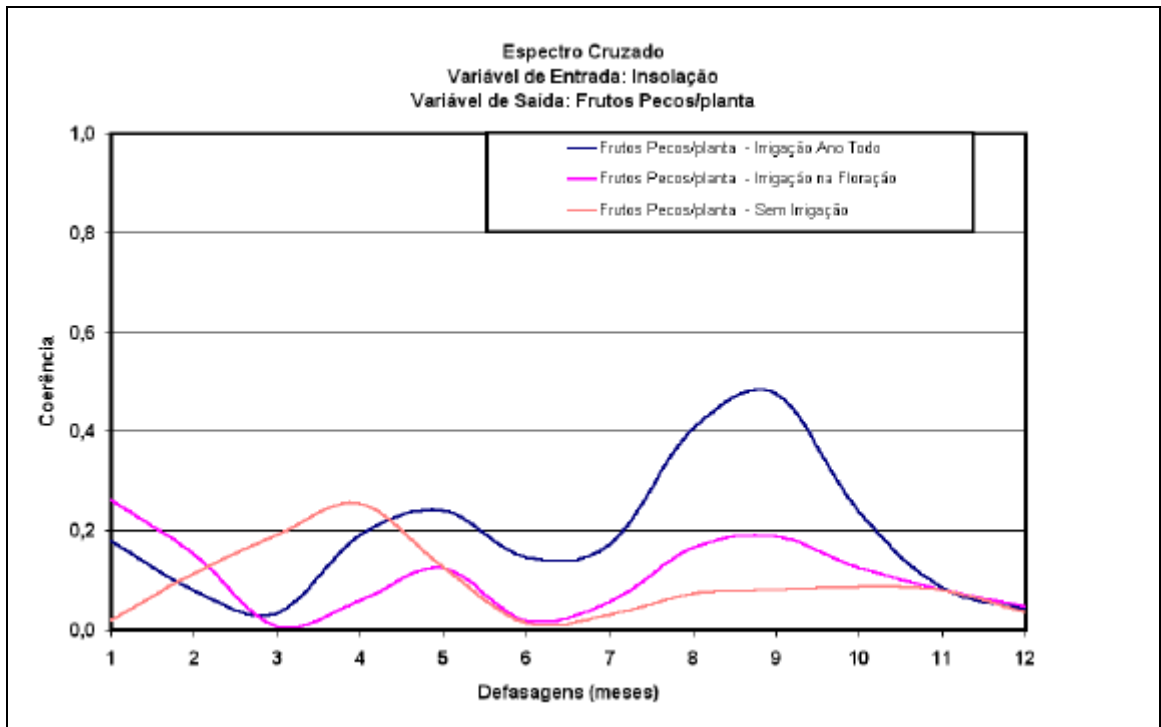


Figura 4.108. Estatística coerência entre a variável insolação e a variável fenológica frutos pecos.

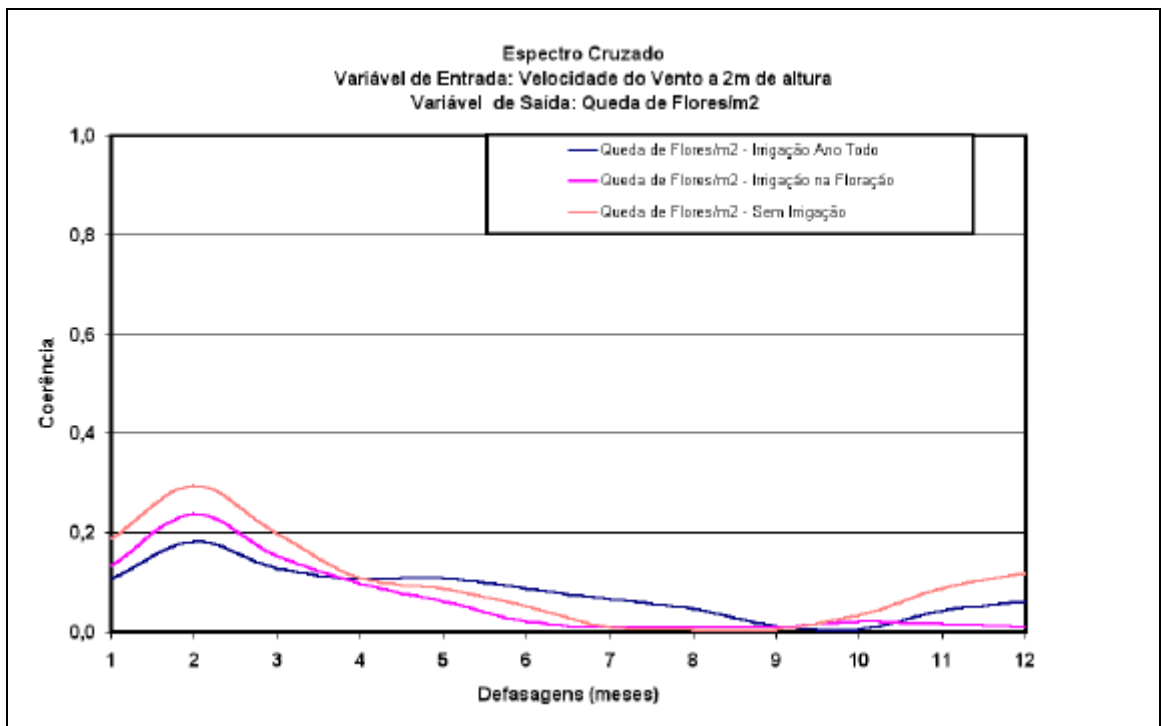


Figura 4.109. Estatística coerência entre a variável velocidade média do vento a 2 metros de altura e a variável fenológica queda de flores.

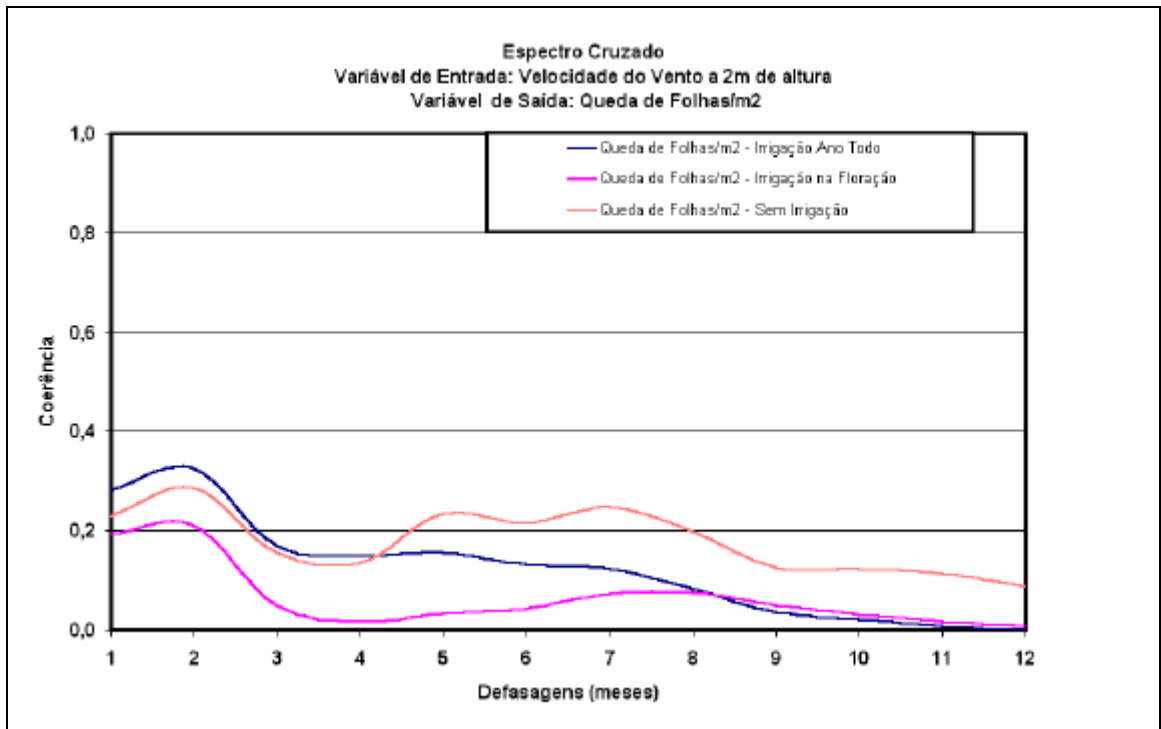


Figura 4.110. Estatística coerência entre a variável velocidade média do vento a 2 metros de altura e a variável fenológica queda de folhas.

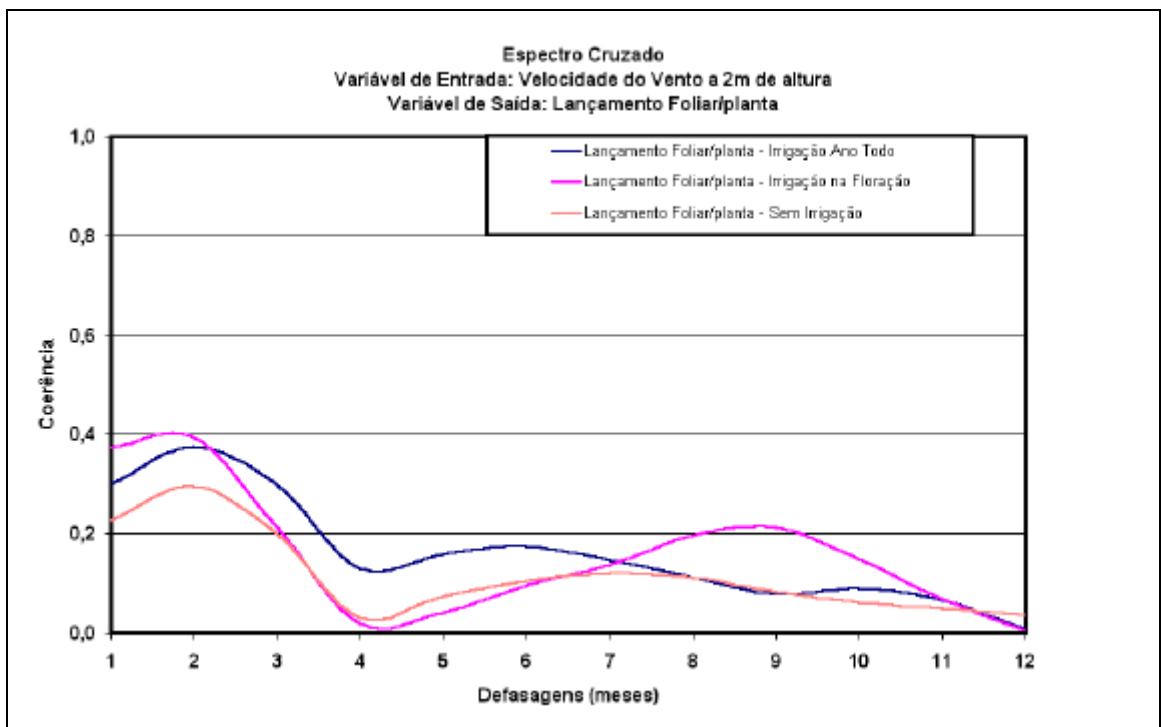


Figura 4.111. Estatística coerência entre a variável velocidade média do vento a 2 metros de altura e a variável fenológica lançamento foliar.

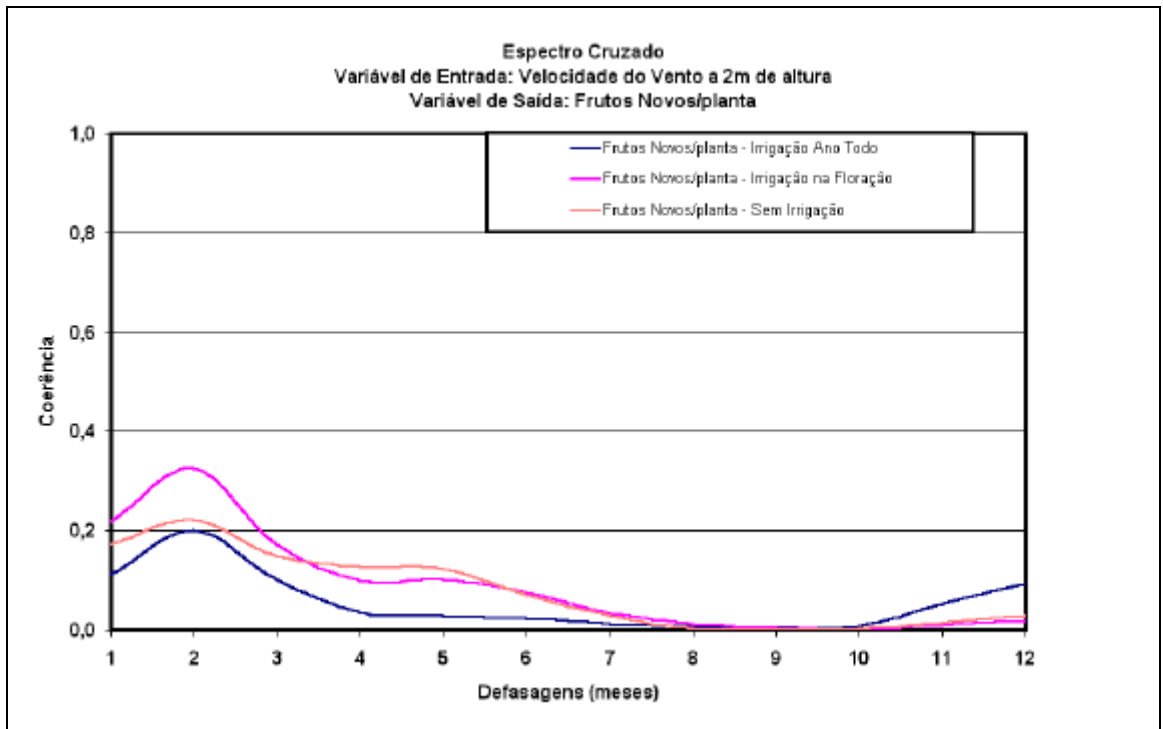


Figura 4.112. Estatística coerência entre a variável velocidade média do vento a 2 metros de altura e a variável fenológica frutos novos.

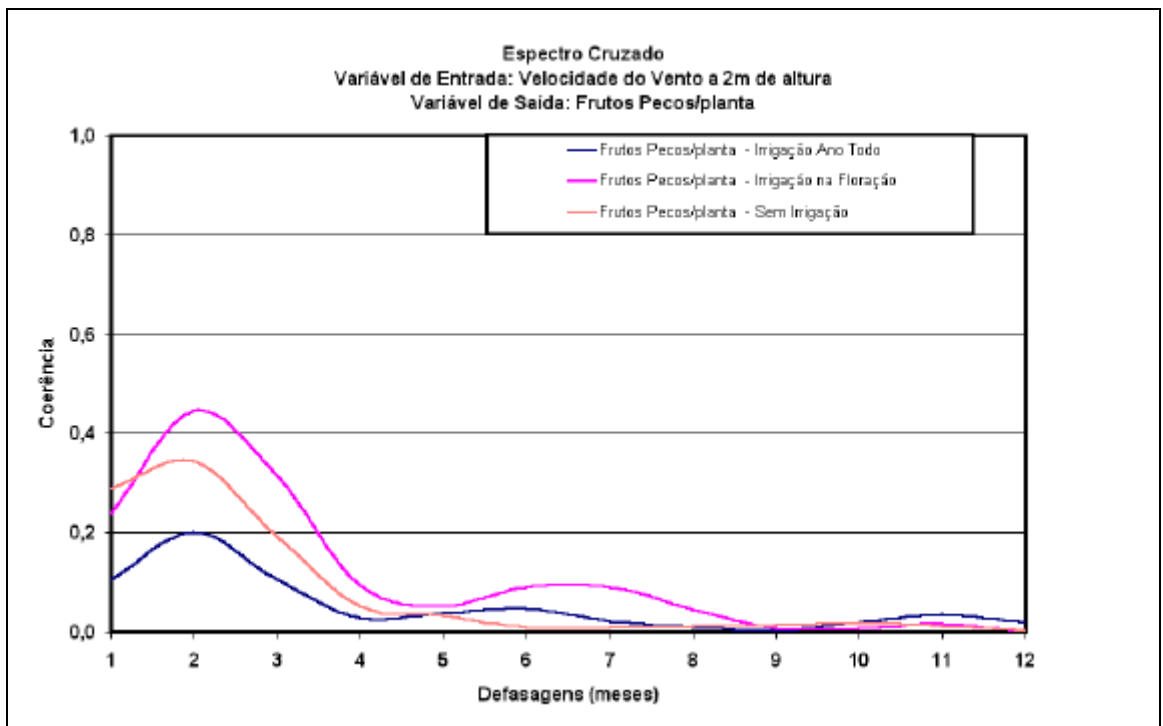


Figura 4.113. Estatística coerência entre a variável velocidade média do vento a 2 metros de altura e a variável fenológica frutos pecos.

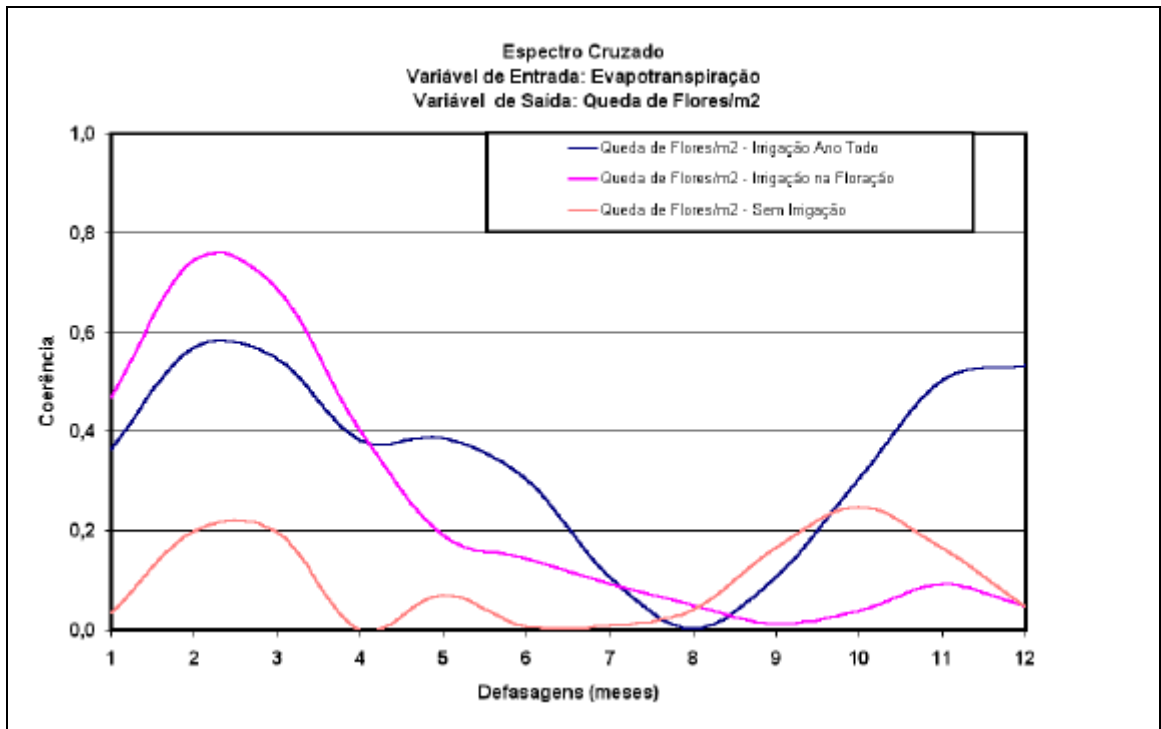


Figura 4.114. Estatística coerência entre a variável evapotranspiração real estimada e a variável fenológica queda de flores.

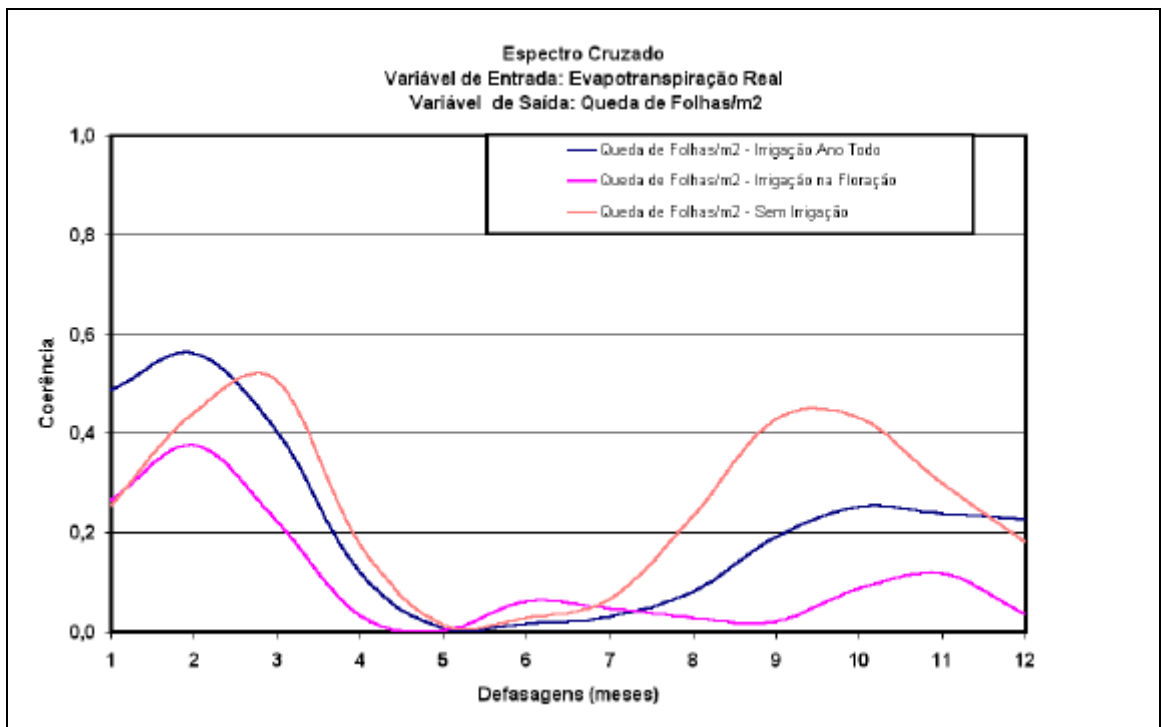


Figura 4.115. Estatística coerência entre a variável evapotranspiração real estimada e a variável fenológica queda de folhas.

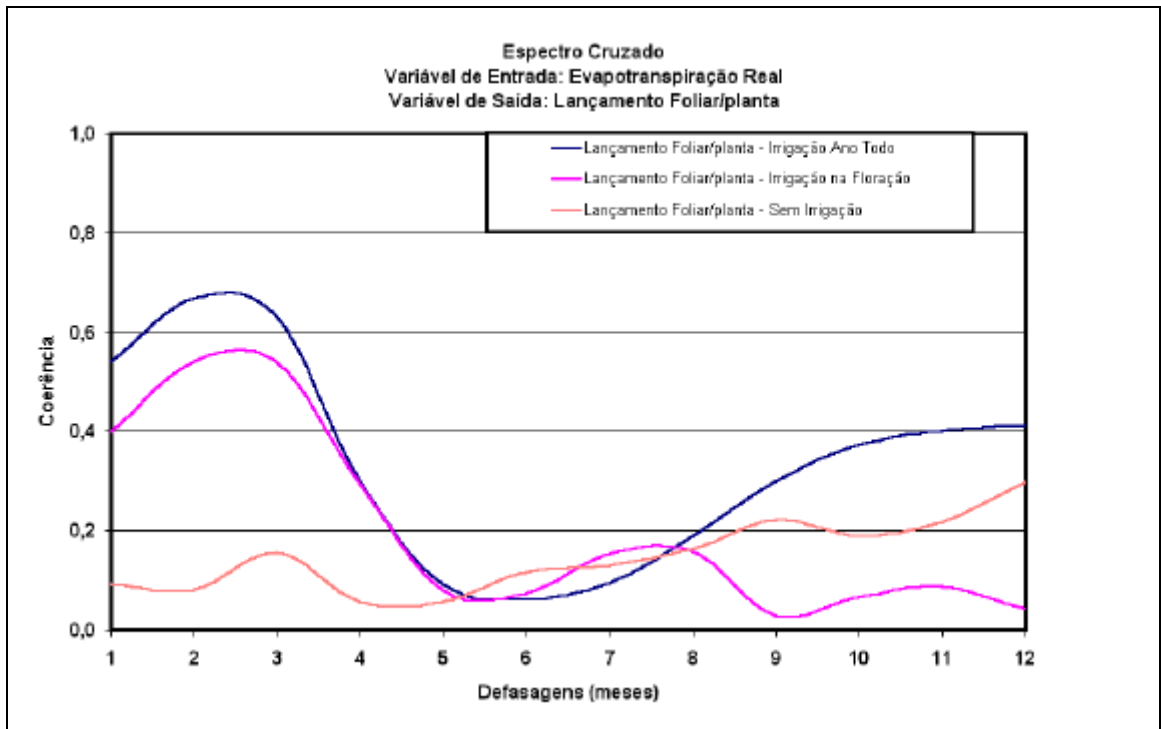


Figura 4.116. Estatística coerência entre a variável evapotranspiração real estimada e a variável fenológica lançamento foliar.

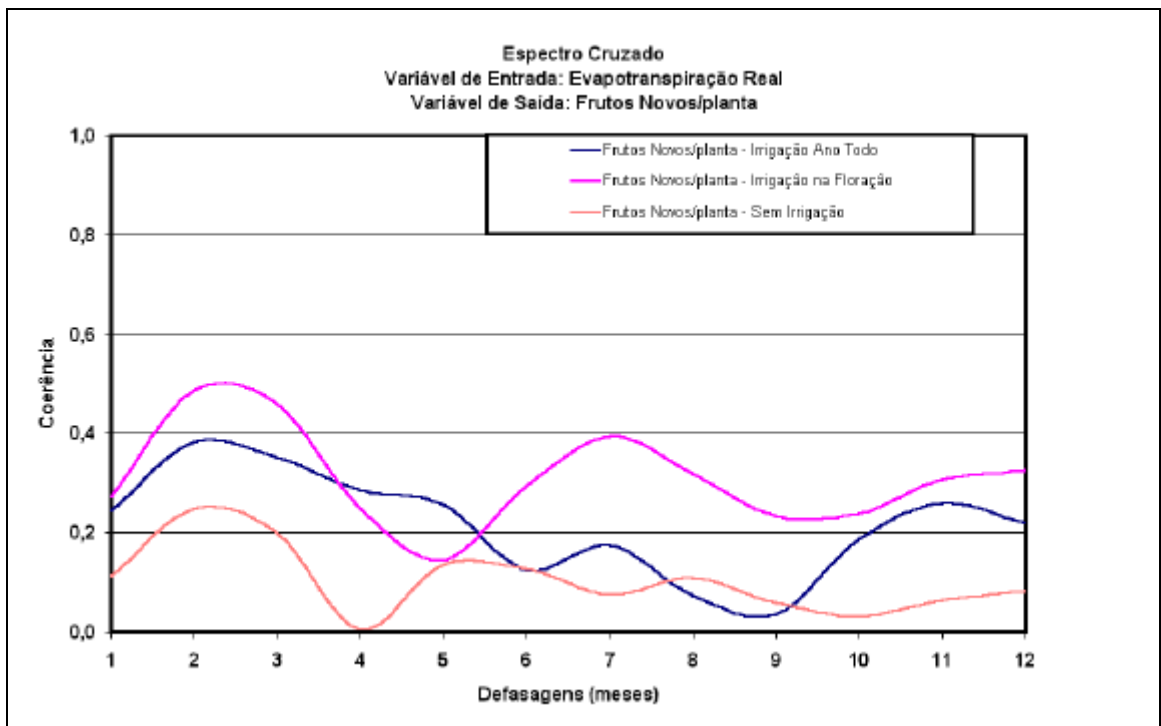


Figura 4.117. Estatística coerência entre a variável evapotranspiração real estimada e a variável fenológica frutos novos.

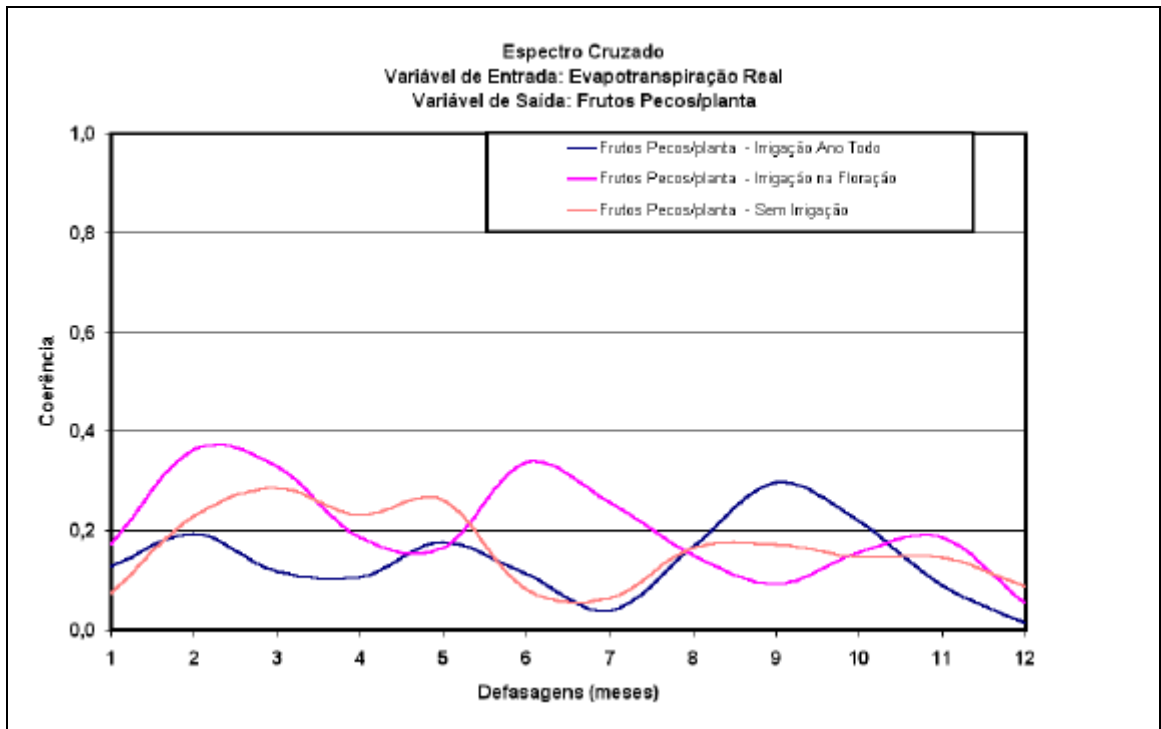


Figura 4.118. Estatística coerência entre a variável evapotranspiração real estimada e a variável fenológica frutos pecos.

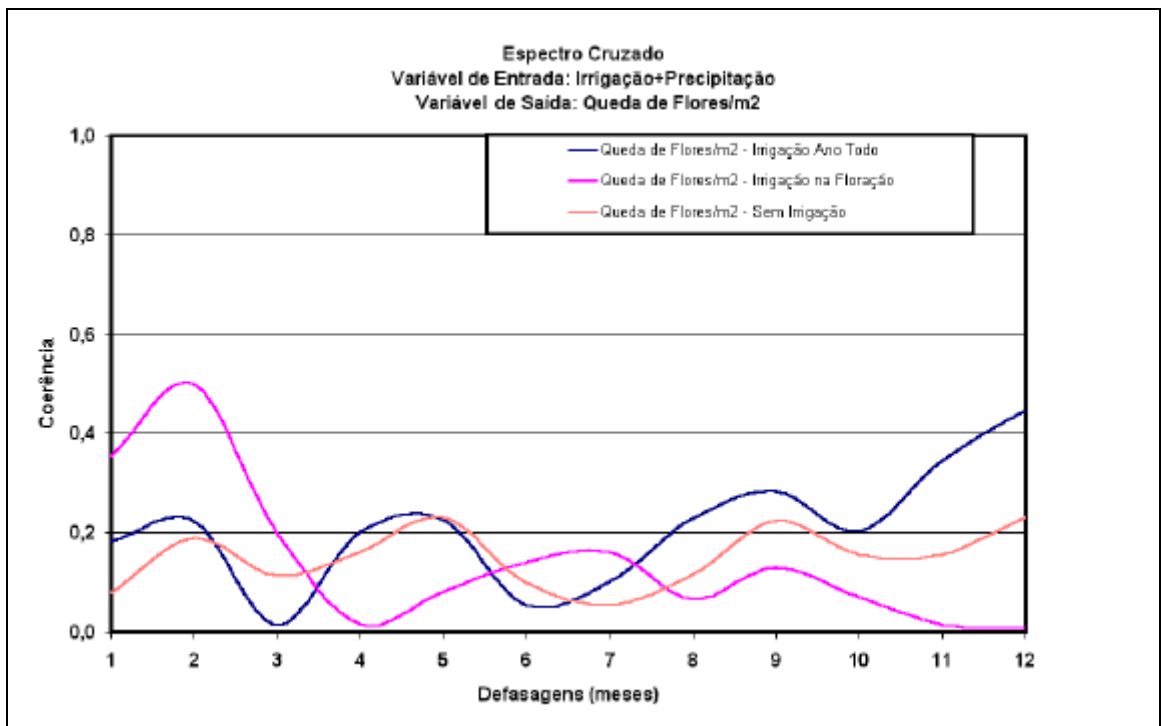


Figura 4.119. Estatística coerência entre a variável (precipitação+irrigação suplementar) e a variável fenológica queda de flores.

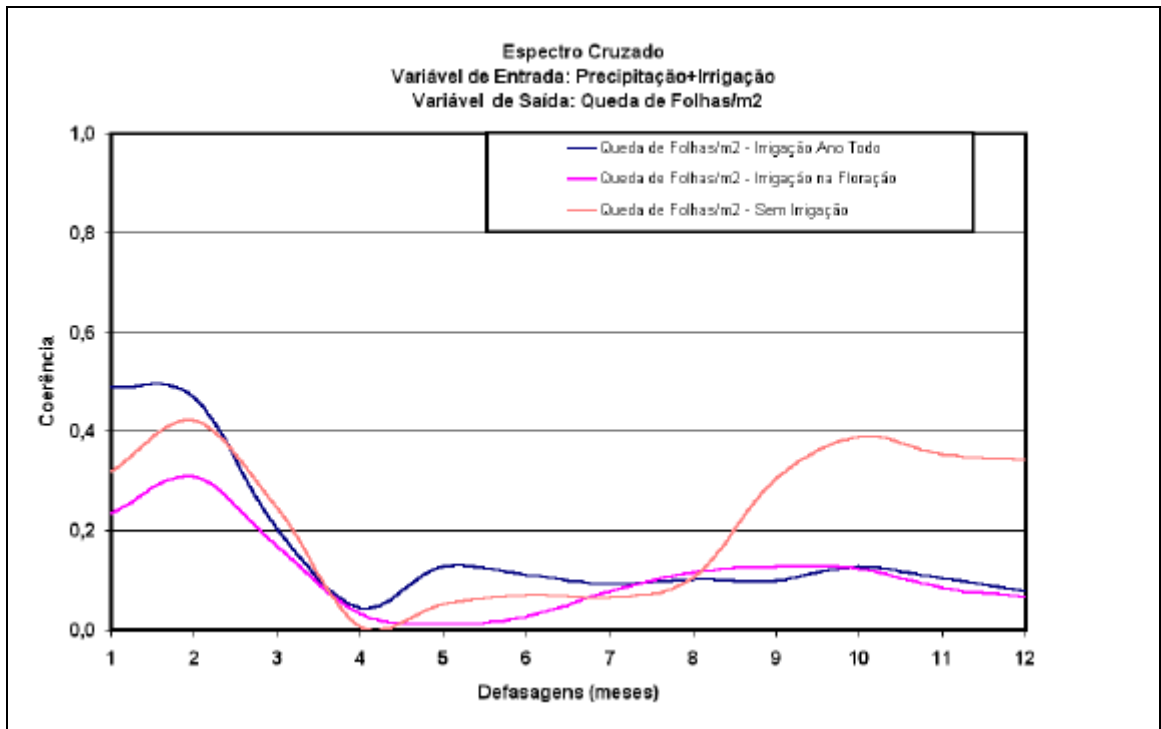


Figura 4.120. Estatística coerência entre a variável (precipitação+irrigação suplementar) e a variável fenológica queda de folhas.

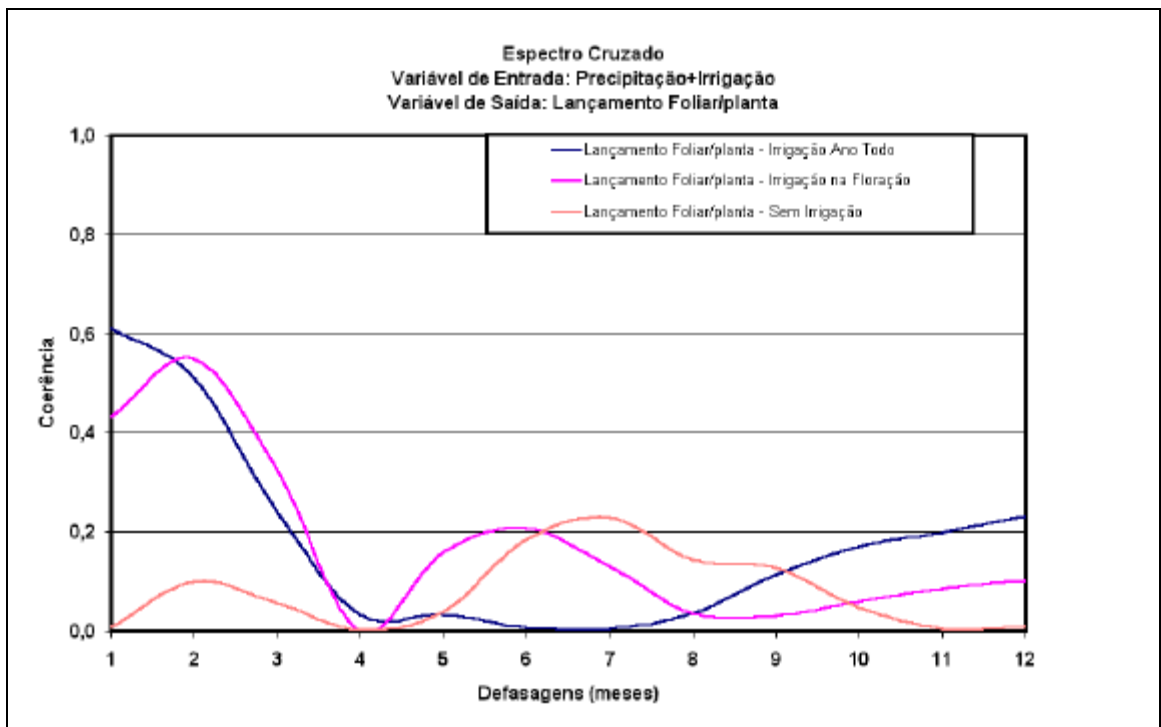


Figura 4.121. Estatística coerência entre a variável (precipitação+irrigação suplementar) e a variável fenológica lançamento foliar.

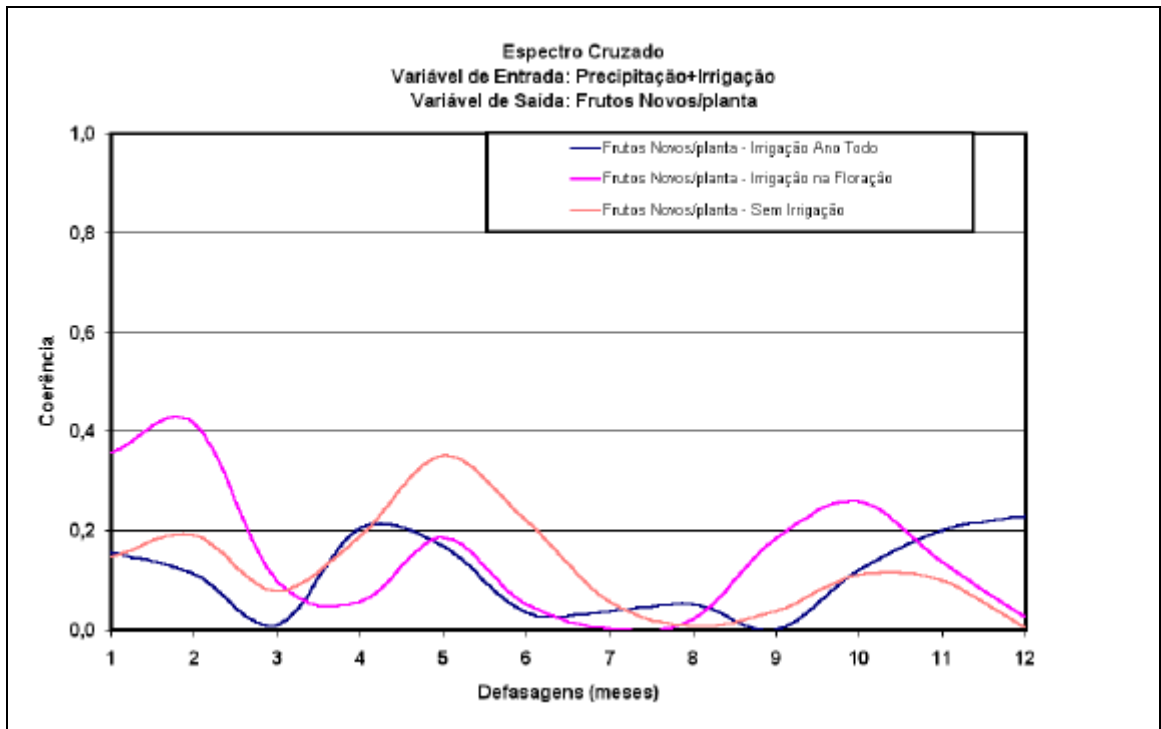


Figura 4.122. Estatística coerência entre a variável (precipitação+irrigação suplementar) e a variável fenológica frutos novos.

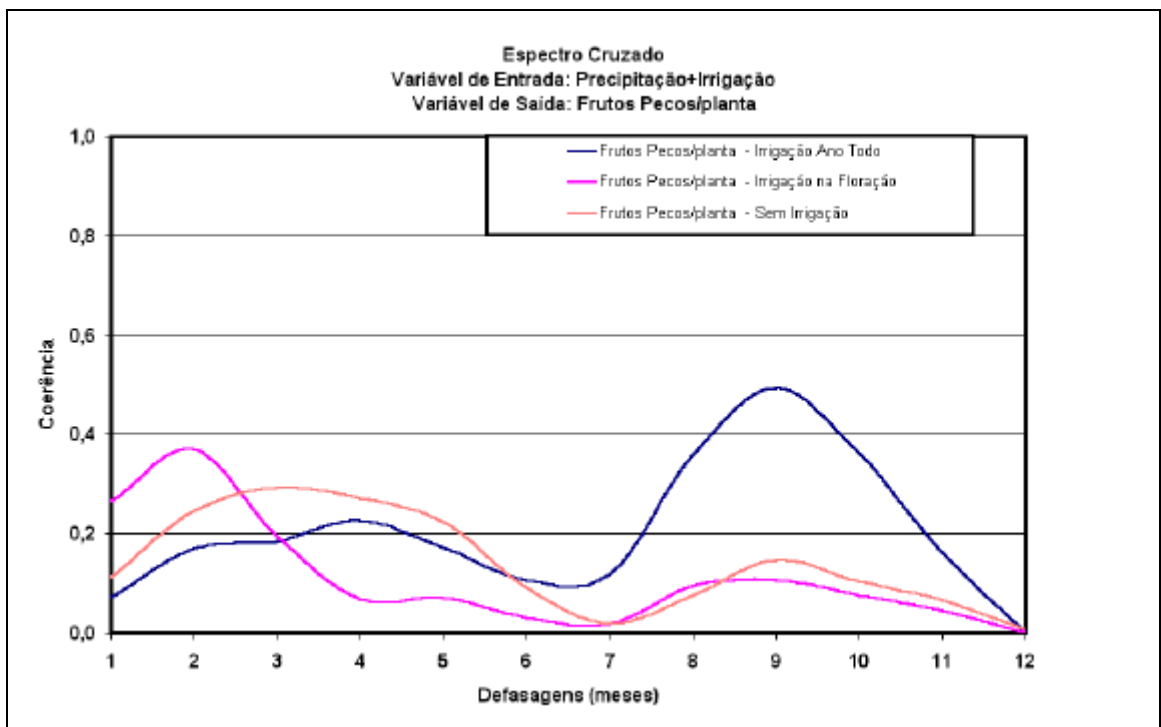


Figura 4.123. Estatística coerência entre a variável (precipitação+irrigação suplementar) e a variável fenológica frutos pecos.

A umidade relativa, por seu turno, que não apresentou respostas vigorosas, exceto para os frutos pecos, pela análise de correlação cruzada (Figuras 4.30 a 4.34), mostrou-se sensível para a análise espectral cruzada. Considerando a variável fenológica queda de flores (Figura 4.89) as curvas mostram tendência de coerência, a três meses de defasagem, para o tratamento 2 e quatro meses para os tratamentos 1 e 3. Apontou também para elevação da coerência, ou seja, da correlação, do ponto de vista de concordância de frequências de ocorrência, à partir da defasagem de 10 meses. A queda de folhas, quando não irrigada a cultura, apresenta marcantes coerências a um e 12 meses de defasagens. Nos tratamentos irrigados esta tendência é amenizada. O lançamento foliar, por sua vez, também no tratamento não irrigado apresenta forte coerência com um mês e sete meses de defasagem. Nos tratamentos irrigados, a coerência do primeiro mês é amenizada, e reduzida paulatinamente, quando o sistema é irrigado durante o ano todo. Entretanto, para a estratégia de irrigar apenas nas fases da floração, a coerência se mantém até o sétimo mês, caindo somente a partir daí. Os frutos novos não seguiram a mesma tendência da floração apresentando picos de coerência entre três e quatro meses de defasagem do evento meteorológico, para os tratamentos irrigados e uma fraca tendência a concordância de fase com quatro meses de defasagem para o tratamento não irrigado. A respostas espectrais dos frutos novos dos tratamentos irrigados foram marcantes à umidade relativa ocorrida sete meses antes. A coerência dos frutos pecos com a umidade relativa somente foi marcante entre quatro e seis meses de defasagem para o tratamento com irrigação durante todo o ano.

As Figuras 4.94 a 4.98, mostram que o comportamento das variáveis fenológicas, excetuado os frutos pecos, correlacionados com a irradiância solar global, seguiram as mesmas tendências do observado para as relações com as temperaturas. Para a queda de folhas, queda de flores, lançamento foliar e frutos novos, picos de coerência a dois a três e a dez ou meses meses, após o evento meteorológico. Os frutos pecos apresentam uma tendência ligeiramente diferente, não nas defasagens, mas na atuação da irrigação. Quando a irrigação é parcial, a resposta à irradiância solar é mais rápida, e na irrigação durante todo o ano, a frequência da resposta parece mais tardia. Comparados com os resultados da correlação cruzada (Figuras 4.35 a 4.39) as diferenças são as mesmas relatadas nas discussões sobre as temperaturas.

Com relação ao fotoperíodo, embora as resultados das diferentes análises estatísticas não sejam enfaticamente congruentes entre si, fato é que independentemente da variável considerada os efeitos do fotoperíodo são notórios. Para a queda de flores (Figura 4.99), duas defasagem são incisivas, dois (2-0,55; 2-0,58; 2-0,39, para os tratamentos 1, 2 e 3) e seis (6-0,40; 6-0,28; 6-0,37, para os tratamentos 1, 2 e 3) meses. Para a queda de folhas (Figura 4.100), dois a três meses, bastante evidente para o tratamento não irrigado (2-0,63; 2-0,54; 2-0,69 e 3-0,54; 3-0,44; 3-0,73, para dos tratamentos 1, 2 e 3). Para o lançamento foliar (Figura 4.101), também entre dois e três meses, sendo tanto maior quanto maior o tempo de plena disponibilidade de água à cultura. Para a frutificação (Figura 4.102), três picos, a dois meses (2-0,40; 2-0,60; 2-0,32), a seis meses (6-0,18; 6-0,17; 6-0,26) e (10-0,29; 10-0,31; 10-0,10), valores sempre referentes, respectivamente aos tratamentos 1, 2 e 3. Nota-se, portanto, que na defasagem dois meses a coerência para o tratamento com irrigação parcial é alto e no tratamento sem irrigação o efeito do fotoperíodo na frutificação tende a arrefecer. Para os frutos pecos (Figura 4.103) percebe-se que para os tratamentos irrigados a coerência espectral máxima ocorre na defasagem de dois meses (2-0,29; 2-0,43, para os tratamentos 1 e 2), enquanto para o tratamento não irrigado, três meses (3-0,39) de defasagem. Um segundo pico de coerência, neste caso, aparentemente, relevante apenas para o tratamento 1, com seis meses de defasagem (6-0,30).

De modo similar a umidade relativa, a insolação, que a análise de correlação cruzada (Figuras 4.45 a 4.49), também não sugeriu efeitos consistentes, houveram alguns resultados interessantes pela análise espectral cruzada. A queda de flores (Figura 4.104) apresentou coerência razoável entre um e dois meses de defasagem para o tratamento 2 (1-0,50; 2-0,51), cinco meses de defasagem para os tratamentos 1 e 2 (respectivamente, 5-0,40; 5-0,33) e 12 meses, novamente e apenas, para o tratamento 1 (12-0,47). A queda de folhas (Figura 4.105) somente apresentou coerência no tratamento 3, na defasagem de um mês (1-0,49), a oito (8-0,29) e nove (8-0,30) meses no tratamento 2, e onze (11-0,28) e doze (12-0,29) meses no tratamento 1. Ou seja, os efeitos da insolação na queda de folhas seriam de mais rápida resposta no tratamento não irrigado, defasando-se e amenizando os efeitos no tempo paulatinamente para os tratamentos com maior disponibilidade temporal plena de água. Sobre o lançamento foliar (Figura 4.106), os efeitos da insolação, no tratamento sem irrigação, teve efeito nulo. Sobre essa variável fenológica, nos tratamentos irrigados, induziu, aparentemente,

o surgimento de dois padrões de coerência. Com dois (2-0,35;2-0,44) e três (3-0,24;3-0,40) meses de defasagem, mais forte, portanto, no tratamento 2, com seis (6-0,36) e sete (7-0,37) meses, sobre o tratamento 2, e de oito a doze meses sobre o tratamento 1 (8-0,35; 9-0,41; 10-0,37; 11-0,39; 12-0,42). Sobre os frutos novos (Figura 4.107) parece que a insolação somente teve efeito sobre o tratamento irrigado durante todo o ano, entre cinco e sete meses após o evento meteorológico. Sobre os frutos pecos (Figura 4.108), os efeitos manifestos foram com um mês de defasagem no tratamento 2 (1-0,26), quatro meses de defasagem no tratamento sem irrigação (4-0,25) e entre oito (8-0,41) e nove (9-0,41) meses de defasagem no tratamento 1.

Sobre todas as variáveis fenológicas (Figuras 4.109 a 4.113), a velocidade do vento, pelos resultados da análise espectral, aparentemente, apresentou ao menos algum pequeno efeito com defasagem de dois meses. Entretanto, os mais evidentes foram somente sobre o lançamento foliar (Figura 4.111) e frutos pecos (Figura 4.113). No primeiro caso os efeitos foram mais evidentes no tratamento 2 (2-0,39), seguido do 1 (2-0,37), irrigados, portanto, e finalmente do 3 (2-0,29). No segundo caso, mais pronunciado, também com dois meses de defasagem (2-0,45; 2-0,35; 2-0,20; respectivamente para os tratamentos 2, 3 e 1).

Os efeitos da evapotranspiração são bem mais notáveis. Sobre a queda de flores, (Figura 4.114) nas defasagens dois (2-0,75; 2-0,57; 2-0,20) e três meses (3-0,69; 3-0,55; 3-0,20; para os tratamentos 2, 3 e 1, respectivamente). Portanto, os efeitos da evapotranspiração, sobre a queda das flores, pela análise espectral cruzada são mais evidentes sobre o tratamento 2, seguindo-se o 1. Sobre o tratamento 1, na defasagem 11 (11-0,50) e 12 (12-0,53) meses surge outro pico de coerência.

Sobre a queda de folhas (Figura 4.115), a evapotranspiração, parece exercer efeitos mais rápidos nos tratamentos irrigados, que apresentam pico de coerência com um (1-0,49) e dois (2-0,56) meses de defasagem, sobre o tratamento 1, dois meses (2-0,38) sobre o tratamento 2 e três meses (3-0,51) sobre o tratamento 3. Os efeitos se repetem com 9 a 10 meses (9-0,43; 10-0,43) de defasagem apenas para o tratamento 3.

A evapotranspiração, aparentemente, exerce maior efeito sobre os lançamento foliar (Figura 4.116) até três meses após o evento (1-0,54; 1-0,40; 2-0,67; 2-0,54; 3-0,63; 3-0,54 para os tratamentos 1 e 2), em especial sobre os tratamentos irrigados. Posteriormente, de modo mais enfático apenas sobre o tratamento com irrigação durante o ano todo, acima de 10 meses de defasagem (10-0,37; 11-0,40; 12-0,41).

A atuação da evapotranspiração sobre a frutificação (Figura 4.117) se dá mais enfaticamente sobre o tratamento 2. A dois e três meses de defasagem a coerência, respectivamente, dos tratamentos, 2, 1 e 3 são (2-0,49; 2-0,38; 2-0,25) e (3-0,46; 3-0,35; 3-0,20). No médio prazo apenas sobre os tratamento 2 são sentidos efeitos da evapotranspiração sete (7-0,39) a oito (8-0,32) meses após.

Nos pecos (Figura 4.118) a evapotranspiração apresenta efeitos mais sensíveis sobre os tratamentos irrigados. Num prazo curto (2-0,36; 3-0,33) e médio (6-0,34) sobre o tratamento 2. Em prazo mais longo (9-0,30) sobre o tratamento 1.

A variável (precipitação+irrigação suplementar), sobre a variável queda de flores (Figura 4.119) basicamente tem seu efeito mais evidente sobre o tratamento em que a estratégia de irrigação concentra-se na fase de floração, dois meses após o evento (2-0,50). Sobre o tratamento 1 o efeito se lança no longo prazo (12-0,45). Os efeitos sobre a queda de folhas (Figura 4.120) se concentram no curto prazo para todos os tratamentos (1-0,49, para o tratamento 1), (2-0,47; 2-0,31; 2-0,42; para os tratamentos 1, 2 e 3), e no longo prazo apenas para o tratamento 3, não irrigado (10-0,39; 11-0,35; 12-0,34).

A atuação da variável (precipitação+irrigação suplementar) sobre o lançamento foliar (Figura 4.121) concentra-se, basicamente, no curto prazo, em especial, nos tratamentos irrigados (1-0,61; 2-0,51; para o tratamento 1) e (1-0,43; 2-0,55; para o tratamento 2).

Sobre a frutificação (Figura 4.122) a variável (precipitação+irrigação suplementar) pouco age sobre o tratamento com irrigação durante todo o ano, talvez em razão da disponibilidade constante de água que inibe os efeitos benéficos, muitas vezes do estresse hídrico. Sobre o tratamento não irrigado, que depende das chuvas e sua sazonalidade característica, mesclado com irregularidades aleatórias, os efeitos são sentidos cinco meses após o evento (5-0,35). No caso do tratamento com irrigações suplementares durante a floração dois picos são mais notórios. O primeiro de curto prazo (1-0,36; 2-0,42), e o segundo, mais fraco, de longo prazo (10-0,26).

Os frutos pecos (Figura 4.123) sentem os efeitos da evapotranspiração no curto prazo, o tratamento 2 (2-0,37), o tratamento 3 (3-0,29; 4-0,27) e um forte pico de coerência de médio-longo prazo no tratamento 1 (9-0,49).

Deve ser frisado que por terem estruturas matemáticas e argumentos distintos, a correlação cruzada atuando no domínio do tempo, e a análise espectral, no domínio da frequência, os resultados obtidos são diversos, embora, muitas vezes complementares, para se avaliar um mesmo fenômeno.

4.1.2.2.2. Análise espectral cruzada entre as variáveis fenológicas de um mesmo tratamento

Os resultados da análise espectral cruzada entre as séries fenológicas de um mesmo tratamento encontram-se sintetizados nas Figuras 4.124 a 4.138. As Figuras 4.124 a 4.128 representam graficamente os espectros cruzados das variáveis fenológicas do Tratamento 1, modificando-se em cada uma delas a variável de entrada na ordem a saber: queda de flores, queda de folhas, lançamento foliar, frutos novos e frutos pecos. Analogamente, as Figuras 4.129 a 4.133 e 4.134 a 4.138 representam as mesmas funções para os Tratamentos 2 e 3, respectivamente. Na discussão a seguir os números entre parênteses, seguirão o modelo (DF-CO), em que, CO os valores numéricos da estatística coerência entre as variáveis avaliadas considerando a defasagem temporal, DF, em meses. Nestas avaliações normalmente será adotado o maior valor de CO e a respectiva DF.

Na ausência de um valor limite para testar-se a significância do valor da coerência, apenas para adotar um valor de modo a facilitar a discussão, optou-se por adotar um valor o 0,32, bastante recorrente, visualmente, e um pouco inferior ao limite considerado para a correlação cruzada. Na discussão que se seguirá picos de coerência menores que esse valor serão desconsiderados, a menos que ele seja o mais evidente.

Avaliando o tratamento 1 (Figuras 4.124 a 4.129) considerando-se a variável queda de flores como variável de entrada (Figura 4.124), as variáveis que mais se relacionam com a variável de entrada são os frutos pecos, com defasagens até cinco meses (1-0,70), com os frutos novos com alta coerência, também até cinco meses (1-0,84), sendo que no longo prazo, para os frutos novos surge outro pico com defasagens maiores que 10 meses (11-0,50) e com o lançamento foliar no curto prazo, até três meses (2-0,39; 3-0,39) e no longo prazo, em 11 meses (11-0,39).

A queda de folhas como variável de entrada (Figura 4.125), por outro lado, se correlaciona com o lançamento foliar no curto, dois meses (2-0,42) e longo prazos, além de 10 meses (12-0,48) e com os frutos novos, com dois meses de defasagem (2-0,34).

O lançamento foliar (Figura 4.126), obviamente, se correlaciona com a queda de folhas, e de flores, nas mesmas frequências já descritas. Apresenta boa correlação também com os frutos novos, no médio prazo, sete a oito meses entre eventos fenológicos (8-0,40).

Os frutos novos (Figura 4.127), como variável de entrada, apresenta alta coerência com todas as outras variáveis fenológicas, variando apenas de intensidade. com a queda de flores relaciona-se em quase todas as defasagens, exceto nas defasagens sete a nove meses, (1-0,84; 2-0,77; 3-0,72; 4-0,69; 11-0,50). Com os frutos pecos, até cinco meses (1-0,76; 2-0,65). Com a queda de folhas, com dois meses de defasagem (2-0,34). Com o lançamento foliar, a sete e oito meses (8-0,40).

Considerando os frutos pecos (Figura 4.128), como variável de entrada, nota-se que estes correlacionam-se, com defasagens de até 5 meses, principalmente, com a queda de flores (1-0,70; 2-0,57) e com os frutos novos (1-0,76; 2-0,65).

No tratamento 2, iniciando com a queda de flores como variável de entrada (Figura 4.129), apresenta as maiores coerências com os frutos novos até cinco meses de defasagem entre eles (1-0,79; 2-0,79; 3-0,81; 4-0,77) e com os pecos até cinco meses (1-0,75; 2-0,61) e de sete meses em diante (11-0,61; 12-0,68). No entanto, também se correlaciona com as outras variáveis: com a queda de folhas até dois meses (1-0,48) e de dez meses em diante (12-0,68), bem como com o lançamento foliar entre dois e quatro meses (3-0,64).

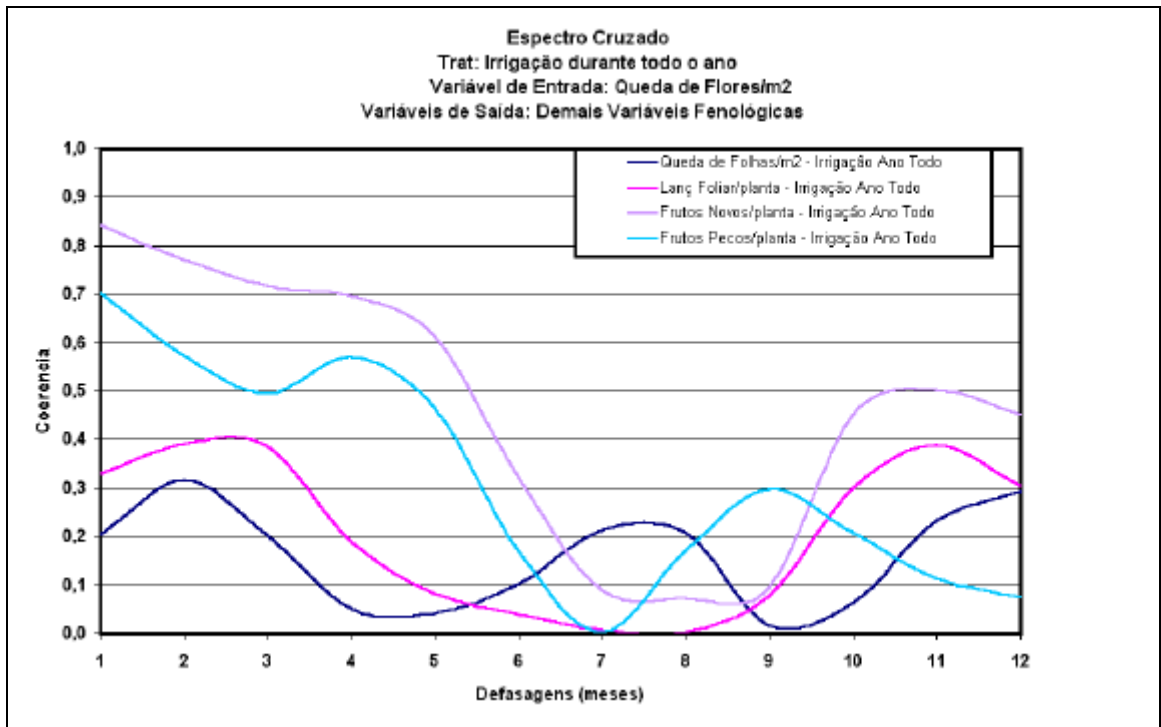


Figura 4.124. Coerência entre as variáveis fenológicas do Tratamento 1.
 Variável de entrada:....Queda de flores/m².

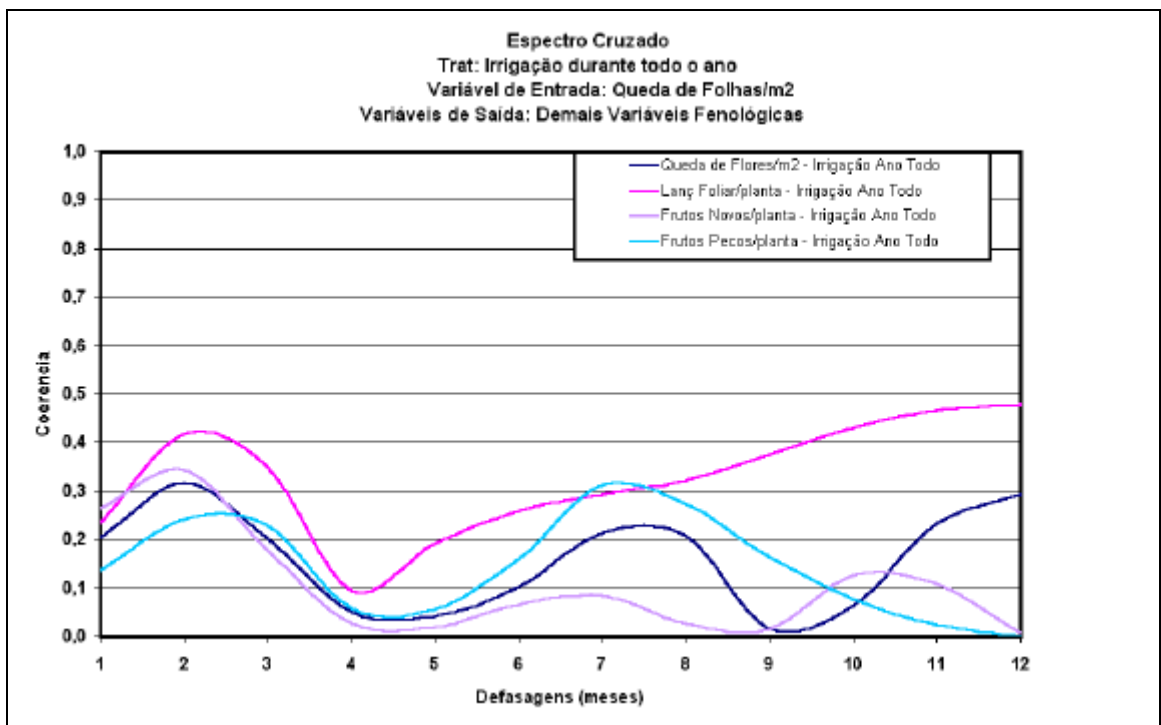


Figura 4.125. Coerência entre as variáveis fenológicas do Tratamento 1.
 Variável de entrada:....Queda de folhas/m².

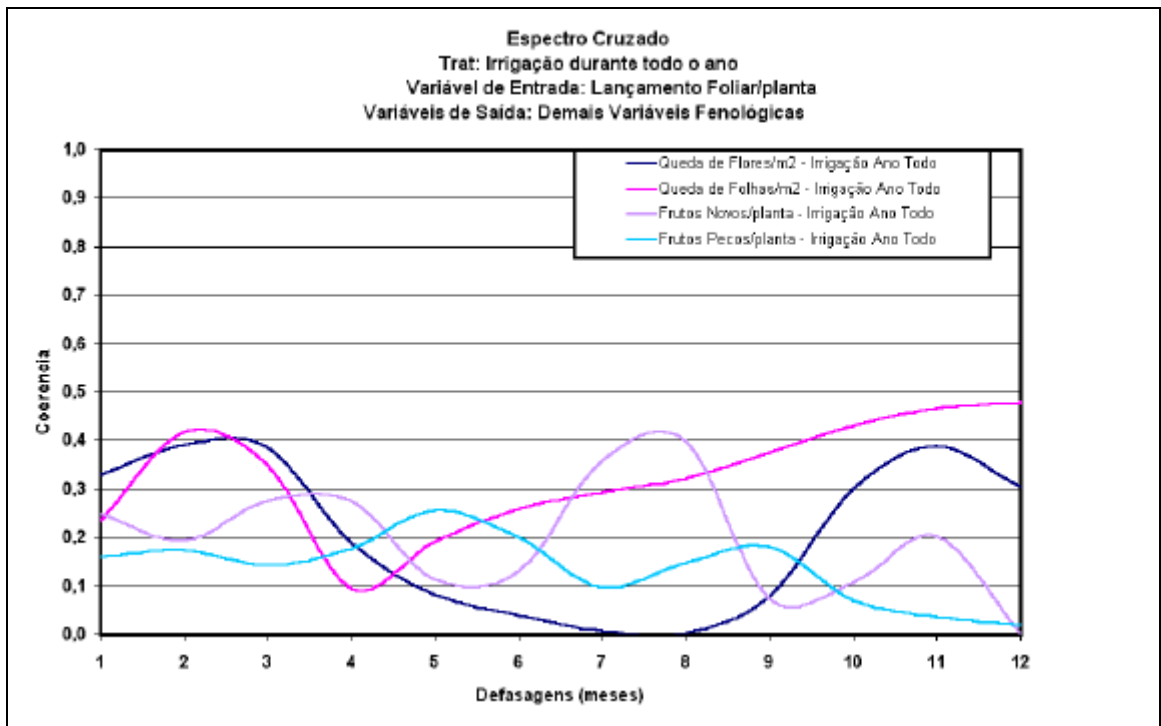


Figura 4.126. Coerência entre as variáveis fenológicas do Tratamento 1.
 Variável de entrada:....Lançamento foliar/planta.

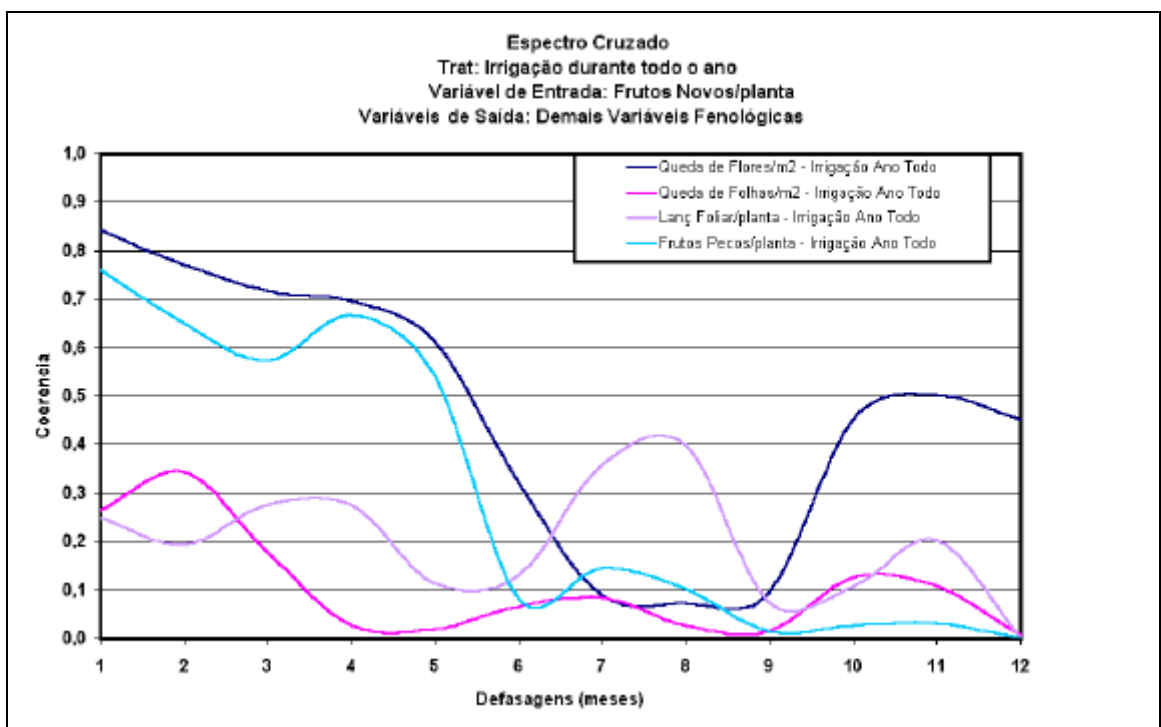


Figura 4.127. Coerência entre as variáveis fenológicas do Tratamento 1.
 Variável de entrada:....Frutos novos/planta.

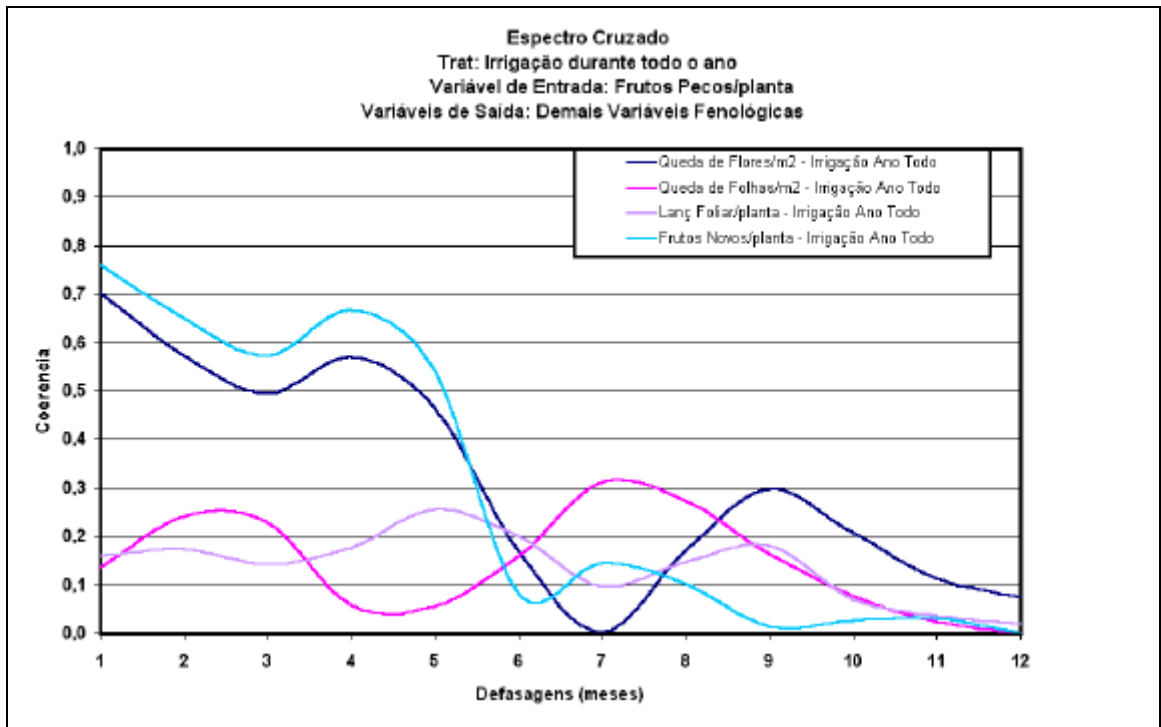


Figura 4.128. Coerência entre as variáveis fenológicas do Tratamento 1.
 Variável de entrada:....Frutos pecos/planta.

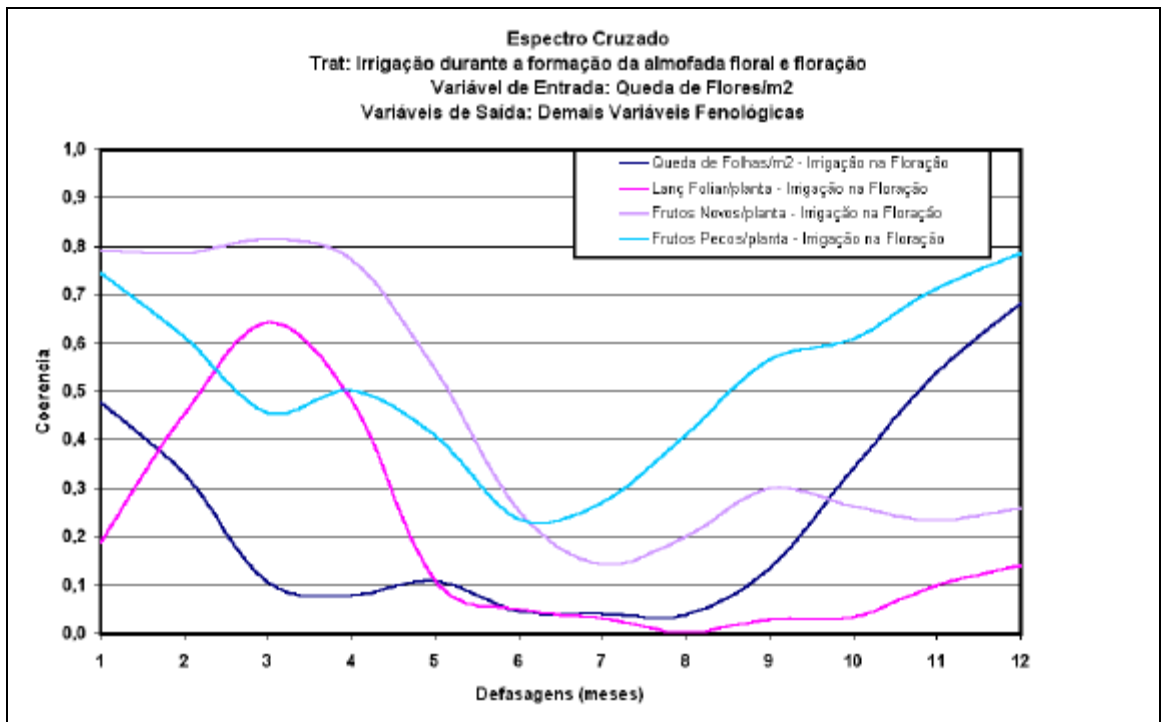


Figura 4.129. Coerência entre as variáveis fenológicas do Tratamento 2.
 Variável de entrada:....Queda de flores/m².

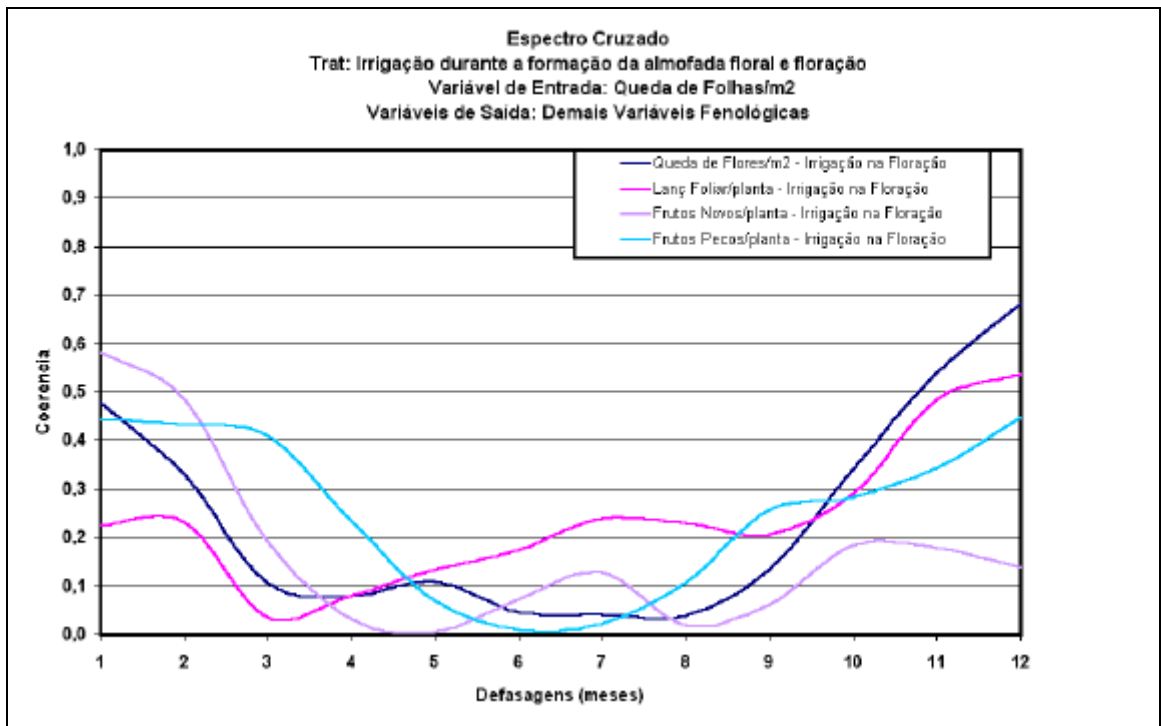


Figura 4.130. Coerência entre as variáveis fenológicas do Tratamento 2.
 Variável de entrada:....Queda de folhas/m².

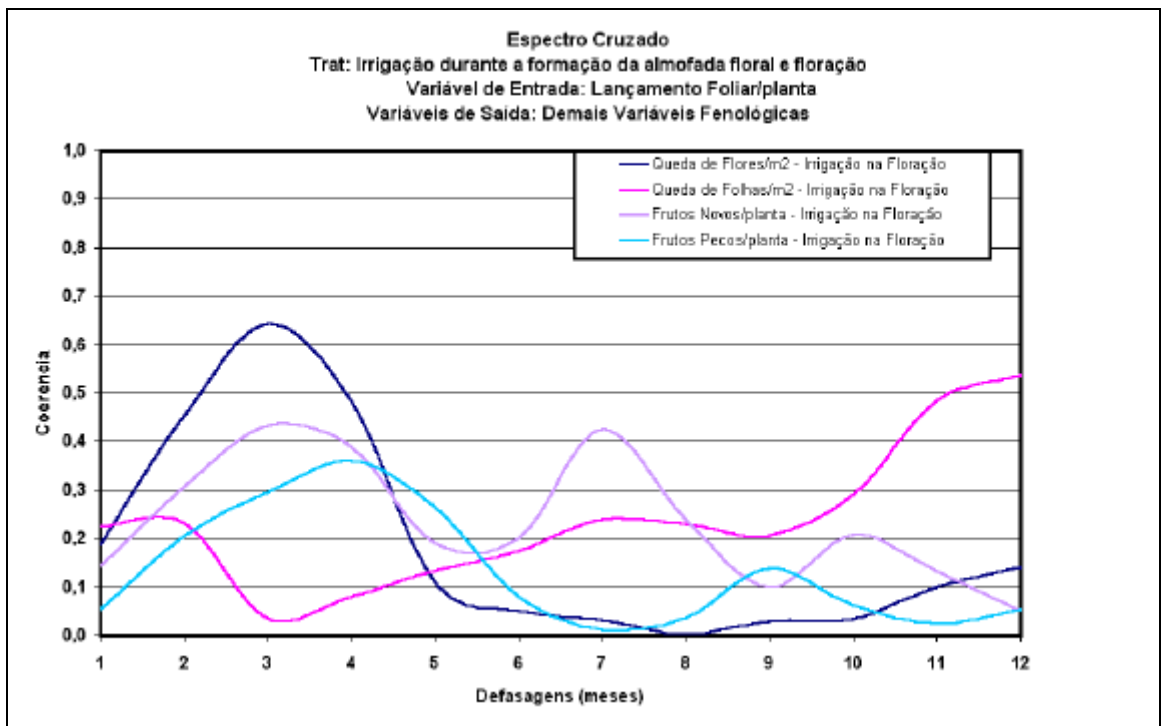


Figura 4.131. Coerência entre as variáveis fenológicas do Tratamento 2.
 Variável de entrada:....Lançamento foliar/planta.

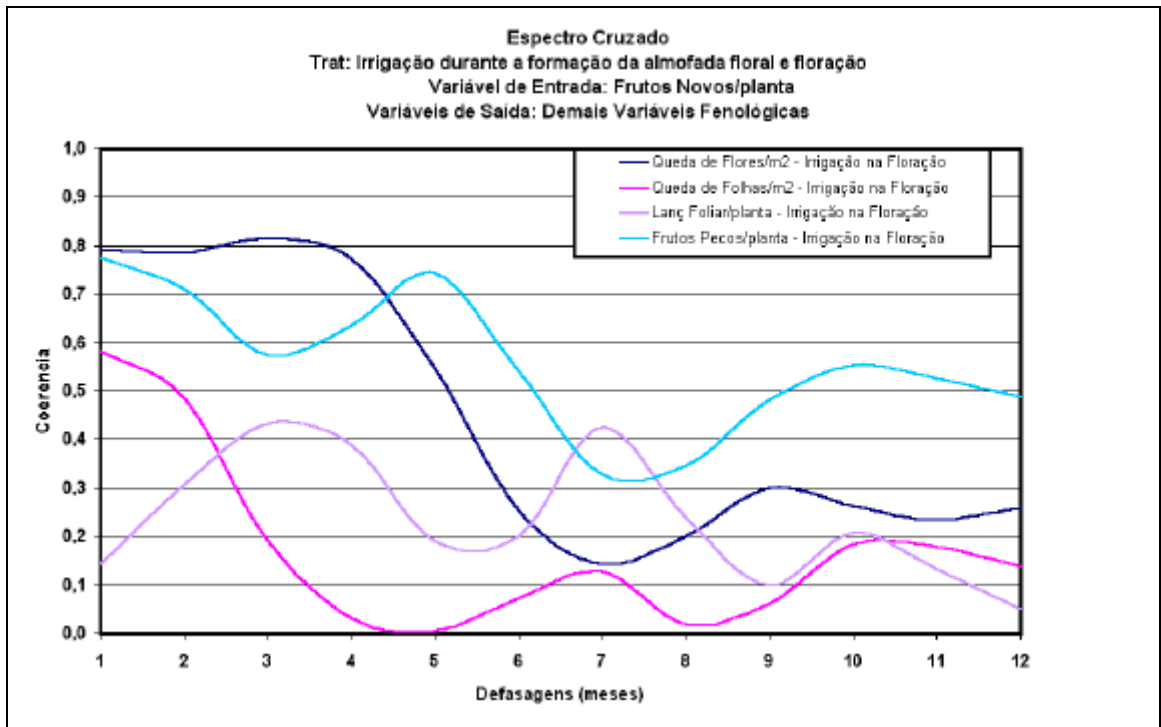


Figura 4.132. Coerência entre as variáveis fenológicas do Tratamento 2.
 Variável de entrada:....Frutos novos/planta.

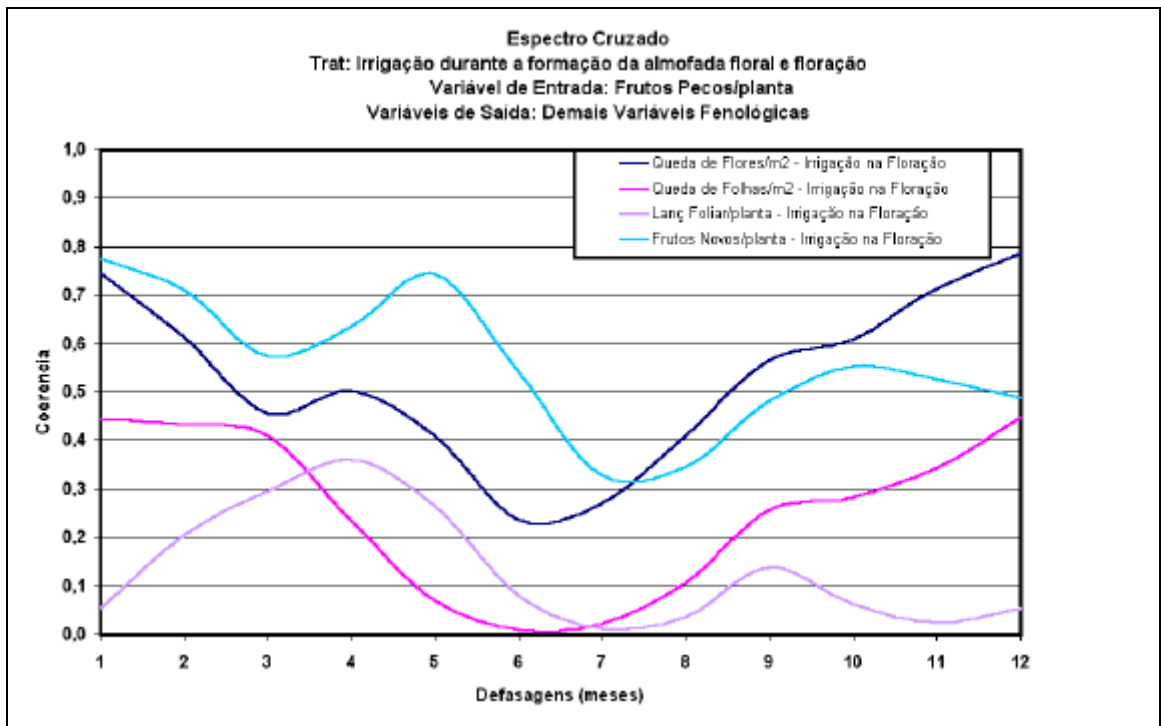


Figura 4.133. Coerência entre as variáveis fenológicas do Tratamento 2.
 Variável de entrada:....Frutos pecos/planta.

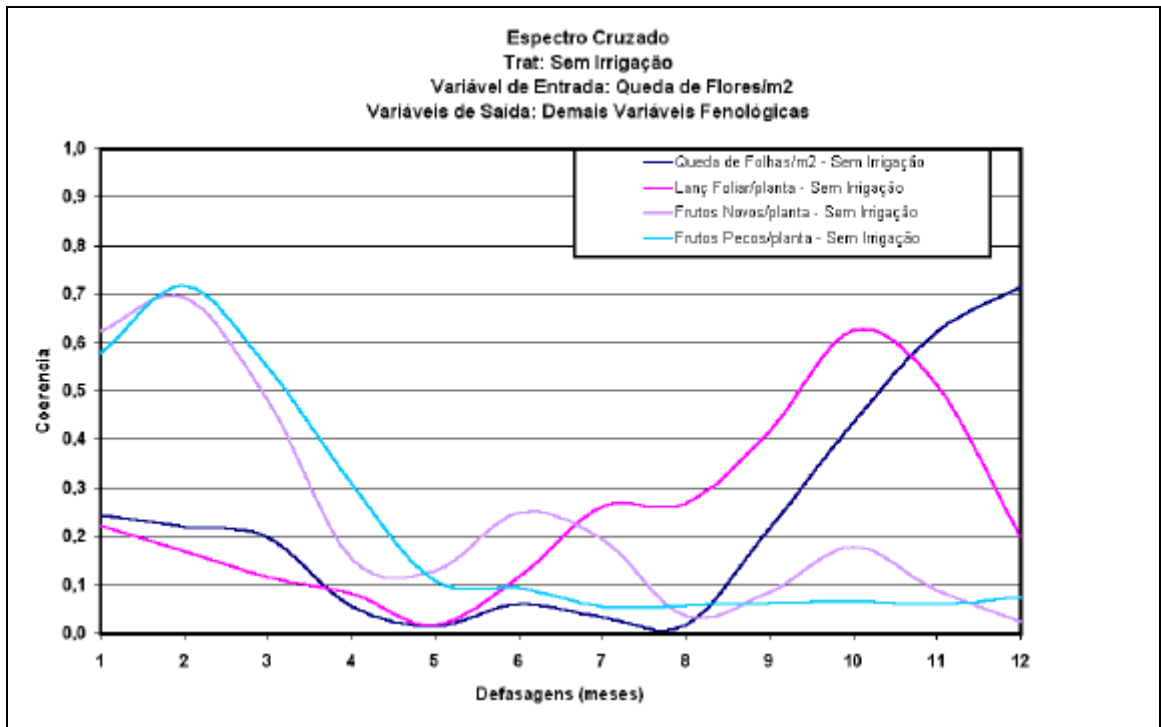


Figura 4.134. Coerência entre as variáveis fenológicas do Tratamento 3.
 Variável de entrada:....Queda de flores/m².

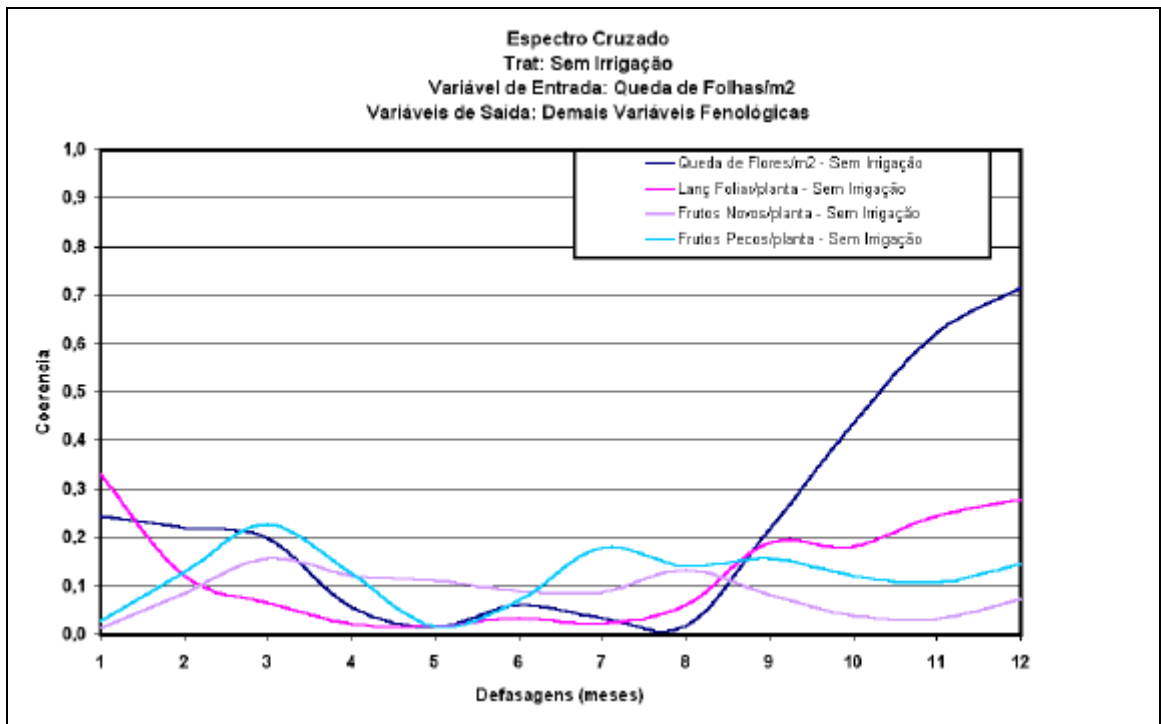


Figura 4.135. Coerência entre as variáveis fenológicas do Tratamento 3.
 Variável de entrada:....Queda de folhas/m².

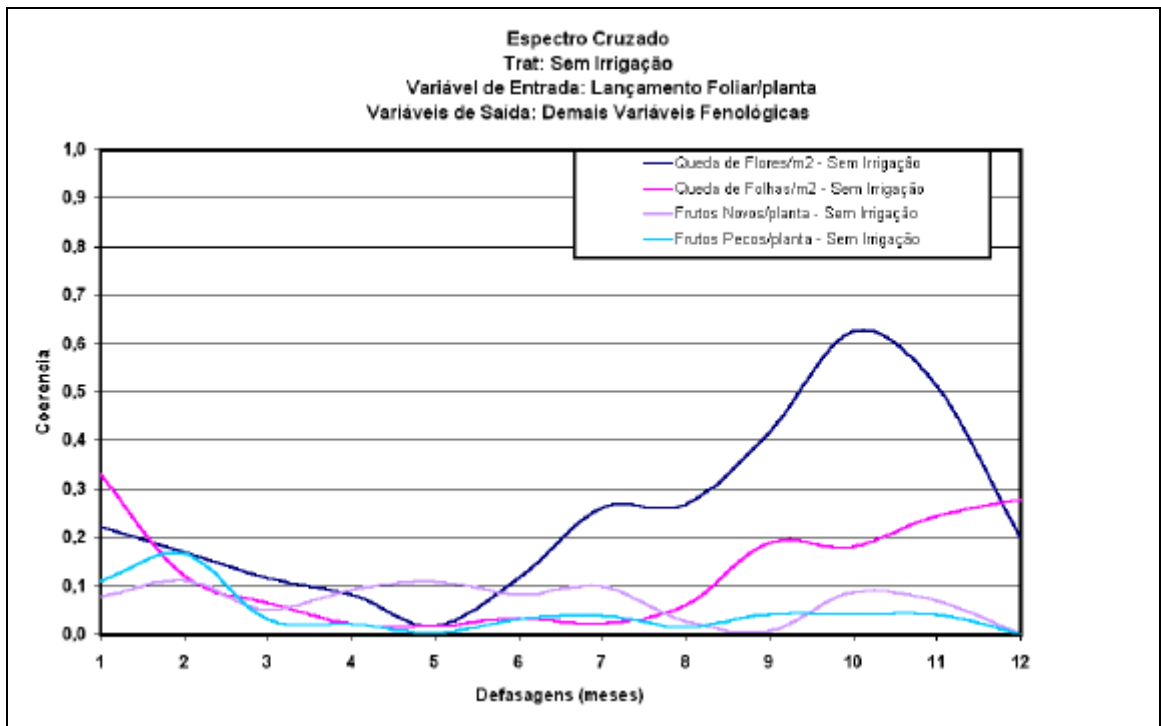


Figura 4.136. Coerência entre as variáveis fenológicas do Tratamento 3.
 Variável de entrada:....Lançamento foliar/planta.

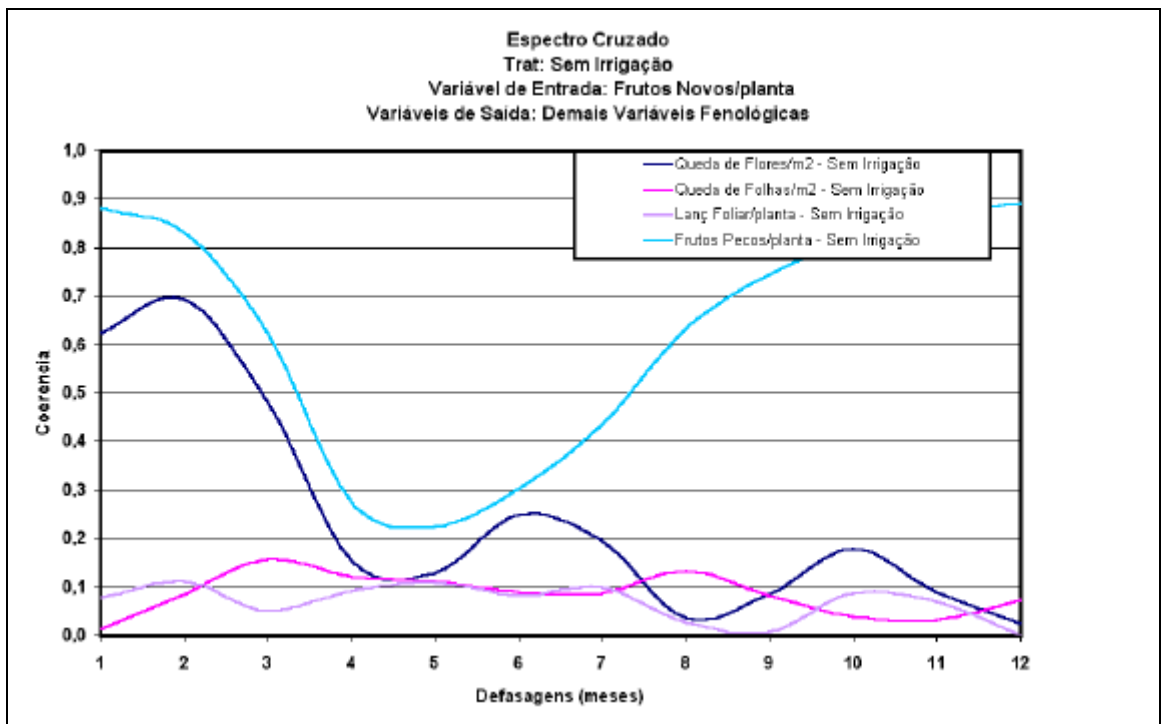


Figura 4.137. Coerência entre as variáveis fenológicas do Tratamento 3.
 Variável de entrada:....Frutos novos/planta.

A queda de folhas como variável de entrada (Figura 4.130) mostra boas correlações apenas nas defasagens extremas: com a queda de flores (1-0,43) e (11-0,54; 12-0,68), com o lançamento foliar, apenas no longo prazo (11-0,48; 12-0,54), com os frutos novos, no curto prazo (1-0,48; 2-0,58) e também com os frutos pecos, no curto (1-0,45; 2-0,43) e longo prazos (11-0,34; 12-0,45).

O lançamento foliar como variável de entrada (Figura 4.131) aponta para correlações com a queda de folhas no longo prazo (11-0,48; 12-0,54), com a queda de flores, entre dois e quatro meses (3-0,64), com os frutos novos, a três (3-0,43), quatro (4-0,39) e sete (7-0,43) meses e com os frutos pecos a quatro meses de defasagem (4-0,36). Os frutos novos como variável de entrada (Figura 4.132), apresenta grande coerência com a queda de folhas até cinco meses (1-0,79; 2-0,79; 3-0,81; 4-0,77) e com os frutos pecos em todas as 12 defasagens (1-0,77; 2-0,71; 5-0,74; 8-0,35; 10-0,55; 12-0,49). Os frutos pecos como variável de entrada (Figura 4.133) relacionam-se principalmente, com os citados frutos novos durante todo o ano, com a queda de flores até cinco meses (1-0,75; 2-0,61) e de sete meses em diante (11-0,61; 12-0,68), mas também com a queda de folhas no curto (1-0,45; 2-0,43) e longo prazos (11-0,34; 12-0,45), bem como com o lançamento foliar, embora em apenas uma defasagem, quatro meses (4-0,36).

Interpretando o tratamento 3, considerando queda de flores como variável de entrada (Figura 4.134), nota-se que as maiores coerências com esta variável dá-se, no curto prazo, até três meses, com os frutos novos (1-0,62; 2-0,69) e com os pecos (1-0,58; 2-0,75; 3-0,55). No longo prazo, além de nove meses, relaciona-se com as outras duas variáveis: queda de flores (11-0,62; 12-0,71) e lançamento foliar (10-0,63). A queda de folhas como variável de entrada (Figura 4.135) apresenta coerência maiores que 0,32 apenas com o lançamento foliar na defasagem um mês (1-0,33) e com a queda de flores no longo prazo (11-0,62; 12-0,71). O lançamento foliar como variável de entrada (Figura 4.136), correlaciona-se com a queda de folhas em um mês (1-0,33) e com a queda de flores entre nove e 11 meses (10-0,63). Os frutos novos como variável de entrada (Figura 4.137) apresentam alta coerência com a queda de flores no curto prazo, até três meses (1-0,62; 2-0,69), e com os frutos pecos até três meses (1-0,88; 2-0,83) e de sete meses em diante (9-0,74; 10-0,81; 11-0,87; 12-0,89). Os frutos pecos como variável de entrada (Figura 4.138), como já mencionado relaciona-se principalmente com os frutos novos e com a queda de flores no curto prazo (1-0,58; 2-0,75; 3-0,55).

4.1.2.2.3. Análise espectral cruzada entre as variáveis fenológicas de tratamentos diferentes

Os resultados da análise espectral cruzada entre as séries fenológicas de tratamentos diferentes encontram-se sintetizados nas Figuras 4.139 a 4.143. Cada figura compara os espectros cruzados de uma variável fenológica, considerando como variável de entrada aquela referente ao Tratamento 3. A ordem das variáveis fenológicas apresentadas é queda de flores, queda de folhas, lançamento foliar, frutos novos e frutos pecos. Na discussão a seguir os números entre parênteses, seguirão o modelo (DF-CO), em que, CO os valores numéricos da estatística coerência entre as variáveis avaliadas considerando a defasagem temporal, DF, em meses. Nestas avaliações serão transcritos os maiores valores de coerência e as respectivas defasagens.

Na ausência de um valor limite para testar-se a significância do valor da coerência, apenas para adotar um valor de modo a facilitar a discussão, optou-se por adotar um valor 0,32, bastante recorrente, visualmente, e um pouco inferior ao limite considerado para a correlação cruzada. Na discussão que se seguirá picos de coerência menores que esse valor serão desconsiderados, a menos que ele seja o mais evidente.

Considerou-se como variáveis de entrada, sempre as séries fenológicas do tratamento 3, testemunha, sem irrigação, afim de comparar quais os efeitos da irrigação em relação a este tratamento.

A comparação entre as séries de queda de flores (Figura 4.139) mostra que a coerência entre o tratamento 1 com o tratamento 3, apresenta de razoável a boa correlação da defasagem três meses em diante (4-0,57; 5-0,63; 6-0,59; 11-0,58; 12-0,60). Entre os tratamentos 2 e 3, dá-se entre as defasagens quatro e seis (5-0,51; 6-0,55) e com 12 meses (12-0,33).

Figura 4.138. Coerência entre as variáveis fenológicas do Tratamento 3.
Variável de entrada:....Frutos pecos/planta.

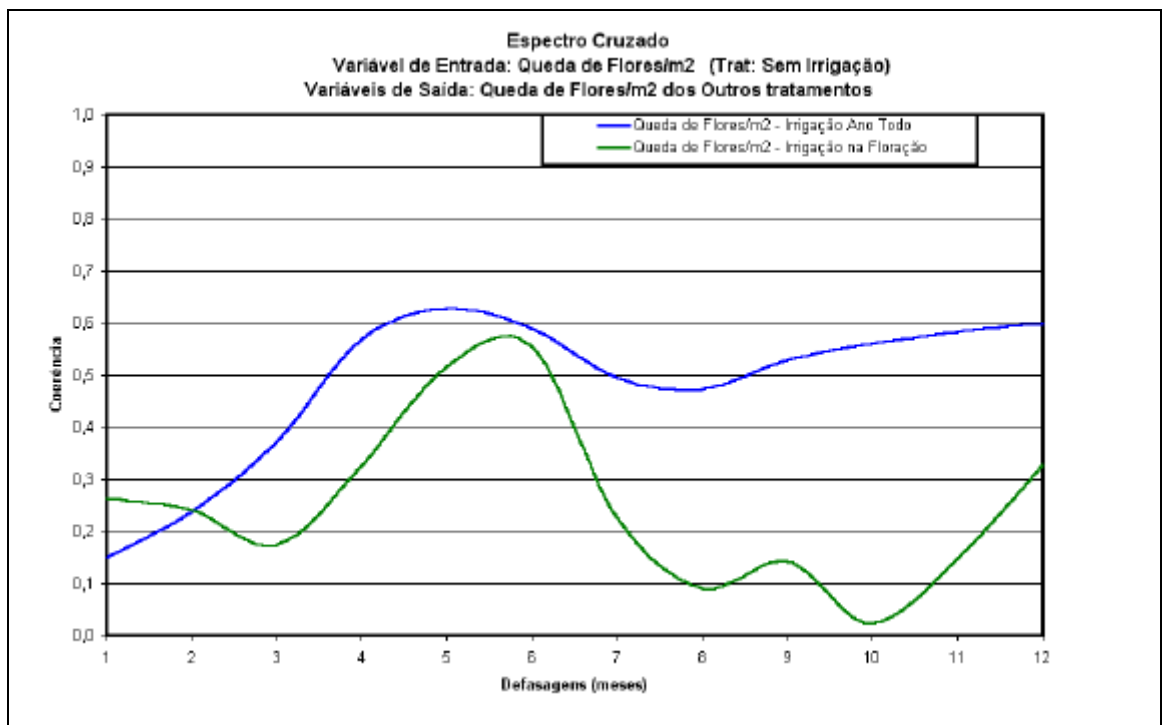
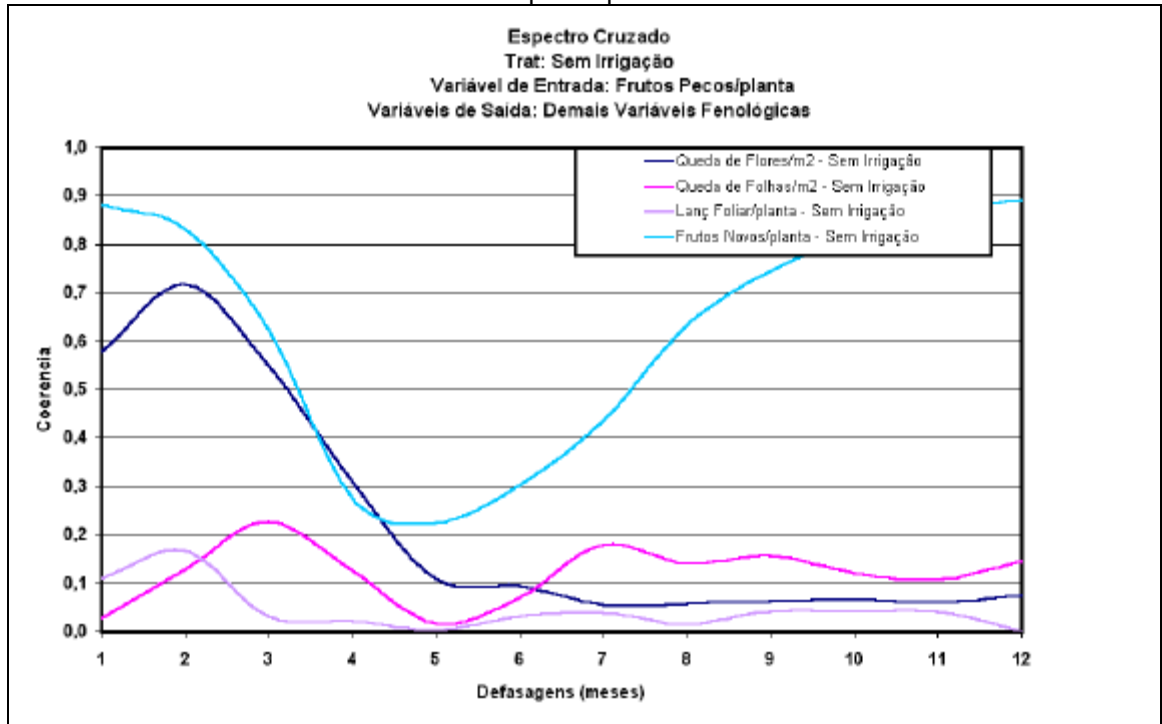


Figura 4.139. Coerência entre as variáveis fenológicas Queda de Flores/m².
Tratamento da Variável de entrada:....3 - Não irrigado

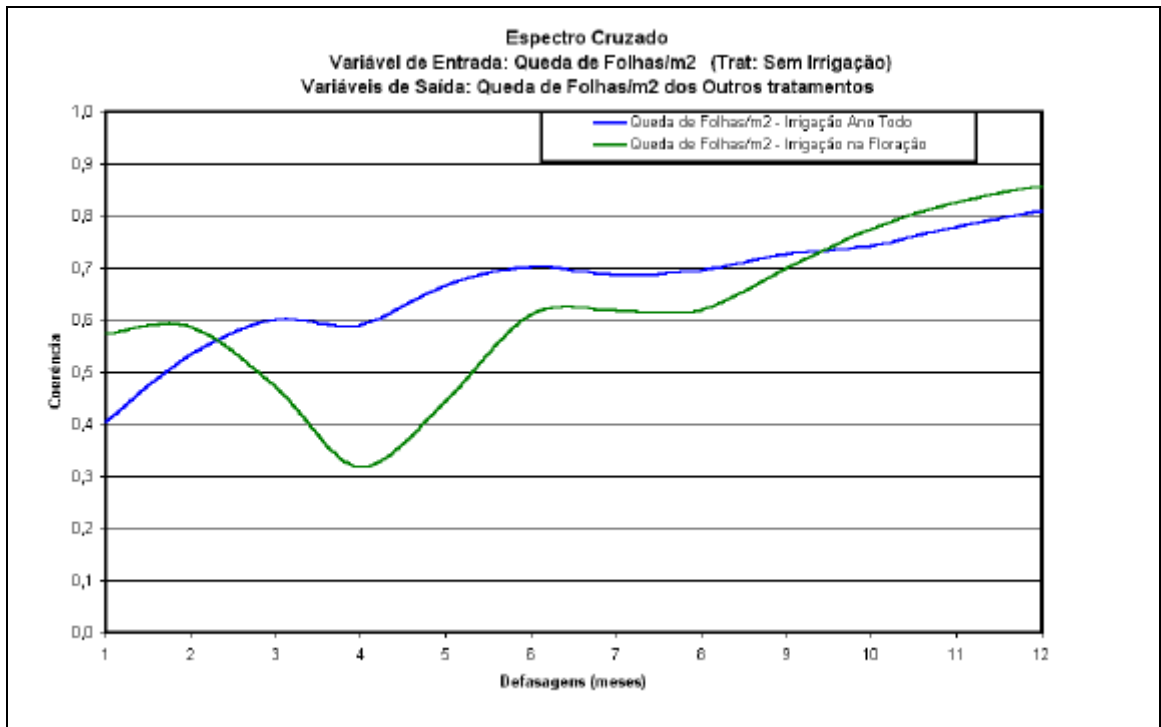


Figura 4.140. Coerência entre as variáveis fenológicas Queda de Folhas/m².
 Tratamento da Variável de entrada:....3 - Não irrigado

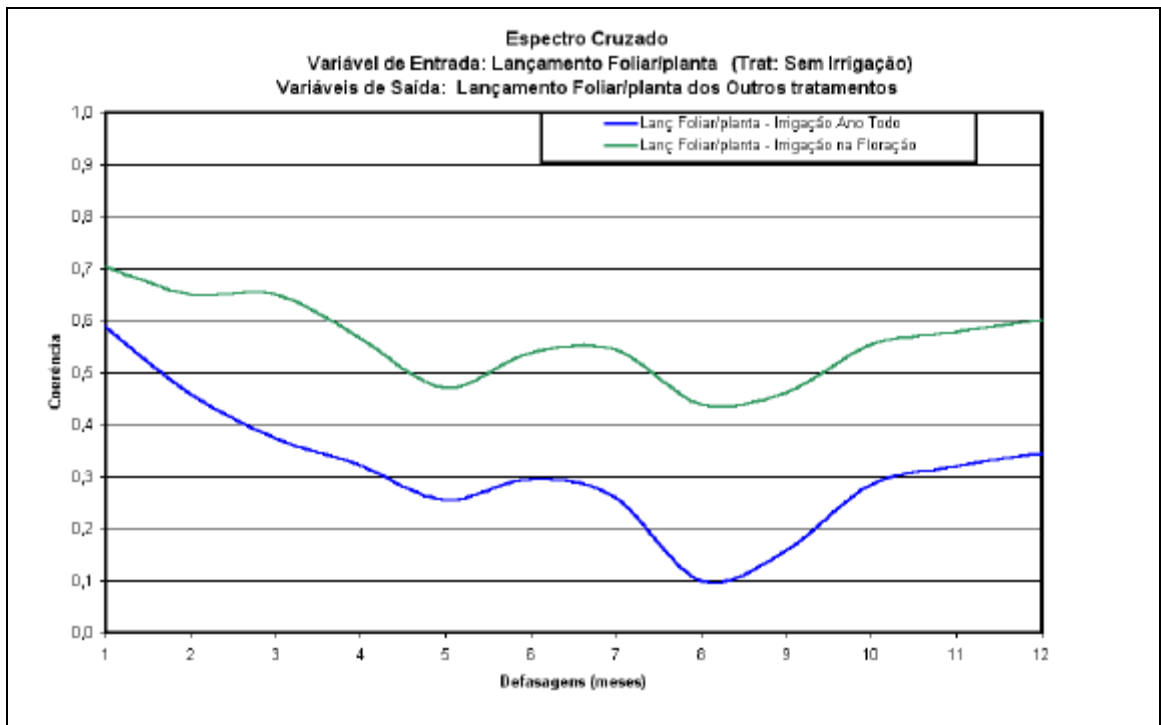


Figura 4.141. Coerência entre as variáveis fenológicas Lançamento foliar/planta.
 Tratamento da Variável de entrada:....3 - Não irrigado

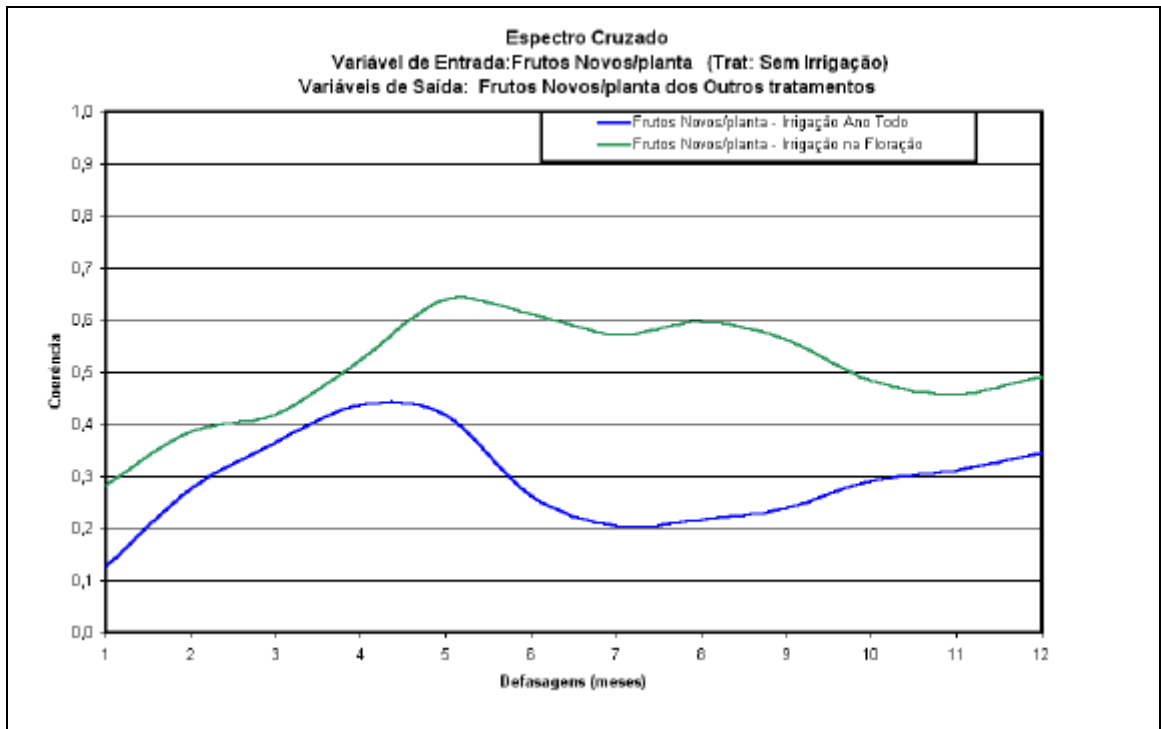


Figura 4.142. Coerência entre as variáveis fenológicas Frutos novos/planta. Tratamento da Variável de entrada:....3 - Não irrigado

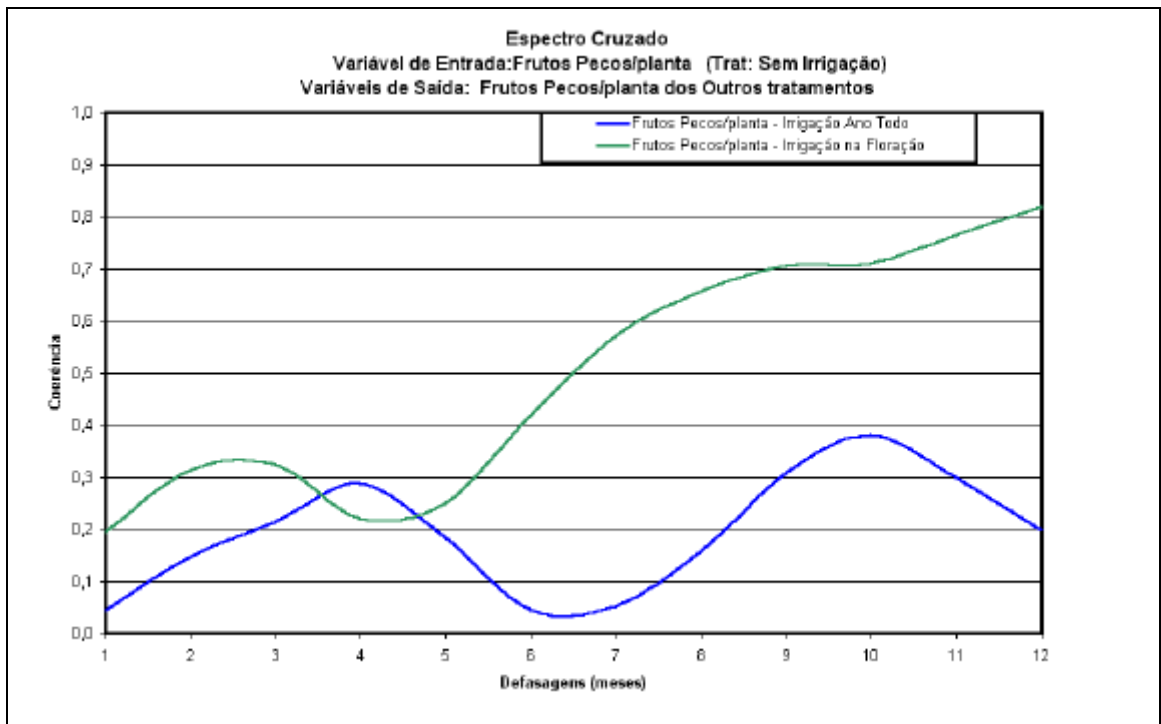


Figura 4.143. Coerência entre as variáveis fenológicas Frutos pecos/planta. Tratamento da Variável de entrada:....3 - Não irrigado

As séries de queda de folhas (Figura 4.140) comparadas revelam que entre o tratamento 1 e o tratamento 3, em todos os meses a correlação é alta (3-0,60; 6-0,70; 9-0,73; 11-0,78; 12-0,81). Entre os tratamentos 2 e 3, apenas na defasagem de quatro meses a estatística coerência mostrou-se inferior a 0,32 (1-0,57; 2-0,49; 7-0,62; 11-0,82; 12-0,86).

As séries de lançamento foliar (Figura 4.141), na comparação entre os tratamentos 1 e 3 mostram que as coerências são superiores apenas no curto prazo (1-0,59; 2-0,46), enquanto a comparação entre as séries dos tratamentos 2 e 3 são altas no curto prazo (1-0,70; 2-0,65; 3-0,65), embora permaneçam relativamente altas em todas as defasagens (6-0,54; 11-0,58; 12-0,60).

As séries de frutos novos (Figura 4.142), na comparação entre os tratamentos 1 e 3, mostram coerências relativamente baixas, em relação às descritas neste item. São superiores a 0,32 apenas entre as defasagens três e cinco (4-0,44) e na 12 (12-0,34). Por outro lado, a comparação dos tratamentos 2 e 3 mostram similaridades praticamente em todas as defasagens, (2-0,38; 5-0,64; 7-0,57; 11-0,46; 12-0,49).

As séries de frutos pecos (Figura 4.143) do tratamento 3 comparado com o tratamento 1 mostrou pequena coerência. Apenas na defasagem 10, superou o valor 0,32 (10-0,38). No entanto, seguindo o padrão das outras variáveis, na comparação do tratamento 2 com o 3, a coerência mostrou-se maior de médio a longo prazos (6-0,42; 8-0,66; 9-0,71; 12-0,82).

Estas considerações podem levar erroneamente à conclusão que o tratamento 2 e o 3 se assemelham, o que refutaria as discussões em outras partes deste trabalho. Então, afim de eliminar essa dúvida, serão tecidos, resumidamente, alguns comentários sobre a estatística coerência associadas às comparações das variáveis fenológicas dos tratamentos 1 e 2.

Sobre a queda de flores os maiores valores de coerência situam-se em até seis meses com valores entre 0,56 e 0,79. Para a queda de flores, as coerências são altas em todas as defasagens com valores entre 0,70 e 0,89. Para o lançamento foliar, as coerências também são altas em todas as defagens com valores entre 0,51 a 0,91. Os frutos novos apresentam altas coerências em todas as defasagens, com valores entre 0,61 a 0,90 e finalmente os frutos pecos apresentam altas coerências em sete das 12 defasagens com os maiores valores entre 0,34 a 0,80.

5. Conclusões

ne, sutor, ultra crepidam

A análise canônica foi eficiente na detecção das altas correlações entre os grupos das variáveis meteorológicas com o das fenológicas, mesmo em se tratando de séries temporais. Foi capaz de separar os tratamentos, sugerindo o maior grau de similaridade entre os tratamentos irrigados entre si, do que qualquer um deles em relação à testemunha, sem irrigação. Esta técnica, também, insinuou a existência de indícios de periodicidades anuais nas inter-relações entre os grupos de variáveis, atenuadas, ou pelo menos, modificadas com a irrigação.

A análise de componentes principais, ao menos as técnicas utilizadas neste trabalho, em princípio, não se mostraram capazes de selecionar aquelas variáveis meteorológicas que seriam mais importantes para posteriores análises, no presente estudo. Aparentemente, o conjunto de técnicas utilizadas, foram eficientes na detecção das variáveis meteorológicas que contêm as maiores quantidades de informações. Estas análises retiveram as variáveis meteorológicas que, em si mesmas, são resultantes de interações de diversos fatores, carregando consigo, é certo, maior quantidade de informações. Entretanto, com este modo de agir, descartaram, pelo menos, uma causa primeira de toda periodicidade dos elementos meteorológicos, qual seja o fotoperíodo. Em adição, tenderam a descartar as variáveis ligadas à quantidade de água presente na atmosfera, umidade relativa e precipitação.

A análise harmônica de Fourier, na aparência, ao menos, foi aquela que explicitou a maior quantidade de informações. A função de autocorrelação foi capaz de mostrar as periodicidades intrínsecas a cada uma das variáveis, meteorológicas e fenológicas. Por seu turno, a correlação cruzada realçou inter-relações entre as diversas variáveis, revelando nuances invisíveis pelas análises estatísticas mais usuais.

Os resultados aparentemente mais surpreendentes, foram as correlações cruzadas entre o fotoperíodo – variável astronômica, por excelência e assim, causa primeira – com as variáveis fenológicas. Essas correlações cruzadas enfatizaram a importância da sazonalidade do fotoperíodo nessa espécie vegetal, tipicamente tropical. As respostas fenológicas, em todos os tratamentos, a essa variável astronômica, revelaram-se consistentes, destacando de maneira inequívoca os efeitos das diferentes estratégias de irrigação na fenologia do cacaueteiro. Entretanto, deve ser destacado que apenas o fato de haverem diferentes respostas fenológicas a diferentes estratégias de irrigação, não implica em diferenças na produtividade anual, tendo em vista as características desta cultura na região onde o experimento foi realizado.

O conjunto das técnicas, utilizadas, de análise espectral, na aparência ao menos, não mostraram resultados particularmente elucidativos, acrescentando informações consistentes àquelas apontadas pela análise harmônica. Uma explicação das discrepâncias encontradas pelas duas estruturas matemáticas utilizadas para o estudo das séries temporais, ao menos aparentemente, seria a suposição de que o comprimento das séries utilizadas não foram longas o suficiente, em termos de número de dados de cada série, para que a análise espectral pudesse mostrar sua robustez. Concluir-se-ia, então que, pelo menos, para séries curtas a análise harmônica superaria a espectral, na elucidação das inter-relações entre as diversas variáveis.

Diante da disparidade dos resultados apontados pelas diversas técnicas estatísticas utilizadas; não se possuindo um convincente padrão de comparações – até porque a maioria dos trabalhos sobre a fisiologia do cacaueteiro, encontrados na literatura foram realizados com mudas, adultas ou não, sendo que este experimento é citado por diversos autores especialistas na área, como dos poucos executados em condições de campo – e muitas questões fisiológicas permanecerem em aberto, seria leviano enunciar conclusões definitivas sobre os efeitos das variáveis meteorológicas sobre a fenologia do cacaueteiro. Entretanto, é certo que estas técnicas, simples até certo ponto, podem se constituir em poderosas ferramentas para que fisiologistas embasem resultados já obtidos ou planejem futuros experimentos, em particular, os de longo prazos.

6. Bibliografia

timeo hominem unius libris ris

ABREU, M.A.; VETTER, D. A análise de relações entre conjuntos de variáveis na matriz geográfica: correlação canônica. In: FAISSOL, S. **Tendências atuais na geografia urbano/regional: teorização e qualificação**. Rio de Janeiro: IBGE, 1978. p.133-144.

ACOSTA, V.H. **Classificação ecológica do território brasileiro situado ao sul do paralelo 24° S – uma abordagem climática**. Viçosa: UFV, 1997. 86p. Tese (Mestrado em Ciência Florestal).

ALMEIDA, H. A. **Influência dos elementos meteorológicos no lançamento foliar e frutificação do cacaueteiro (*Theobroma cacao* L.)**. Piracicaba: ESALQ, USP, 1986. 111p. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia).

ALMEIDA, H.A.; MACHADO, R.C.R.; SILVA, W.S. Influência dos elementos meteorológicos na floração do cacaueteiro (*Theobroma cacao* L.). In: INTERNATIONAL COCOA RESEARCH CONFERENCE, 10, 1987, Santo Domingo, Rep. Dominicana. Proceedings... Santo Domingo: 1987. p.93-98.

ALVIM, P. T. **Ecophysiology of Cacao**. In: ALVIM, P.T. (coord.) INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ECOPHYSIOLOGY OF TROPICAL CROPS, 1975, Ilhéus. Anais... Ilhéus: CEPLAC, 1975. p 279-313.

ALVIM, P. T. Cacao. In: ALVIM, P.T; KOSLOWSKI, T.T. (eds.) **ECOPHYSIOLOGY OF TROPICAL CROPS**. New York: Academic Press, 1977. p 279-313.

ALVIM, P. T. Relações entre fatores climáticos e produção do cacaueteiro. In: INTERNATIONAL COCOA RESEARCH CONFERENCE, 10, 1987, Santo Domingo, Rep. Dominicana. Proceedings... Santo Domingo: 1987. p.159-167.

ANDERSON, T.W. **An introduction to multivariate statistical analysis**. John Wiley & Sons, Inc. 1958. 374 p.

ANDRADE, L.A. **Classificação ecológica do estado da Paraíba**. Viçosa: UFV, 1995. 157p. Tese (Mestrado em Ciência Florestal).

AUGUSTO, S. G. **Irrigação complementar nos diferentes estádios fenológicos do cacaueteiro (*Theobroma cacao* L.)**. Viçosa: UFV, 1997. Tese (Doutoramento em engenharia agrícola).

BATEMAN, M.J. Aggregate and regional supply functions for Ghananian cocoa, 1946-1962. **Journal of Farm Economics**, Menasha, v.47, n.2, p. 384-401, 1965.

BEHRMAN, J.R. Monopolistic cocoa pricing. **American Journal of Agricultural Economics**, Lexington, v.50, n.3, p. 702-719, 1968.

BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. 6a. ed revisada. Viçosa: UFV, 1995. 657 p.

CADIMA Z., A. **Varição da absorção de água do solo pelo cacaueteiro (*Theobroma spp*)**. Piracicaba: ESALQ, USP, 1977. 68 p. Dissertação (Mestrado em solos e nutrição mineral de plantas).

CAPRA, F. **O tao da física**. 3a.ed. São Paulo: Cultrix, 1991. 274 p.

COE, S. D.; COE, M. D. **The true history of chocolate**. Thames and Hudson, 2000. 280 p.

CORREIA, J.R. **Uso de técnicas multivariadas no estudo das inter-relações de características do solo e a produtividade do Eucalipto**. Viçosa: UFV, 1993. 106p. Tese (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).

CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 2. ed. revisada. Viçosa: UFV, 1997. 390p.

DAVIES, P. Esse fluxo misterioso. **Scientif American Brasil**, São Paulo, v.1, n.5, p. 54-59, 2002.

- DAVIS, J.C. **Statistics and data analysis in geology**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1986. 646 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – DNMET. **Normais climatológicas** (1961-1990). Brasília: SPI/EMBRAPA, 1992. 84 p.
- DEVI, S.U. Perennial crop supply response: the case of indian natural rubber. **Indian Journal of Agricultural Economics**, Delhi, v.32, n.4, p. 62-76, 1977.
- DIAS, L.A.S. Origem e dispersão de *Theobroma cacao* L: novo cenário. In: ____ (ed). **Melhoramento genético do cacau**. Cap.3. Viçosa: FUNAPE/UFV, 2001a. p. 81-127.
- DUNTEMAN, G. H. **Introduction to multivariate analysis**. Beverly Hills: Sage Publications, 1984. 237p.
- FOLHA DE SÃO PAULO. Caderno: Mais. São Paulo, 29 de dezembro de 1996. p. 4.
- HAAN, C.T. **Statistical methods in hidrology**. 5.ed. Ames: The Iowa State University Press, 1977. 378p.
- HANNAN, E. J. **Multiple time series**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1970. 535 p.
- HADFIELD, W. Canopy architecture of some ecuadorian cocoa populations with special reference to light penetration. In: INTERNATIONAL COCOA RESEARCH CONFERENCE, 7, 1979. Douala, Cameroon. Proceedings... Douala: 1979a. p. 109-120.
- HADFIELD, W. Climatic constraints in ecuadorian cocoa production. In: INTERNATIONAL COCOA RESEARCH CONFERENCE, 7, 1979. Douala, Cameroon. Proceedings... Douala: 1979a. p.13-24.
- HARDWICK, K.; ROBINSON, A.W.; COLLIN, H.A. Plant water status and the control of leaf production in cocoa. In: INTERNATIONAL COCOA RESEARCH CONFERENCE, 9, 1984. Lomé, Togo. Proceedings... Lomé: 1984. p. 111-116.
- HARDY, F. **Cacao Manual**. Turrialba: IICA, 1960. 395 p.
- HARMAN, H. H. **Modern factor analysis**. 2.ed. Chicago: The University of Chicago Press, 1968. 474p.
- HARRIS, R.J. **A primer of multivariate statistics**. New York: Academic Press, 1975. 332p.
- HAWKING, S. W. **Uma breve história do tempo: do Big Bang aos buracos negros**. São Paulo: Rocco, 1988. 184 p.
- HEILBRONER, R. L. **História do pensamento econômico**. São Paulo: Nova Cultural. 1996. p. 43-72.
- JEFFERS, J.H.R. Principal components analysis of designed experiments. **The Statistician**, Warlow, n.12, p.230-242, 1972.
- JOLLIFFE, I.T. Discarding variables in a principal component analysis. I. Artificial data. **Applied Statistics**, n.21, p.160-173, 1972.
- JOLLIFFE, I.T. Discarding variables in a principal component analysis. II. Real data. **Applied Statistics**, n.22, p.21-31, 1973.
- JOLY, R. Physiological adaptations for maintaining photosynthesis under water stress in cacao. INTERNATIONAL COCOA RESEARCH CONFERENCE, 10, 1987, Santo Domingo, Rep. Dominicana. Proceedings... Santo Domingo: 1987. p. 199-203.
- JOHNSON, R.A.; WICHERN, D.W. **Applied multivariate statistical analysis**. 3a. ed. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 1992. 640 p.
- KAKU, M. **Hiperespaço**. Rio de Janeiro. Ed. Rocco. 384 p.

- KENDALL, M. **Multivariate analysis**. s.1., Charles Griffing e Co., 1980. 210p.
- KHAN, M.N.; PATTERSON, G.R.; MATLICK, B.K. Effect of supplemental water supplied through drip irrigation on cocoa yield at Hummingbird, Hershey, Ltd., Belize, C.A. In: INTERNATIONAL COCOA RESEARCH CONFERENCE, 10, 1987, Santo Domingo, Rep. Dominicana. Proceedings... Santo Domingo: 1987. p.185-191.
- KIM, JAE-ON. Factor analysis. In: NIE, N.H. (ed.) **Statistical package for the social science**. 2.ed. New York: McGraw Hill, Inc., 1975. v.5 . p.468-514p.
- LEITE, J.O.; VALLE, R.R. Relações entre a precipitação, o lençol freático e a produção de cacau na Bahia. **Agrotrópica**, Ilhéus, v.12, n.2, p. 67-74, 2000.
- LEMONS, J.J.S. **Análise espectral de ciclos de comércio agrícola no Brasil**. Viçosa, UFV, 1983. 152 p. Tese (Doutoramento em Economia Rural).
- MACHADO, R.C.R.; ALVIM, P.T.; MILDE, L.C.E. Reações fisiológicas do cacauzeiro à deficiência de água no solo. In: INTERNATIONAL COCOA RESEARCH CONFERENCE, 7, 1979. Douala, Cameroon. Proceedings... Douala: 1979. p. 121-127.
- MANLY, B.F.J. **Multivariate statistical methods: a primer**. London: Chapman and Hall, 1994. 159p.
- MARDIA, .K.V.; KENT, J.T.; BIBBY, J.M. **Multivariate analysis**. London: Academic Press, 1997. 521p.
- MARTINS, S.V. **Classificação ecológica do estado do Espírito Santo: um método climático..** Viçosa: UFV, 1991. 107p. Tese (Mestrado em Ciência Florestal).
- MASCARENHAS, G.C.C.; MIDLEJ R.R.; TREVISAN, S.P.; AFONSO J.M; ANDRADE FILHO, E.N. E MEDEIROS J.X. O cluster do cacau na Bahia. In: HADDAD, P.R. (org) **A competitividade do agronegócio e o desenvolvimento regional no Brasil: estudo de cluster**. Cap. 5. Brasília: CNPq/EMBRAPA., 1999. p. 59-123.
- McBOYLE, G.R. **Climate in review**. Boston: Houghton Mifflin, 1973. 547p.
- MIRANDA, J.E.; CRUZ, C.D.; COSTA, C.P. Predição do comportamento de híbridos de pimentão (*Capsicum annum* L.) pela divergência genética dos progenitores. **Revista Brasileira de Genética**, n.11, p.929-937. 1988.
- MIRANDA, R.A.C.; MILDE, L.C.E.; BICHARA, A.L. & CORNELL, S. Daily characterization of air temperature and relative humidity profiles in a cocoa plantation. **Pesq. Agropec. Bras.** Brasília, v.29, n.3, p.345-353, 1994.
- MORETTIN, P.A. **ONDAS E ONDALETAS: Da Análise de Fourier à Análise de Ondaletas**. São Paulo: EDUSP, 1999. 276p.
- MORRISON, D.F. **Multivariate statistics methods**. New York: McGraw Hill, 1990. 494 p.
- NAKAYAMA, L.H.I.; SOARES, M.K.M.; APPEZZATO-DA-GLORIA, B. Contribuição ao estudo anatômico da folha e do caule do cacauzeiro (*Theobroma cacao* L.). **Sci. agric.** Piracicaba, v.53, n.1, 1996.
- ORCHARD, J.E. The effect of the dry season on the water status of T.Cacao in Ecuador. The effects of prolonged exposure to different light intensities on the photosynthesis of cocoa leaves. In: INTERNATIONAL COCOA RESEARCH CONFERENCE, 9, 1984, Lomé, Togo. Proceedings... Lomé: 1984. p. 103-109
- ORCHARD, J.E.; SALTOS M., R. The growth and water status of cacao during its first year of establishment under different methods of soil water management. INTERNATIONAL COCOA RESEARCH CONFERENCE, 10, 1987, Santo Domingo, Rep. Dominicana. Proceedings... Santo Domingo: 1987. p. 193-198.

- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: Fealq, 1997. 183 p.
- PERES FILHO, A. S. A cadeia produtiva do cacau. In: CALDAS, R.A. *et al.* **Agronegócio Brasileiro: ciência, tecnologia e competitividade**. Cap.14. Brasília: CNPq. 1998. p. 189-199.
- PERES, FILHO. A. S. A cadeia produtiva do cacau. In: HADDAD, P.R. (org.) **A competitividade do agronegócio e o desenvolvimento regional do Brasil; estudo de cluster**. Cap. 14. Brasília: CNPq/Embrapa, 1999. p. 189-199.
- RAJA HARUN, R.M.; HARDWICK, K. The effects of prolonged exposure to different light intensities on the photosynthesis of cocoa leaves. INTERNATIONAL COCOA RESEARCH CONFERENCE, 10, 1987, Santo Domingo, Rep. Dominicana. Proceedings... Santo Domingo: 1987a. p. 205-209.
- RAJA HARUN, R.M.; HARDWICK, K. The effects of different temperatures and water vapour pressure deficits on photosynthesis and transpiration of cocoa leaves. INTERNATIONAL COCOA RESEARCH CONFERENCE, 10, 1987, Santo Domingo, Rep. Dominicana. Proceedings... Santo Domingo: 1987b. p. 211-214.
- RIBEIRO JÚNIOR, J.I. **Análises estatísticas no SAEG**. Viçosa: UFV, 2001. 301 p.
- ROJAS, P.; CHAVARRÍA, H.; ROMERO, S.; SEPÚVEDA, S. **Los complejos productivos: de la teoría a la práctica**. San José, Costa Rica: IICA, 2001. 44 p. (Cuadernos técnicos nº 15).
- SCERNE, R.M.C. **Estudo agroclimático do cacau (Theobroma cacao L.) em Belém, PA**. Viçosa: UFV, 1988. 64 p. Tese (Mestrado em meteorologia agrícola).
- SILVA, G.P. **Influência das condições de clima e de solo na distribuição de áreas com plantio direto no estado do Paraná**. Viçosa: UFV, 2001. 62 p. Tese (Doutoramento em solos nutrição de plantas).
- SOUZA, C.A.S.; DIAS, L.A.S. Melhoramento ambiental e sócio economia. In: DIAS, L.A.S. (ed). **Melhoramento genético do cacau**. Viçosa: FUNAPE/UFV, 2001. p. 1-47.
- TATSUOKA, M.M. **Multivariate analysis: techniques for educational and psychological research**. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1971. 310 p.
- THE FOOD INSTITUTE REPORT. **Four cocoa-producing countries**. American Institute of Food Distribution, Inc. 14 de agosto de 2000. p.5. Relatório.
- TIMM, N.H. **Multivariate analysis with applications in education and psychology**. California: Wadsworth Publishing, 1975. 689p.
- TRUGILHO, P.F.; VITAL, B.R.; REGAZZI, A.J.; GOMIDE, J.L. Aplicação da análise de correlação canônica na identificação de índices de qualidade de eucalipto para a produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, v.21, n.2, p.259-267. 1997.
- VAREJÃO-SILVA, M.A. **Meteorologia e Climatologia**. Brasília: INMET, 2000. 532 p.
- WICKENS, M.R.; GREENFIELD, J.N. The econometric of agricultural supply: an application to the world coffee market. **Review of Economics and Statistics**, Cambridge, v.55, n.4, p. 433-440, 1973.

"Nec certam sedem, nec propriam faciem, nec munus ullum peculiare tibi dedimus, o Adam, ut quam sedem, quam faciem, quae munera tute optaveris, ea, pro voto, pro tua sententia, habeas et possideas. Definita ceteris natura intra praescriptas a nobis leges coercetur. Tu, nullis angustiis coercitus, pro tuo arbitrio, in cuius manu te posui, tibi illam praefinies. Medium te mundi posui, ut circumspiceres inde comodius quicquid est in mundo. Nec te caelestem neque terrenum, neque mortalem, neq̄ immortalem fecimus, ut tui ipsius quasi arbitrarius honorariusque plaste et fctor, in quam malueris tute formam effingas ..."

*Picco della Mirandola, Oratio de hominis dignitate**

* Yourcenar, M. **A obra em negro**. Ed. Rio Gráfica. 333p. 1986.

Glossário

a priori – conclusão que antecede aos argumentos de que deveria ser consequência; anterior à verificação.

auctori incumbit onus probanti – ao autor cabe o ônus da prova

ex toto corde – de todo o coração.

hoc opus, hic labor est – aqui é que está a dificuldade.

modus faciendi – modo de agir.

multa palcis – muito em poucas palavras

mutatis mutandi – mudando o que que deve ser mudado; com algumas alterações.

ne, sutor, ultra crepidam – não vá, sapateiro, além das sandálias.

obscurum per obscurius – ir ao obscuro pelo que ainda é mais obscuro.

omnia mea, mecum porto – tudo o que possuo, carrego comigo, isto é, a mim mesmo.

pari passu – com igual passo, no mesmo passo, simultaneamente.

per capita – por pessoa.

sublata causa, tollitur effectus? – suprimida a causa, desaparecem os efeitos?

sui generis – do seu gênero, isto é, que não é igual a outro, mas único, especial;

theobroma – manjar dos deuses.

timeo hominem unius libris – receio o homem de um só livro (Santo Tomás de Aquino);

"Não te dei face, nem lugar que seja próprio, nem dom algum que faça particular, ó Adão, a fim de que tua face e teus dons, tu os desveles, conquiste e possuas por ti mesmo. Natureza definida de outras espécies em leis por mim estabelecidas. Mas tu, a que nenhum confim delimita, por teu próprio arbítrio, entre as mãos daquele que te colocou, tu te defines a ti mesmo. Te pus no mundo, a fim de que possas melhor contemplar o que contém o mundo. Não te fiz celeste, nem terrestre, mortal ou imortal, a fim de que tu mesmo, livremente, à maneira de um bom pintor ou de um hábil escultor, descubras tua própria forma ..."