

QUANTIFICAÇÃO DO EFEITO DA OFERTA HÍDRICA SOBRE A RESPOSTA
DA SOJA (*Glycine max* (L.) MERRILL, À ÉPOCA DE PLANTIO NA REGIÃO
NORTE DO PARANÁ

EMILSON FRANÇA DE QUEIROZ
Engenheiro Agrônomo

VOLUME I

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Baldicero Molion

Tese apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Agronomia.
Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Dezembro/1988

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Livros da
Divisão de Biblioteca e Documentação - PCAP/USP

Q3q Queiroz, Emilson França de
Quantificação do efeito da oferta hídrica sobre a
resposta da soja (Glycine max (L.) Merrill, à época
de plantio na região norte do Paraná. Piracicaba,
1988.

2v.

Tese - ESALQ
Bibliografia.

1. Água do solo - Disponibilidade - Paraná (norte)
2. Estatística em meteorologia agrícola - Paraná (nor
te) 3. Modelo matemático 4. Relação solo-água-planta-
atmosfera - Paraná (norte) 5. Soja - Disponibilidade
hídrica - Paraná (norte) 6. Soja - Época de plantio -
Paraná (norte) I. Escola Superior de Agricultura Luiz
de Queiroz, Piracicaba CDD 633.34

QUANTIFICAÇÃO DO EFEITO DA OFERTA HÍDRICA SOBRE A RESPOSTA
DA SOJA (*Glycine max* (L.) MERRILL, À ÉPOCA DE PLANTIO NA REGIÃO
NORTE DO PARANÁ

Emilson França de Queiroz

Aprovado em: 21/12/1988

Comissão julgadora:

Prof. Dr. LUIZ CARLOS BALDICERO MOLION	INPE/SCT
Prof. Dr. HUMBERTO DE CAMPOS	ESALQ/USP
Prof. Dr. HENRIQUE PAULO HAAG	ESALQ/USP
Prof. Dr. NILSON AUGUSTO VILLA NOVA	ESALQ/USP
Prof. Dr. GERALDO VICTORINO DE FRANÇA	ESALQ/USP



LUIZ CARLOS BALDICERO MOLION
Orientador

*Sponsa, mater et filii
mei opus hoc dedicatur*

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho consumiu, parcialmente, 10 anos de minha existência. Ao longo deste tempo contei com a ajuda de inúmeras pessoas. Não tenho a pretensão de conseguir agradecer a todos daqui desta pequena página. Não posso, entretanto, deixar de explicitar a gratidão àquelles que me ajudaram ao longo de todo este tempo, e nos períodos críticos.

Assim, agradeço em primeiro lugar à minha mãe, Da. Maria José que obstinadamente perdoou as minhas falhas e omissões, estimulando-me, pelo seu exemplo, a ter o entusiasmo e a determinação para vencer os vários obstáculos que, naturalmente, ocorrem num trabalho como este.

À minha esposa, Zeni, que esteve ao meu lado nos diversos momentos de alegria e de angústias, nas decepções, nas vitórias e também nas derrotas que

deram sabor às vitórias, repartindo comigo todos os sentimentos. E também que, interrompendo suas atividades profissionais, tornou possível a realização deste meu Curso. A Sociedade não soube criar o instrumento normativo para resolver o problema da continuação da atividade dela e, portanto, absorvemos a conseqüente e irrecuperável redução de nosso orçamento familiar. Optei por não deixar este assunto para outra oportunidade.

A execução deste trabalho, associada a outras obrigações acadêmicas e funcionais, coincidiu com a tenra idade de meus filhos Ana Cristina e Luiz Filipe. Tais circunstâncias exigiram que, frequentemente, eu estivesse afastado, por longo tempo, de nosso tão natural convívio e também que eu, muitas vezes, restringisse nosso convívio para dedicar-me à elaboração desta Tese. Assim, daqui desta página, formulo a eles o meu afetuoso agradecimento, com a esperança de ser possível alguma compensação futura.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Carlos Baldicero Molion, exemplo de liderança e respeito a pessoa humana. Praticando com grande habilidade a conduta da Política de Ciência e Tecnologia, sem se distanciar das principais preocupações e atividades de cientista, para as quais é dotado de alta capacitação, constitui-se num exemplo que tentarei seguir.

Aos Professores e Doutores da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Nilson Augusto Villa Nova, Henrique

Paulo Haag, Geraldo Victorino França e Humberto de Campos, ao Prof. Dr. Moacir Antonio Berlato da UFRGS, o meu agradecimento e a manifestação do meu respeito diante de sua estatura acadêmica e científica.

Aos professores do Instituto de Pesquisas Espaciais, Dr. Antonio Divino Moura, Dr. Vladamundi Brahamananda Rao e Dr. Marco Antonio Maringolo Leme, pelo constante estímulo à busca de um alto nível de metodologia, conhecimento e postura científicas.

Aos meus amigos Celso de Almeida Gaudêncio e Antonio Garcia, que assumiram algumas de minhas atribuições, enquanto realizei o Curso, e que estiveram sempre prontos a me atender nas inúmeras providências relacionadas com a execução dos experimentos.

Aos meus amigos e colegas João Gilberto Correa da Silva, Maria Cristina Oliveira, Gedi Jorge Sfredo e Reinaldo Joaquim Bezerra da Silva, que me ajudaram a planejar e realizar o procesamento dos dados e as análises estatísticas e matemáticas.

Ao Paulo Volpato, que realizou diuturnamente, e ao longo de dez anos agrícolas, as observações fenológicas indispensáveis ao estabelecimento das ligações entre os fatores biológicos e meteorológicos.

Ao Edmar Gusmão dos Anjos, Ubirajara Silveira e Valdemar Volpato, companheiros inseparáveis, que execu-

taram rigorosa e organizadamente as instruções de condução dos experimentos de campo.

À Eliana Maria Bruna Barbieri, Ozael Ferreira e Marisa Eumann, pela paciência em lidar com a minha virtual desorganização e processar uma enorme massa de dados.

Os que conhecem a minha letra entendem o quanto sou grato ao Sr. Girley Valério Simões e ao Sr. Jorge Luiz Dótorio que conseguiram, sem perder a paciência, datilografar este trabalho a partir dos manuscritos.

Agradeço o apoio que obtive de todas as instituições as quais recorri: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, a qual pertença, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Instituto de Pesquisas Espaciais, Fundação Instituto Agronômico do Paraná, Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, Instituto Nacional de Meteorologia e Superintendência de Recursos Hídricos e Meio Ambiente do Estado do Paraná, Companhia Paranaense de Energia e Companhia Melhoramentos do Norte Paraná.

Ad Majorem Mater Dei Gloriam

O Autor

SUMÁRIO

	Página
RELAÇÃO DE QUADROS	xv
RELAÇÃO DE FIGURAS	xxix
RESUMO	xxxi
ABSTRACT	xxxiii
1 - INTRODUÇÃO	01
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	06
2.1. - Exigências bioclimáticas, ciclo e rendimento da soja	08
2.1.1. - Exigências térmicas	08
2.1.2. - Exigências hídricas	10
2.1.3. - Exigências fotoperiódicas	13
2.2. - Época de plantio e rendimento da soja	18
2.3. - Fundamentos Teóricos de Algumas Relações Solo- Planta-Atmosfera	19

	Página
2.3.1. - Importância da água na vida da planta	19
2.3.2. - O continuum solo - planta - atmosfera	20
2.3.3. - O perfil da absorção da água pelas plantas ..	23
2.3.4. - O processo de secagem de um solo desnudo	25
2.3.5. - Forças atuantes na camada limite planetária .	27
2.3.5.1. - Escoamento sem atrito	29
2.3.5.2. - Escoamento na camada superficial	30
2.3.5.3. - A camada de Ekman	32
2.3.6. - Relações fluxo-perfil e deslocamento no plano zero na sub-camada dinâmica	33
2.3.6.1. - A sub-camada dinâmica	33
2.3.6.2. - Perfil logarítmico do vento	34
2.3.6.3. - Deslocamento do plano zero	39
2.3.6.4. - Perfil de umidade específica	40
2.3.7. - Cálculo da evaporação sob condições neutras .	41
2.4. - Análise Harmônica	47
2.4.1. - Resultados obtidos no Brasil	47
2.4.2. - Fundamentos teóricos da análise harmônica ...	49
2.4.2.1. - Função periódica	50
2.4.2.2. - Modelo matemático	53
2.4.2.3. - Estimativa dos parâmetros, suas variâncias e covariâncias	56
2.4.2.4. - Transformação dos dados	63
2.4.2.5. - Análise de variância	63

	Página
2.4.2.6. - Intervalo de confiança para os parâmetros estimados	71
2.4.2.7. - Equação de Regressão	71
3 - MATERIAL E MÉTODOS	73
3.1. - Descrição ambiental	73
3.1.1. - Geologia	73
3.1.2. - Clima	76
3.1.3. - Solos	76
3.2. - Variáveis estudadas	79
3.2.1. - Variáveis genotípicas	79
3.2.2. - Variáveis ambientais	79
3.2.3. - Variáveis tecnológicas	82
3.3. - Descrição dos experimentos de campo	82
3.4. - Variáveis mantidas sob controle	83
3.5. - Determinações e Observações	83
3.5.1. - Observações fenológicas	83
3.5.2. - Observações fenométricas	83
3.5.3. - Observações meteorológicas de superfície	84
3.5.3.1. - Período de execução dos experimentos	84
3.5.3.2. - Série histórica	85
3.6. - Análises estatísticas realizadas	86
3.6.1. - Análise de variância	86
3.6.2. - Análises de regressão e correlação	86
3.6.3. - Análise harmônica	87

	Página
3.7. - Cálculo da evapotranspiração potencial e do balanço hídrico	91
3.7.1. - Balanço hídrico seriado mensal e decendial ..	91
3.7.2. - Balanço hídrico seriado diário	91
3.8. - Somatório de Variável Meteorológica por sub-período do Ciclo	93
3.8.1. - Elaboração do calendário absoluto	93
3.8.2. - Cálculo da Somatória	93
4 - RESULTADOS	95
4.1. - Ciclo	95
4.1.1. - Estágios fenológicos	95
4.1.2. - Duração dos sub-períodos	108
4.2. - Rendimento	111
4.2.1. - Análise de variância	111
4.2.1.1. - Experimento da sucessão Trigo-Soja	111
4.2.1.2. - Experimento de sistemas de preparo do solo e plantio	113
4.2.1.3. - Experimento de adubação verde	114
4.2.1.4. - Ensaio Nacional de Ecologia - Londrina	115
4.2.2. - Regressão entre data de plantio e rendimento	119
4.2.2.1. - Cultivar Paranã	119
4.2.2.2. - Cultivar Bossier	122
4.2.2.3. - Cultivar Santa Rosa	124

	Página
4.2.2.4. - Cultivares do Ensaio Nacional de Ecologia .	124
4.2.3. - Regressão entre o rendimento e a precipitação por sub-período	127
4.2.4. - Regressão entre somatória diária da relação ETR/ETP por sub-período e rendimento relati vo	129
4.3. - Altura de planta	131
4.3.1. - Regressão entre data de plantio e altura de planta	131
4.3.1.1. - Cultivar Paraná	133
4.3.1.2. - Cultivar Bossier	133
4.3.1.3. - Cultivar Santa Rosa	135
4.4. - Estatísticas descritivas das séries temporais de precipitação mensal	139
4.4.1. - Média	139
4.4.1.1. - Precipitação mensal média	139
4.4.1.1.1. - Zonas Hidrográficas do Tibagi, Ivaí e Piquiri	139
4.4.1.1.2. - Zona Hidrográfica do Litoral	146
4.4.1.1.3. - Zona Hidrográfica da Vertente Atlântica .	147
4.4.1.1.4. - Zona Hidrográfica do Alto Iguaçu	147
4.4.1.1.5. - Zona Hidrográfica do Médio Iguaçu	147
4.4.1.1.6. - Zona Hidrográfica do Baixo Iguaçu	149
4.4.1.1.7. - Média por Zona Hidrográfica	149

	Página
4.4.2. - Desvio Padrão e coeficiente de variação	157
4.4.3. - Coeficiente de assimetria	170
4.4.4. - Coeficiente de curtose	170
4.5. - Análise Harmônica	181
4.5.1. - Londrina	181
4.5.2. - Outros locais	190
4.5.2.1. - Período anual	190
4.5.2.2. - Período seco	207
4.5.2.3. - Período chuvoso	218
4.6. - Correlação entre regimes de precipitação mensal no Estado do Paraná	230
4.6.1. - Estacional e Anual	230
4.6.2. - Mensal	235
5 - DISCUSSÃO	244
5.1. - Ciclo	244
5.1.1. - Estágios fenológicos	245
5.1.2. - Duração dos sub-períodos	247
5.2. - Rendimento	248
5.2.1. - Análise de variância e de regressão	248
5.2.2. - Análise de regressão curvilínear múltipla ...	251
5.3. - Altura de planta	256
5.4. - Precipitação Mensal do Estado do Paraná	258
5.4.1. - Estatísticas descritivas das séries temporais de purificação mensal	259

Página

5.4.1.1. - Precipitação média e exigências hídricas de soja	259
5.4.1.2. - Desvio padrão e coeficiente de variação ...	266
5.4.2. - Análise de regressão periódica	267
5.4.3. - Análise de correlação	269
6 - CONCLUSÕES	272
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	279
8 - APÊNDICE	295

RELAÇÃO DE QUADROS

	Página
2.01 - Medidas adotadas pelo homem para reduzir os efeitos de adversidades climáticas, causadas por deficiências hídricas, sobre a produtividade agrícola e a disponibilidade de alimentos.....	7
2.02 - Sensibilidade de alguns parâmetros e processos metabólicos ao "estresse" hídrico.....	21
2.03 - Análise de variância dos contrastes \hat{p}_j e \hat{q}_j , para o caso de T ímpar.....	67
2.04 - Análise de variância dos contrastes \hat{p}_j e \hat{q}_j , para o caso de T par.....	68
2.05 - Análise de variância das amplitudes \hat{a}_j , para o caso de T ímpar.....	69
2.06 - Análise de variância das amplitudes \hat{a}_j , para o caso de T par.....	70
3.01 - Material de origem, formações e respectivos períodos geológicos ocorrentes no Estado do Paraná, conforme símbolos de identificação constantes da Figura (3.01).....	75
3.02 - Descrição, características e origem genética das cultivares participantes dos experimentos de campo.....	80

3.03 - Descrição dos experimentos de campo utilizados na elaboração deste trabalho e conduzidos no campo experimental do Centro Nacional de Pesquisa de Soja em Londrina, PR.....	81
4.01 - Equações de regressão entre datas de emergência e datas de ocorrência dos estágios reprodutivos, da cultivar Paraná, plantada em quatro épocas e oito anos. Londrina - PR, 1976/77 a 1983/84.....	97
4.02 - Equações de regressão entre datas de plantio e datas de emergência e dos estágios reprodutivos, da cultivar Paraná, plantada em quatro épocas e oito anos. Londrina - PR, 1976/77 a 1983/84.....	98
4.03 - Relação dos desvios maiores do que setedias entre os valores observados e estimados para as datas de ocorrência dos estágios reprodutivos da cultivar Paraná.....	99
4.04 - Equações de regressão entre datas de emergência e datas de ocorrência dos estágios reprodutivos, da cultivar Bossier, plantada em quatro épocas e oito anos. Londrina - PR, 1976/77 a 1983/84.....	100
4.05 - Equações de regressão entre datas de plantio e datas de emergência e dos estágios reprodutivos, da cultivar Bossier, plantada em quatro épocas e oito anos, Londrina - PR, 1976/77 a 1983/84.....	101
4.06 - Relação de desvios maiores do que sete dias entre os valores observados e estimados para as datas de ocorrência de diversos estágios reprodutivos da cultivar Bossier.....	102
4.07 - Equações de regressão entre datas de emergência e datas de ocorrência dos estágios reprodutivos da cultivar Santa Rosa, plantada em quatro épocas e oito anos. Londrina - PR, 1976/77 a 1983/84.....	104

4.08 - Equações de regressão entre datas de plantio e datas de emergência e dos estágios reprodutivos, da cultivar Santa Rosa, plantada em quatro épocas e oito anos. Londrina - PR, 1976/77 a 1983/84	105
4.09 - Relação dos desvios maiores do que sete dias, entre os valores observados e estimados, para as datas de ocorrência de diversos estágios reprodutivos da cultivar Santa Rosa	106
4.10 - Equações de regressão entre datas de emergência e duração de subperíodos do ciclo da cultivar Paranã, plantada em quatro épocas e oito anos. Londrina - PR, 1976/77 a 1983/84	109
4.11 - Equações de regressão entre data de emergência e duração de sub-períodos do ciclo da cultivar Bossier, plantada em quatro épocas e oito anos. Londrina - PR, 1976/77 a 1983/84	110
4.12 - Equações de regressão entre data de emergência e duração de sub-períodos do ciclo da cultivar Santa Rosa, plantada em quatro épocas e oito anos. Londrina - PR, 1976/77 a 1983/84	112
4.13 - Rendimento médio, em kg/ha, de algumas culturas de soja plantadas isoladamente ou em sucessão a três cultivares de trigo, sob diversas condições ambientais e tecnológicas. Londrina - PR, 1976/77 a 1984/85	116
4.14 - Rendimento médio, em kg/ha, de dezesseis cultivares de soja, plantadas em cinco épocas e cinco anos. Londrina - PR, 1976/77 a 1980/81 ...	117
4.15 - Rendimento médio, em kg/ha, de algumas culturas de soja, plantadas sob diversas condições ambientais e tecnológicas. Londrina - PR, 1976/77 a 1984/85	118
4.16 - Rendimento, em kg/ha, de três cultivares de soja, plantadas em três épocas e sete anos, sucedendo a três cultivares de trigo. Média de dois sistemas de plantio e preparo do solo. Londrina-PR (1978/79 a 1984/85)	120

	- Página
4.17 - Equações de regressão entre data de emergência e rendimento, com os respectivos valores dos coeficientes de determinação e probabilidades do teste F, para a cultivar de soja Paraná, plantada em diversas condições ambientais e tecnológicas. Londrina - PR, 1976/77 a 1983/84.....	121
4.18 - Equações de regressão entre data de emergência e rendimento, com os respectivos valores dos coeficientes de determinação e probabilidades do teste F, para a cultivar de soja Bossier, plantada em diversas condições ambientais e tecnológicas. Londrina - PR, 1976/77 e 1983/84.....	123
4.19 - Equações de regressão entre data de emergência e altura de planta, com os respectivos valores dos coeficientes de determinação e probabilidades do teste F, para a cultivar de soja Santa Rosa, plantada em diversas condições ambientais e tecnológicas. Londrina - PR, 1976/77 a 1984/85.....	125
4.20 - Equações de regressão entre datas de emergência e rendimento de dezesseis cultivares de soja, plantadas em cinco épocas e cinco anos. Londrina - PR, 1976/77 a 1980/81.....	126
4.21 - Modelos obtidos por regressão passo a passo, que exprimem o rendimento de três cultivares de soja, isoladamente ou em conjunto, quando plantadas em 32 ambientes, em função da quantidade de chuva ocorrida em três ou quatro dos sub-períodos: V_0-R_1 , R_1-R_4 , R_4-R_6 e R_6-R_8	128
4.22 - Valores de probabilidade dos testes T e F e coeficientes de determinação para os modelos de relação entre somatória diária de ETR/ETP, para diversos sub-períodos do ciclo de três cultivares de soja e respectivos rendimentos relativos, para 32 ambientes, no período 1976/84. Londrina - PR	130
4.23 - Modelos de regressão múltipla relacionando a somatória diária de ETR/ETP, por sub-período do ciclo de três cultivares de soja e respectivos rendimentos relativos. Londrina - PR, 1976/77 a 1983/84	132

- 4.24 - Equações de regressão entre data de emergência e altura de planta, com os respectivos valores do coeficiente de determinação e probabilidade F para a cultivar de soja Paranã, plantada em diversas condições ambientais e tecnológicas. Londrina - PR, 1976/77 a 1983/84..... 134
- 4.25 - Equações de regressão entre data de emergência e altura de planta, com os respectivos valores do coeficiente de determinação e a probabilidade de F, para a cultivar de soja Bossier, plantada em diversas condições ambientais e tecnológicas. Londrina - PR, 1976/77 a 1983/84..... 136
- 4.26 - Equações de regressão entre data de emergência e altura de planta, com os respectivos valores do coeficiente de determinação e a probabilidade de F, para a cultivar de soja Santa Rosa, plantada em diversas condições ambientais e tecnológicas. Londrina - PR, 1976/77 a 1983/84..... 137
- 4.27 - Valores médios do total de chuva observada em quatro sub-períodos do ciclo de três cultivares de soja, plantadas em quatro épocas, rendimento médio, altura de planta média e respectivos coeficientes de correlação. Londrina - PR, 1976/77 a 1983/84..... 138
- 4.28 - Precipitação mensal média, em mm de 22 localidades das zonas hidrográficas do Tibagi, Ivaí e Piquiri, para o período compreendido entre janeiro de 1958 e dezembro de 1983..... 144
- 4.29 - Frequência de valores da média de precipitação mensal, para cinco intervalos de classe e faixa de variação, para 22 localidades das zonas hidrográficas do Tibagi, Ivaí e Piquiri e para o período compreendido entre janeiro de 1958 e dezembro de 1983..... 145
- 4.30 - Precipitação mensal média, em mm, de 14 localidades das zonas hidrográficas da Vertante Atlântica e Alto Iguaçu, para o período compreendido entre janeiro de 1958 e dezembro de 1983... 148
- 4.31 - Precipitação mensal, em mm, de 19 localidades das zonas hidrográficas do Médio e Baixo Iguaçu, para o período compreendido entre janeiro de 1958 e dezembro de 1983..... 150

4.32 - Frequência de valores da média de precipitação mensal, para cinco intervalos de classe e faixa de variação para 55 localidades do Estado do Paraná no período compreendido entre janeiro de 1958 a dezembro de 1983	155
4.33 - Precipitação mensal média, em mm, para as principais zonas hidrográficas do Estado do Paraná e para o período compreendido entre janeiro de 1958 a dezembro de 1983	156
4.34 - Desvio-padrão das séries temporais de precipitação mensal de 22 localidades das zonas hidrográficas do Tibagi, Ivaí e Piquiri, para o período compreendido entre janeiro de 1958 a dezembro de 1983	159
4.35 - Frequência de valores do desvio-padrão da precipitação mensal, para quatro intervalos e faixa de variação para 22 localidades das zonas hidrográficas do Tibagi, Ivaí e Piquiri, para o período compreendido entre janeiro de 1958 a dezembro de 1983	160
4.36 - Desvio-padrão das séries temporais de precipitação mensal de 14 localidades das zonas hidrográficas da Vertente Atlântica e Alto Iguaçu, para o período compreendido entre janeiro de 1958 a dezembro de 1983	161
4.37 - Desvio-padrão das séries temporais de precipitação mensal de 19 localidades das zonas hidrográficas do Médio e Baixo Iguaçu, para o período compreendido entre janeiro de 1958 a dezembro de 1983	162
4.38 - Frequência de valores do desvio-padrão de precipitação mensal, para quatro intervalos e faixa de variação para 55 localidades do Estado do Paraná, para o período compreendido entre janeiro de 1958 a dezembro de 1983	163
4.39 - Coeficiente de variação das séries temporais de precipitação mensal de 22 localidades das zonas hidrográficas do Tibagi, Ivaí e Piquiri, para o período compreendido entre janeiro de 1958 a dezembro de 1983	165

- 4.40 - Frequência de valores do coeficiente de variação da precipitação mensal para quatro intervalos de classe e faixa de variação para 22 localidades das zonas hidrográficas do Tibagi, Ivaí e Piquiri, para o período compreendido entre janeiro de 1958 a dezembro de 1983..... 166
- 4.41 - Coeficiente de variação das séries temporais de precipitação mensal de 14 localidades das zonas hidrográficas da Vertente Atlântica e Alto Iguaçu, para o período compreendido entre janeiro de 1958 a dezembro de 1983..... 167
- 4.42 - Coeficiente de variação das séries temporais de precipitação mensal de 19 localidades das zonas hidrográficas do Médio e Baixo Iguaçu, para o período compreendido entre janeiro de 1958 e dezembro de 1983..... 168
- 4.43 - Frequência de valores do coeficiente da variação da precipitação mensal, para quatro intervalos de classe e faixa de variação para 55 localidades do Estado do Paraná, para o período compreendido entre janeiro de 1958 a dezembro de 1983..... 169
- 4.44 - Coeficiente de assimetria das séries temporais de precipitação mensal de 22 localidades das zonas hidrográficas do Tibagi, Ivaí e Piquiri para o período compreendido entre janeiro de 1958 a dezembro de 1983..... 171
- 4.45 - Coeficiente de assimetria das séries temporais de precipitação mensal de 14 localidades das zonas hidrográficas do Litoral, Vertente Atlântica e Alto Iguaçu, para o período compreendido entre janeiro de 1958 a dezembro de 1983..... 172
- 4.46 - Coeficiente de assimetria das séries temporais de precipitação mensal de 19 localidades das zonas hidrográficas do Médio e Baixo Iguaçu, para o período compreendido entre janeiro de 1958 a dezembro de 1983..... 173
- 4.47 - Frequência dos valores do coeficiente de assimetria das séries temporais de precipitação mensal, para quatro intervalos e faixa de variação para 22 localidades das zonas hidrográficas do Tibagi, Ivaí e Piquiri. Período 1958/83. 174

4.48 - Frequência de valores do coeficiente de assimetria, das séries temporais de precipitação mensal, para quatro intervalos e faixa de variação para 55 localidades do Estado do Paraná. Período 1958/83	175
4.49 - Coeficiente de curtose das séries temporais de precipitação mensal de 22 localidades das zonas hidrográficas do Tibagi, Ivaí e Piquiri, para o período compreendido entre janeiro de 1958 e dezembro de 1983	176
4.50 - Frequência de valores do coeficiente de curtose das séries temporais de precipitação mensal, para quatro intervalos e faixa de variação para 22 localidades das zonas hidrográficas do Tibagi, Ivaí e Piquiri. Período 1958/83	177
4.51 - Coeficiente de curtose das séries temporais de precipitação mensal de 14 localidades das zonas hidrográficas do Litoral, Vertente Atlântica e Alto Iguaçu, para o período compreendido entre janeiro de 1958 a dezembro de 1983.....	178
4.52 - Coeficiente de curtose das séries temporais de precipitação mensal de 19 localidades das zonas hidrográficas do Médio e Baixo Iguaçu, para o período compreendido entre janeiro de 1958 a dezembro de 1983.....	179
4.52-A-Frequência de valores do coeficiente de curtose das séries temporais de precipitação mensal para quatro intervalos e faixa de variação para 55 localidades do Estado do Paraná. Período 1958/83	180
4.53 - Análise de variância aplicada aos contrastes \hat{p}_j e \hat{q}_j , das precipitações mensais em Londrina para o período anual (1958/83)	182
4.54 - Análise de variância aplicada aos contrastes \hat{p}_j e \hat{q}_j , das precipitações mensais em Londrina que fazem parte da equação de regressão, para o período anual (1958/83)	183
4.55 - Análise de variância aplicada às amplitudes \hat{A}_j das precipitações mensais em Londrina, para o período anual (1958/83).....	185

4.56 - Análise de variância aplicada às amplitudes \hat{a}_j das precipitações mensais, em Londrina, para o período anual e para os componentes harmônicos que farão parte da equação de regressão (1958/83).....	186
4.57 - Análise de variância aplicada as amplitudes \hat{a}_j dos componentes harmônicos, para o período seco em Londrina (1958/83)	187
4.58 - Análise de variância aplicada às amplitudes \hat{a}_j dos componentes harmônicos, para o período chuvoso em Londrina (1958/83)	188
4.59 - Valores estimados dos ângulos fase (\hat{A}_j), referentes à precipitação mensal do período anual, de 22 localidades das zonas hidrográficas do Tibagi, Ivai e Piquiri (1958/83).....	192
4.60 - Valores estimados dos ângulos fase (\hat{A}_j), referentes à precipitação mensal do período anual, de 14 localidades das zonas hidrográficas do Litoral, Vertente Atlântica e Alto Iguaçu (1958/83).....	193
4.61 - Valores estimados dos ângulos fase (\hat{A}_j), referentes à precipitação mensal do período anual de 19 localidades das zonas hidrográficas do Médio e Baixo Iguaçu (1958/83).....	194
4.62 - Valores estimados das amplitudes (\hat{a}_j), referentes à precipitação mensal do período anual, de 22 localidades das zonas hidrográficas do Tibagi, Ivai e Piquiri (1958/83).....	195
4.63 - Valores estimados das amplitudes (\hat{a}_j), referentes à precipitação mensal do período anual, de 14 localidades das zonas hidrográficas do Litoral, Vertente Atlântica e Alto Iguaçu (1958/83).....	196
4.64 - Valores estimados das amplitudes (\hat{a}_j), referentes à precipitação mensal do período anual, de 19 localidades das zonas hidrográficas do Médio e Baixo Iguaçu (1958/83)	197
4.65 - percentagem da variação total, explicada por cada onda harmônica, das equações de regressão periódica, referente à precipitação mensal do período anual, de 22 localidades das zonas hidrográficas do Tibagi, Ivai e Piquiri (1958/83).....	198

	Página
4.66 - Percentagem de variação total, explicada por cada onda harmônica, das equações de regressão periódica, referentes à precipitação mensal do período anual, de 14 localidades das zonas hidrográficas do Litoral, Vertente Atlântica a Alto Iguaçu (1958/83)	199
4.67 - Percentagem de variação total, explicada por cada onda harmônica, das equações de regressão periódica, referentes à precipitação mensal do período anual, de 19 localidades do Baixo e Médio Iguaçu (1958/83)	200
4.68 - Valores de F calculados para as amplitudes de cada onda harmônica, das equações de regressão periódica, referentes à precipitação mensal do período anual, de 22 localidades das zonas hidrográficas do Tibagi, Ivaí e Piquiri (1958/83)	201
4.69 - Valores de F calculados para as amplitudes de cada onda harmônica, das equações de regressão periódica, referentes à precipitação mensal do período anual de 14 localidades das zonas hidrográficas do Litoral, Vertente Atlântica e Alto Iguaçu (1958/83)	202
4.70 - Valores de F calculados para as amplitudes de cada onda harmônica, das equações de regressão periódica, referentes à precipitação mensal do período anual, de 19 localidades das zonas hidrográficas do Médio e Baixo Iguaçu (1958/83)	203
4.71 - Equações de regressão periódica para a estimativa da precipitação mensal do período anual de 22 localidades das zonas hidrográficas do Tibagi, Ivaí e Piquiri (1958/83)	204
4.72 - Equações de regressão periódica para a estimativa da precipitação mensal do período anual de 14 localidades das zonas hidrográficas do Litoral, Vertente Atlântica e Alto Iguaçu (1958/83)	205
4.73 - Equações de regressão periódica para a estimativa de precipitação mensal do período anual de 19 localidades das zonas hidrográficas do Médio e Baixo Iguaçu (1958/83)	206

	Página
4.74 - Percentagem da variação total, explicada por cada onda harmônica, das equações de regressão periódica, referentes à precipitação mensal do período seco de 22 localidades das zonas hidrográficas do Tibagi, Ivaí e Piquiri (1958/83)..	208
4.75 - Percentagem de variação total, explicada por cada onda harmônica das equações de regressão periódica, referentes à precipitação mensal do período seco de 14 localidades das zonas hidrográficas da Vertente Atlântica e do Alto Iguaçu (1958/83).....	210
4.76 - Percentagem da variação total explicada por cada onda harmônica das equações de regressão periódica, referentes à precipitação mensal do período seco de 19 localidades das zonas hidrográficas do Médio e Baixo Iguaçu (1958/83)....	211
4.77 - Valores calculados de F para as amplitudes de cada onda harmônica, das equações de regressão periódica, referentes à precipitação mensal do período seco de 22 localidades das zonas hidrográficas do Tibagi, Ivaí e Piquiri (1958/83)..	212
4.78 - Valores calculados de F para as amplitudes de cada onda harmônica, da equação de regressão periódica, referentes à precipitação mensal do período seco de 14 localidades das zonas hidrográficas da Vertente Atlântica e Alto Iguaçu (1958/83).....	213
4.79 - Valores calculados de F para as amplitudes de cada onda harmônica das equações de regressão periódica, referentes à precipitação mensal do período seco de 19 localidades das zonas hidrográficas do Médio e Baixo Iguaçu (1958/83)....	214
4.80 - Equações de regressão periódica para a estimativa da precipitação mensal do período seco de 22 localidades das zonas hidrográficas do Tibagi, Ivaí e Piquiri (1958/83).....	215
4.81 - Equações de regressão periódica para a estimativa da precipitação mensal do período seco de 14 localidades das zonas hidrográficas da Vertente Atlântica e Alto Iguaçu (1958/83).....	216

4.82 - Equações de regressão periódica para a estimativa da precipitação mensal do período seco, de 19 localidades das zonas hidrográficas do Médio e Baixo Iguacú (1958/83).....	217
4.83 - Percentagem da variação total, explicada por cada onda harmônica, das equações de regressão periódica, referentes à precipitação mensal do período chuvoso, de 22 localidades das zonas hidrográficas do Tibagi, Ivaí e Piquiri (1958/83).....	219
4.84 - Percentagem da variação total explicada por cada onda harmônica, das equações de regressão periódica, referentes à precipitação mensal do período chuvoso de 14 localidades das zonas hidrográficas da Vertente Atlântica e Alto Iguacú (1958/83).....	221
4.85 - Percentagem da variação total explicada por cada onda harmônica, das equações de regressão periódica, referentes à precipitação mensal do período chuvoso de 19 localidades das zonas hidrográficas do Médio e Baixo Iguacú (1958/83).....	223
4.86 - Valores calculados de F para as amplitudes de cada onda harmônica, das equações de regressão periódica, referentes à precipitação mensal do período chuvoso de 22 localidades das zonas hidrográficas do Tibagi, Ivaí e Piquiri(1958/83).....	224
4.87 - Valores calculados de F para as amplitudes de cada onda harmônica, das equações de regressão periódica, referentes à precipitação mensal do período chuvoso de 14 localidades das zonas hidrográficas da Vertente Atlântica e Alto Iguacú (1958/83)	225
4.88 - Valores calculados de F para as amplitudes de cada onda harmônica das equações de regressão periódica referentes à precipitação mensal do período chuvoso de 19 localidades das zonas hidrográficas do Médio e Baixo Iguacú (1958/83)...	226
4.89 - Equações de regressão periódica para a estimativa da precipitação mensal, do período chuvoso de 22 localidades das zonas hidrográficas do Tibagi, Ivaí e Piquiri (1958/83).....	227

4.90 - Equações de regressão periódica para a estimativa da precipitação mensal, do período chuvoso, de 14 localidades das zonas hidrográficas da Vertente Atlântica a Alto Iguaçu (1958/83)...	228
4.91 - Equações de regressão periódica para a estimativa de precipitação mensal, do período chuvoso, de 19 localidades das zonas hidrográficas do Médio e Baixo Iguaçu (1958/83).....	229
4.92 - Equações de regressão estacional e coeficientes de correlação estacional, anual e médio, entre a precipitação mensal observada em Londrina e em 19 localidades das zonas hidrográficas do Médio e Baixo Iguaçu, para o período compreendido entre julho de 1958 a junho de 1984....	231
4.93 - Equações de regressão estacional e coeficientes de correlação estacional, anual e médio, entre a precipitação mensal observada em Londrina e em 14 localidades das zonas hidrográficas do Litoral, Vertente Atlântica e Alto Iguaçu, no período compreendido entre julho de 1958 a junho de 1984	233
4.94 - Equações de regressão estacional e coeficientes de correlação estacional, anual e médio, entre a precipitação mensal observada em Londrina e em 21 localidades das zonas hidrográficas do Tibagi, Ivaí e Piquiri, no período compreendido entre julho de 1958 a junho de 1984.....	234
4.95 - Faixas de maior frequência dos coeficientes de correlação estacional e anual, do regime de chuvas mensal, para 54 localidades das diversas zonas hidrográficas do Estado do Paraná, em relação a Londrina.....	236
4.96 - Coeficientes de correlação mensal entre a precipitação mensal observada em Londrina, em 21 localidades das zonas hidrográficas do Tibagi, Ivaí e Piquiri no período compreendido entre julho de 1958 e junho de 1984.....	237
4.97 - Coeficientes de correlação mensal, entre a precipitação mensal observada em Londrina e em 14 localidades das zonas hidrográficas do Litoral, Vertente Atlântica e Alto Iguaçu, no período compreendido entre julho de 1958 e junho de 1984 .	238

Página

4.98 - Coeficientes de correlação mensal, entre a precipitação mensal observada em Londrina e em 19 localidades das zonas hidrográficas do Médio e Baixo Iguacũ, no período compreendido entre julho de 1958 e junho de 1984.....	239
4.99 - Matriz de coeficientes de correlação estacional para a precipitação mensal de 29 localidades do Estado do Paraná, no período compreendido entre Julho de 1958 a junho de 1983.....	242
4.100 - Matriz de coeficientes de correlação médios, para a precipitação mensal de 29 localidades do Estado do Paraná, no período compreendido entre julho de 1958 a junho de 1983.....	243

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
2.01 - Divisão da atmosfera em camadas conforme a predominância das forças de atrito, Coriolise e gradiente de pressão	31
2.02 - Método empírico de determinação de parâmetros aerodinâmicos (Zo) sujeito a tendência conforme a habilidade do operador. Fonte: SHAW (1977)	38
2.03 - Representação gráfica dos contrastes (pj e qj), amplitudes (ãj) e ângulos fase (Ãj)	52
3.01 - Geologia do Estado do Paraná, com identificação apresentada no Quadro 3.01, adaptado de SHOBENHAUS et alii (1984)	74
3.02 - Principais tipos climáticos de KÖEPPEN, ocorrentes no Estado do Paraná. Adaptado de GODOY et alii (1978)	77
3.03 - Principais solos ocorrentes no Estado do Paraná. Adaptado de IGUE et alii (1976)	78
4.01 - Precipitação mensal média, em mm, para algumas localidades do Paraná, citadas no Quadro (4.33), sob a designação de Noroeste (2) e Norte (1), para o período 1958/83.	151

- 4.02 - Precipitação mensal média, em mm, para algumas localidades do Paraná, citadas no Quadro(4.33), sob a designação de Alto Ivaí (4) e Alto Tibagi (3), para o período 1958/83 152
- 4.03 - Precipitação mensal média, em mm, para algumas localidades do Paraná, citadas no Quadro(4.33), sob a designação de Alto Iguaçu (5) e Vertente Atlântica (9), para o período 1958/83 153
- 4.04 - Precipitação mensal média, em mm, para algumas localidades do Paraná, citadas no Quadro(4.33), sob a designação de Médio Iguaçu (6) e Baixo Iguaçu (7), para o período 1958/83 154
- 4.05 - Isolinhas de coeficientes de correlação estacional da precipitação mensal observada em Londrina e em outras 381 localidades do estado do Paraná para o período compreendido entre setembro de 1976 e abril de 1984 240

QUANTIFICAÇÃO DO EFEITO DA OFERTA HÍDRICA SOBRE A RESPOSTA
DA SOJA (*Glycine max* (L.) MERRILL, À ÉPOCA DE PLANTIO NA REGIÃO
NORTE DO PARANÁ

Autor: EMILSON FRANÇA DE QUEIROZ

Orientador: Prof. Dr. LUIZ CARLOS BALDICERO MOLION

RESUMO

Este trabalho foi realizado em Londrina, no Estado do Paraná, e baseou-se em resultados obtidos através de um conjunto de experimentos planejados para o estudo da interação genotipo-ambiente. Este objetivo foi atingido através do plantio de algumas cultivares recomendadas de soja em diversas épocas e condições tecnológicas, nos anos agrícolas 1976/77 a 1984/85. O ambiente do local dos experimentos foi descrito principalmente sob o aspecto da disponibilidade hídrica, quantificada através do balanço hídrico seriado diário, utilizando a equação que exprime o método combinado de PENMAN, para estimativa da evapotranspiração potencial. Determinou-se a época de plantio que resulta no máximo rendimento para as três principais cultivares estudadas, ou seja, Paraná, Bossier e Santa Rosa.

Foram realizadas as análises de variância e

de regressão dos dados experimentais obtidos, o cálculo das estatísticas descritivas, das séries temporais de precipitação mensal de 55 localidades do Estado, bem como a análise de regressão periódica destas mesmas séries. Estas análises permitiram concluir-se pela necessidade de se praticar a diversificação de cultivares e épocas de plantio para se reduzir o efeito das flutuações inter-anuais de disponibilidade hídrica sobre o rendimento da Soja. Determinaram-se, também, modelos de respostas das cultivares de soja a época de plantio em termos de ciclo e rendimento. Posteriormente, derivaram-se os modelos que quantificam a influência da oferta hídrica sobre a resposta da soja à época do plantio. Finalmente, determinou-se a região mínima de abrangência destes resultados com base no estudo das séries históricas de diversas localidades do Estado, através da análise de correlação, da análise de regressão periódica e das estatísticas descritivas das séries, em associação com o Levantamento de Solos e das Cartas Climáticas Básicas do Estado do Paraná.

DETERMINATION OF WATER AVAILABILITY EFFECT ON SOYBEANS RESPONSE
TO PLANTING DATE IN THE NORTHERN REGION OF PARANA STATE

Author: EMILSON FRANÇA DE QUEIROZ
Adviser: Prof.Dr.LUIZ CARLOS BALDICERO MOLION

SUMMARY

This work was carried out at Londrina (Paraná State, Brazil), and was based in results from a set of experiments design to study the genotypic-environment interaction. With this purpose some recommended soybeans cultivars were planted in several dates and technological conditions, during the crop years 1976/77 to 1984/85. The experimental field environment was described particularly in regards to water availability, quantified by a daily water budget using the PENMANN'S equation, which expresses the combined method for estimate potential evapotranspiration. The planting dates which provide the maximum yield for the three mains cultivars studied; i.e. Paraná, Bossier and Santa Rosa, was determined.

Variance and regression analysis with acquired data were performed, the descriptive statistics calculation, of the monthly rainfall temporal series for 55 places in Parana State. It was also carried out the periodic regression analysis of above mentioned series. These results

led to the conclusion for the need of cultivar and planting date diversification in order to minimize the effects of water availability interannual fluctuations on the soybeans yield. Soybeans cultivars response models regarding cycle and yield at planting date were also determined. Further, models that quantify the water availability influence on soybeans response to planting date were also derived. Finally, it was found the minimum region for which this results could be valid based on the studies of historical series from several places in Parana State using correlation analysis, periodic regression analysis and the series descriptive statistics associated with the Soil Survey and Climatological Maps.

1. INTRODUÇÃO

Em regiões como o Norte do Paraná, situadas em latitudes médias, e originalmente cobertas por floresta latifoliada tropical, o solo está protegido das forças iniciais e promotoras da erosão, pelo manto de vegetação constituído pela copa das árvores, serrapilheira, raízes e demais elementos biológicos do solo. O arrastamento de partículas, pelo escoamento superficial da água, é dificultado pela presença desta capa protetora.

Nestas condições naturais, grande parte da água das chuvas penetra no solo e nele reside, por algum tempo, em condições de disponibilidade para as plantas.

Por outro lado, a grande variedade de espécies presentes numa floresta tropical exerce um efeito de suavização das anomalias da precipitação. Como resultado, tanto a disponibilidade de água para as plantas, quanto a

descarga da água através dos rios, oscilam gradual e lentamente em resposta às flutuações da precipitação. O ecossistema presente é um resultado natural do equilíbrio entre solo, planta, demais entes biológicos e atmosfera.

Com a inevitável instalação da agricultura é perturbada a parte do ciclo hidrológico que ocorre no solo. Em geral, aumenta o impacto de gotas de chuva sobre o solo, reduz-se a infiltração e o tempo de residência da água no solo, e aumenta o escoamento superficial da água. Estas modificações se refletem em imediato aumento dos diversos tipos de erosão hídrica.

Um outro fator de distúrbio deste ecossistema, ocorrido nas três últimas décadas, é o acentuado aumento dos índices de mecanização da agricultura brasileira. Um dos mais altos índices ocorre na sucessão trigo-soja, na qual, a maioria das operações, desde o preparo do solo até a colheita, é mecanizada. Especialmente no que se refere à operação de preparo do solo, esta mecanização pode induzir um aumento da erosão hídrica e a redução da capacidade de retenção de água, em virtude da destruição do estado natural dos agregados e de outras propriedades físicas do solo.

A estes dois fatores de distúrbio - instalação da agricultura e a posterior mecanização - soma-se um outro fator, também parcialmente inevitável, que é a instalação da monocultura. A monocultura, constituída por uma única espécie, ao contrário da floresta, é altamente sensível às

variações da disponibilidade hídrica.

A superposição destes distúrbios ambientais provocados pela instalação de monoculturas intensamente mecanizadas, rompendo o equilíbrio natural do ecossistema original, agravou as situações de excesso e deficiência hídrica e resultou na formação de um ecossistema altamente sensível às anomalias da precipitação.

Assim, as flutuações anuais de rendimento das culturas, motivadas por elementos meteorológicos de caráter aleatório, vêm se intensificando e se tornaram uma preocupação constante na Agricultura.

As soluções adotadas para reduzir o efeito destes distúrbios sobre a produção agrícola a um mínimo, encontram-se nas áreas de Manejo do Solo e da Água, Genética e Melhoramento de Plantas, e Manejo de Culturas.

As práticas de conservação do solo e da água visam o aumento do tempo de residência da água no sistema solo-planta, a redução e controle do escoamento superficial de água e, conseqüentemente, a redução do arrastamento de fertilizantes, matéria orgânica e partículas do solo. Também está incluída neste contexto a redução do impacto direto de gotas sobre o solo, e a preservação dos agregados naturais.

Os programas de melhoramento de plantas tem sido uma outra eficiente solução para amenizar os efeitos das flutuações da oferta hídrica. A criação de cultivares com alta estabilidade, e adaptadas a uma ampla faixa de condições

ambientais é um esforço neste sentido. Em relação à cultura da soja, está disponível ao agricultor brasileiro uma série de cem (100) cultivares de soja, diversificadas quanto a reação à doença, ciclo, sensibilidade térmica e fotoperiódica, resistência à seca e a outras condições edafo-climáticas.

Um terceiro esforço vem sendo ativado no sentido da geração, e conveniente utilização de práticas de manejo da cultura da soja, com vistas ao aumento de eficiência no uso da água disponível e ao aproveitamento dos mecanismos naturais da espécie para compensar as limitações ambientais.

Neste objetivo se enquadra, por exemplo, a exposição do germoplasma diversificado da espécie a uma faixa razoavelmente ampla de condições ambientais. Dentro dos limites ditados pelas exigências bioclimáticas da soja, espera-se que a diversificação do germoplasma, das condições ambientais e das práticas de manejo, sejam eficientes instrumentos para reduzir os efeitos das flutuações da disponibilidade hídrica sobre o rendimento.

Esgotados os recursos para influir no processo produtivo, um conjunto suplementar de medidas procura contribuir para estabilizar a oferta da produção de soja. Entre estas medidas situa-se a utilização de modelos numéricos de previsão do rendimento de soja com base em fatores meteorológicos.

Tendo em vista este panorama, e situando-se dentro do esforço de gerar um elenco de práticas de manejo que

resultem na máxima utilização da água disponível, o presente estudo tem o objetivo de:

1) determinar a época de plantio que resulte na maior produtividade de cultivares precoces, médias e tardias de soja;

2) estudar o efeito da diversificação de genótipos e ambientes sobre a estabilidade de produção de soja, frente às oscilações da disponibilidade hídrica;

3) derivar um modelo matemático que explique a influência da disponibilidade hídrica sobre a resposta da soja à época de plantio.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O conjunto de medidas adotadas pelo homem para reduzir o efeito das adversidades climáticas, causadas por deficiência hídrica, sobre a população e a produtividade agrícola, é apresentado no Quadro 2.1. Este quadro foi elaborado para colocar as medidas estudadas neste trabalho no conjunto completo de medidas adotadas para reduzir os efeitos de adversidades climáticas de grande escala, que resultem em deficiência hídrica. Com efeito, nenhuma das medidas arroladas acima produz sua máxima eficiência quando tomada isoladamente. Cada medida tem que ser vista como uma parcela do esforço global para o máximo aproveitamento das disponibilidades climáticas.

A revisão bibliográfica que se segue, teve em vista este panorama de medidas, mas foi orientada apenas para as medidas estudadas neste trabalho.

Quadro 2.1 - Medidas adotadas pelo homem para reduzir os efeitos de adversidades climáticas, causadas por deficiências hídricas, sobre a produtividade agrícola e a disponibilidade de alimentos.

-
1. Medidas que visam a redução de determinada queda de produção sobre a população e a economia.
 - 1.1. Formação de estoques reguladores nacionais e mundiais: reserva mundial de alimentos.
 - 1.2. Previsão de safras por métodos convencionais e por satélites artificiais.
 - 1.3. Política de preços mínimos e garantias governamentais ao produtor agrícola.
 - 1.4. Movimentação internacional e interregional de safras: importações e exportações de emergência e não rotineiras de produtos agrícolas.
 - 1.5. Seguro agrícola facultativo.
 2. Medidas que visam reduzir o efeito de determinada adversidade climática sobre a produção e a produtividade agrícola.
 - 2.1. Artificiais.
 - 2.1.1. Irrigação.
 - 2.1.2. Estimulação artificial da precipitação.
 - 2.2. Naturais.
 - 2.2.1. Melhoramento para resistência a seca.
 - 2.2.2. Práticas de conservação do solo que reduzam as perdas de água por escoamento superficial ou evaporação, e aumentem o tempo de residência da água no solo.
 - 2.2.3. Zoneamento agrícola.
 - 2.2.4. Diversificação de culturas.
 - 2.2.5. Instalação de determinada cultura em ampla área geográfica e com grande diversidade de condições ambientais, num mesmo ano agrícola.
 - 2.2.6. Práticas culturais.
 - 2.2.6.1. Plantio direto e sobre-semeadura.
 - 2.2.6.2. Determinação de época de plantio que maximize o ajuste entre o período crítico da cultura, para deficiência hídrica, com o período de máxima disponibilidade hídrica do local.
 - 2.2.6.3. Diversificação de épocas de plantio e população de plantas por unidade de área.
 - 2.2.6.4. Diversificação de cultivares na lavoura.
-

2.1. Exigências bioclimáticas, ciclo e rendimento da soja

Segundo PASCALE (1969) para que a cultura da soja prospere em determinada região é necessário o atendimento de exigências térmicas, hídricas e fotoperiódicas.

A soja, sendo uma espécie atermocíclica e afotocíclica tem tecidos ativos à temperatura e à luz solar somente na termofase e na fotofase positivas das variações anuais de temperatura e comprimento do dia (PASCALE, 1969).

2.1.1. Exigências térmicas

BROWN (1960), estudando o comportamento da soja em ambientes controlados, concluiu que a maior intensidade de desenvolvimento das plantas ocorre quando a temperatura média do ar está em torno de 30°C e que a temperatura de 10°C é o limite mínimo para o início do processo de desenvolvimento da espécie.

PARKER & BORTHWICK (1939) mostraram que a indução floral se processa somente quando as temperaturas são superiores a 13°C.

Em condições de campo, o período vegetativo da soja é iniciado quando a temperatura do ar é superior a 16°C (BROWN, 1960 e PASCALE, REMUSSI & MARZO, 1963). No início da estação de crescimento no Mississippi, EUA, as plantas começam a emergir de 12 a 14 dias após o plantio, em virtude de

que a temperatura do solo é baixa (HARTWIG, 1954).

Em experimento realizado por BERLATO & GONÇALVES (1978) no Rio Grande do Sul, a emergência ocorreu 12 dias após o plantio, realizado em setembro, no qual a temperatura do solo a 5 cm de profundidade era de 17°C. Quando o plantio foi realizado em dezembro, e a temperatura do solo elevou-se para 25°C, a emergência se processou em uma semana.

HESKETH et alii (1973) observaram que a duração dos diversos sub-períodos do ciclo vegetativo é função da temperatura e que estes sub-períodos decrescem linearmente com o aumento da temperatura, na faixa situada entre 13°C e 30°C. Por outro lado, LAWN & BYTH (1973) afirmam que uma influência significativa e isolada de temperatura sobre o ciclo da soja se restringe às cultivares insensíveis ao fotoperíodo ou às condições nas quais há ausência de variação fotoperiódica. BROWN & CHAPMANN (1960) observaram que as temperaturas inferiores a 25°C tendem a retardar o florescimento independentemente do fotoperíodo. HARTWIG (1954) atribuiu às variações anuais de temperatura, as diferenças de data de floração apresentadas por uma determinada cultivar, plantada numa mesma data, ao longo dos anos. BASNET et alii (1974) avaliando diversas cultivares nas altitudes de 1394 m e 1636 m, verificaram um retardamento do sub-período de pré-florescimento na maior altitude e atribuíram esta reação às diferenças térmicas. Assim, o controle do ciclo de uma determinada cultivar é exercido preponderantemente pela temperatura ape-

nas quando a variação da disponibilidade térmica ocorre numa mesma condição fotoperiódica.

BROWN & CHAPMANN (1960) constataram que o número de dias necessários para a ocorrência do florescimento está diretamente relacionado com fotoperíodo e temperatura.

PASCALE (1969) também demonstrou o fato de que as necessidades térmicas e a reação fotoperiódica de uma determinada cultivar são exigências bioclimáticas de magnitudes opostas. Desta forma, as cultivares que tem o menor fotoperíodo crítico são as que exigem a maior quantidade de somas térmicas para completar o ciclo.

MAJOR et alii (1975) verificaram que as temperaturas mais baixas e os fotoperíodos mais longos, encontradas nas altas latitudes, exercem, aditivamente, o efeito de retardar o florescimento.

Diversos pesquisadores constataram que o sub-período reprodutivo varia com menor intensidade que o sub-período vegetativo (LAWM & BITH, 1973; MAJOR et alii, 1975; PASCALE, 1969).

2.1.2. Exigências hídricas

As exigências hídricas constituem um outro fator a ser atendido para que se consiga decidir sobre a adaptação da soja a determinada região.

A soja exige que a semente absorva água até,

no m̄nimo, 50% de seu peso seco para que a germinação se processe normalmente (HUNTER & ERIKSSON, 1952).

Ueda, citado por HOWELL (1967), encontrou uma correlação positiva entre o teor de umidade do solo com a altura de planta, numero de nos, diâmetro do caule, numero de flores, aborto de legumes, numero e peso de semente. Por outro lado, RUNGE & ODELL (1960) trabalhando em Illinois, EUA, mostraram que o rendimento está positivamente correlacionado com a precipitação que ocorre no período de enchimento de grãos.

GRISSON et alii (1955) obtiveram um aumento de 390 kg/ha, em relação á parcela não irrigada, quando aplicaram irrigação depois que 25% da água disponível do solo foi extraída durante o desenvolvimento das sementes.

DOSS et alii (1974), SHAW & LAING (1965) e SIONIT & KRAMER (1977) também obtiveram significativa redução do rendimento da soja, quando impuseram deficiência de água durante o período de enchimento de grãos.

SHAW & LAING (1965) concluíram que a máxima redução do numero de vagens por planta, ocorreu durante a ultima semana de desenvolvimento das vagens e durante a formação de grãos, em consequência de deficiência hídrica. Quando a deficiência ocorreu durante a floração e início da formação de vagens, houve aborto de flores e queda de legumes. Durante a formação de grãos, a deficiência hídrica reduziu o tamanho da semente.

BERLATO & BERGAMASCHI (1978), determinando o consumo estacional de água pela cultura da soja no Rio Grande do Sul, obtiveram um consumo médio diário de 5,8 mm para a cultivar Bragg. Este consumo, expresso pela evapotranspiração diária, variou desde 2,2 mm no sub-período plantio e emergência, até o valor máximo de 7,4 mm, atingido no sub-período início de florescimento até o máximo surgimento de vagens. HERPICH (1968) obteve em Kansas um consumo máximo diário de 7,6 mm.

Para a relação ET/E_0 , entre a evapotranspiração da soja e a evaporação medida em tanque de evaporação classe A, BERLATO & BERGAMASCHI (1978) obtiveram os valores máximos durante a formação de vagens e grãos de soja.

BUNTLEY et alii (1973) verificaram, para três localidades do Tennessee (EUA), que as maiores reduções de rendimento ocorreram sempre que a precipitação era menor que a evapotranspiração potencial, durante toda a extensão ou parte do período de enchimento de grãos. Quando ocorreram condições desfavoráveis, com precipitação menor que a evapotranspiração, no início do florescimento, não foram determinadas reduções significativas do rendimento. ROGERS (1971) também demonstrou, na Carolina do Sul, que o período do enchimento de grãos de soja, é um período crítico em relação à água, pois associou rendimento e disponibilidade hídrica neste período.

BERLATO & GONÇALVES (1978) também obtiveram uma correlação altamente significativa entre o índice P/ETP

durante o período de enchimento de grãos (florescimento + 30 dias) e o rendimento de uma cultivar tardia de soja. Rendimentos acima da média geral do experimento somente foram obtidos quando a relação P/ETP no período crítico, de enchimento de grãos foi de 1,6, ou seja, quando a precipitação excedeu a evapotranspiração em cerca de 60%.

Os excessos hídricos poderão modificar o rendimento da soja de formas variáveis. Se ocorrerem associados a altas temperaturas e drenagem livre resultam em elevados rendimentos, como é o caso dos meses de dezembro e janeiro na Região Norte do Paraná. Se a drenagem não for suficiente, haverá falta de aeração do solo e os rendimentos diminuirão. Os excessos de umidade na maturação e na colheita poderão ser prejudiciais, especialmente para temperaturas superiores a 15°C. Nestas condições, as plantas continuam vegetando, a queda de folhas é atrasada, as sementes não completam a maturação e as doenças são favorecidas (PASCALE, 1969). É freqüente que ocorram estas condições durante o mês de fevereiro na Região Norte do Paraná.

2.1.3. Exigências fotoperiódicas

A adaptação da espécie a uma determinada região é, principalmente, dependente das disponibilidades hídricas e térmicas, enquanto as cultivares têm sua adaptação controlada pelo fotoperíodo.

MOOERS (1908) relatou que, com o atraso no plantio, o ciclo da soja diminuiu, e a maior redução ocorreu entre o plantio e a floração. Com um atraso de 60 dias do plantio a cultivar tardia, Mammouth Yellow, e a precoce, Ito Sam, sofreram retardamento da maturação de 19 e 52 dias, respectivamente. Esta reação foi explicada doze anos mais tarde, por GARNER & ALLARD (1920), quando descobriram que o fotoperíodo é o fator primordial no controle da floração e classificaram a soja entre as espécies que florescem quando os dias se tornam mais curtos.

CARTTER & HARTWIG (1967) apresentam um exemplo clássico do efeito do fotoperíodo em soja que é a diminuição do sub-período emergência-floração e do seu ciclo total a medida que uma cultivar é levada para latitudes mais próximas ao Equador. A cultivar Clark floresce em Winnipeg, Manitoba ($41^{\circ}28'N$) em torno de 10 de agosto quando o comprimento do dia é de 15 horas. Entretanto, em Urbana, Illinois ($80'$ mais próxima do Equador) a mesma cultivar floresce já em primeiro de julho, quando este comprimento do dia é atingido, resultando no encurtamento de seu ciclo.

CARTTER, citado por CARTTER & HARTWIG (1967) mostrou outro exemplo de resposta da soja à variação do comprimento do dia com a latitude. A data de maturação da cultivar Lincoln, quando plantada em Madison, Wisconsin ($42^{\circ}34'N$), Urbana, Illinois ($40^{\circ}8'N$) e Stoneville, Mississippi ($32^{\circ}25'N$) ocorreu em 02 de outubro, 17 de setembro e 12 de agosto, respec-

tivamente. Este exemplo ilustra o fato de que o comprimento do ciclo de uma cultivar de soja depende da latitude em que é plantada. Por outro lado, se evidencia que os termos precoce, média e tardia, usados para descrever uma cultivar de soja, têm significado apenas quando estão relacionados a um local e data específicos.

A influência do fotoperíodo sobre a soja também se faz sentir quando uma cultivar é plantada em várias épocas numa mesma latitude. BUSS et alii (1972), trabalhando no norte do Paraná com cultivares de diferentes ciclos e em três datas de plantio, encontraram diferentes reduções de ciclo, com atraso no plantio, para as diversas cultivares. O atraso do plantio desde fins de outubro até fins de dezembro, causou reduções de 51, 35 e 31 dias nos ciclos das cultivares Hardee, Bragg e Davis, respectivamente. Uma cultivar precoce, Paraná, apresentou uma redução de apenas 16 dias para as mesmas datas de plantio.

FINARDI (1979), trabalhando no Rio Grande do Sul com as 16 cultivares do Ensaio Nacional de Ecologia de Soja, observou que com o atraso no plantio houve redução dos subperíodos emergência-florescimento, duração do florescimento, florescimento-maturação e ciclo total de todas as cultivares. A duração do período vegetativo apresentou associação estatística negativa com a temperatura média, para todas as 16 cultivares, e associação positiva com o fotoperíodo médio, principalmente para as cultivares tardias. As cultiva-

res mais precoces do Ensaio (Forrest, Paranã e Pampeira) não revelaram correlação significativa com o fotoperíodo médio.

FINARDI (1979) também obteve associação estatística significativa entre a duração do ciclo e o fotoperíodo médio. A correlação entre a duração do ciclo e a temperatura média somente foi encontrada através da correlação parcial.

A duração do período vegetativo (emergência - floração) esteve associada significativamente ao fotoperíodo e temperatura apenas na análise de correlação total, sugerindo uma provável influência interativa das duas variáveis sobre a duração deste sub-período.

SILVA (1984), estudando sete cultivares do mesmo Ensaio Nacional de Ecologia no Rio Grande do Sul, observou que a duração dos sub-períodos de pré-florescimento, pós-florescimento e ciclo total reduziu-se com o atraso no plantio. Observou também que as cultivares tardias apresentavam maior redução do sub-período de pré-florescimento e ciclo total do que as precoces. As precoces exibiram maior redução do sub-período de pós-florescimento.

A conceituação de uma cultivar tardia é feita por HINSON et alii (1969) ao afirmarem que uma cultivar tardia exige maior número de horas de escuridão para florescer e, portanto, entra em maturação mais no fim da estação. A floração tardia permite um longo período vegetativo, com influência decisiva sobre a população ideal, em virtude da

possibilidade de cada planta ocupar uma maior área.

Uma cultivar tardia, em uma dada latitude, mostrará menor resposta que uma precoce a plantios tardios, no que se refere à data que a maturação ocorre (WEISS et alii, 1950; OSLER & CARTTER, 1954), porque a duração de seu ciclo será mais drasticamente reduzida do que a de uma precoce. Esta diferença se deve, principalmente, à redução do período compreendido entre a emergência e a floração, sendo que a duração do período entre a floração e a maturação é normalmente pouco influenciada pela época de plantio. O ciclo das tardias ainda é mais longo que o das médias e precoces, mesmo quando ele sofre redução com atraso no plantio. Em nosso meio, é recomendado que no fim da época de plantio se utilize as cultivares de ciclo longo, pois são as únicas que apresentam desenvolvimento adequado para as condições de umidade e fertilidade existentes.

Quando o plantio é feito em grandes áreas os agricultores ampliam a faixa de colheita com o uso de duas ou mais cultivares de diferentes grupos de maturação. Isto ocorre porque o plantio de uma mesma cultivar em várias datas não modifica muito a data em que a floração e, conseqüentemente, a data de maturação ocorrem.

Até certo ponto, as exigências de uma determinada cultivar podem ser harmonizadas com as disponibilidades da região pelo plantio em época adequada.

2.2. Época de plantio e rendimento da soja

Os mais altos rendimentos nos EUA, normalmente são obtidos de plantios feitos em início de maio. TORRIE & BRIGGS (1955) informaram que nas latitudes mais altas do norte dos EUA, os rendimentos máximos podem ser obtidos em início de maio. As cultivares precoces não apresentaram variação no rendimento e as tardias produziram cada vez menos, se plantadas a partir de 20 de maio. WEISS et alii (1950) também não encontraram diferença significativa para o rendimento de cultivares precoces ao longo das épocas de plantio, mas as tardias diminuíram progressivamente após primeiro de maio. OSLER & CARTTER (1954) e FEASTER (1949) afirmaram que as cultivares tardias produziram seu maior rendimento em plantios no início da estação e as precoces apresentaram seu maior rendimento quanto plantadas mais tarde.

VALDIVIA & MADARIAGA (1968) no Chile, obtiveram os mais altos rendimentos em início de novembro.

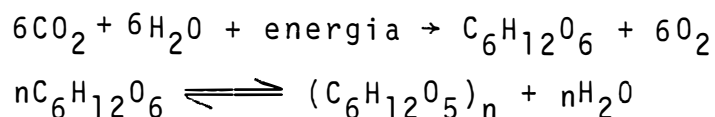
Em nosso meio, a época de plantio mais aconselhada para a produção de soja está compreendida entre 15 de outubro e 15 de dezembro. Os mais altos rendimentos são obtidos em novembro e diminuem à medida que o plantio é atrasado (BUSS et alii, 1972; MOTA et alii, 1973; EMBRAPA, 1974; BERGAMASCHI et alii, 1977; QUEIROZ et alii, 1971; QUEIROZ et alii, 1979 e QUEIROZ et alii, 1979).

2.3 - Fundamentos Teóricos de Algumas Relações Solo-Planta- -Atmosfera

2.3.1 - Importância da água na vida da planta

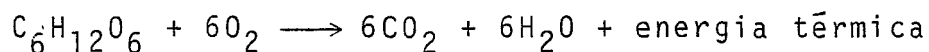
O papel desempenhado pela água na fotossíntese é aqui tomado como exemplo de sua participação na vida da planta.

A síntese de açúcares, resultante da combinação do CO_2 atmosférico com a água oriunda do solo, acompanhada pela conversão de energia solar em energia química, no processo da fotossíntese, pode ser representada pela seguinte equação:



Este processo é essencial na produção de grande parte dos alimentos que consumimos e libera constantemente para a atmosfera o oxigênio necessário à nossa respiração.

Por outro lado, no processo de respiração das plantas, alguns produtos fotossintéticos são reoxidados e produzem os constituintes, energia e água.



O exame sumário desta equação exhibe o papel da água como um dos principais agentes metabólicos da vida da

planta, ou seja, como a fonte dos átomos de hidrogênio para a redução do dióxido de carbono e também como um produto da respiração (HILLEL, 1982).

A água encontrada em todas as células vegetais, sendo solvente e transportador de íons e compostos, garante os fluxos essenciais para a vida da planta e que ocorrem no solo e na própria planta. É o principal componente estrutural das plantas, constituindo, frequentemente, 90% ou mais da matéria fresca total. Grande parte desta água encontra-se nos vacúolos das células sob pressão que mantém as células túrgidas e confere rigidez à planta como um todo. (HILLEL, 1982)

As mesófitas, entre as quais se situa a maioria das espécies agrícolas, são extremamente sensíveis à insuficiência do fornecimento de água para repor a parte que é evaporada pela transpiração. Em condição de insuficiência hídrica ocorre um sério distúrbio aos diversos processos metabólicos que provocam o crescimento e o desenvolvimento vegetal. No Quadro 2.2, adaptado de HSIAO et alii (1976), encontram-se sumarizados os principais processos afetados pela deficiência hídrica. Neste Quadro (2.2) também está expresso o nível de redução de pressão osmótica no tecido necessário para afetar cada processo e parâmetro.

2.3.2 - O continuum solo - planta - atmosfera

Os atuais estudos da questão da extração e u-

QUADRO 2.2 - Sensibilidade de alguns parâmetros e processos metabólicos ao estresse hídrico. (-) redução (+) aumento.

Parâmetros ou processos metabólicos afetados	Sensibilidade do estresse		
	0	10	20
crescimento das células (-)	-----	-----	-----
síntese da parede celular (-)	-----	-----	-----
síntese de proteínas (-)	-----	-----	-----
nível de nitrato redutase (-)	-----	-----	-----
ácido abscísico (+)	-----	-----	-----
abertura de estômatos (mesófitos)(-)	-----	-----	-----
assimilação de CO ₂ (mesófitos)(-)	-----	-----	-----
acumulação de prolina (+)	-----	-----	-----
acumulação de açúcar (+)	-----	-----	-----

Fonte: HSIAO et alii (1976).

tilização da água do solo pelas plantas, estão baseados no reconhecimento de que as partes de uma determinada área vegetada - solo, planta e atmosfera - formam um sistema dinâmico, fisicamente integrado, e no qual ocorrem vários fluxos interdependentes e ligados como numa cadeia. Neste sistema, grandes quantidades de água, são transferidas do solo para a atmosfera, através das plantas, em resposta a gradientes de energia potencial. Ao longo do processo a água sofre uma mudança do estado líquido para o estado de vapor nas cavidades estomáticas das folhas. PHILLIP (1966) designou este sistema como o continuum solo - planta - atmosfera.

HONERT (1948) mostrou que a resistência ao escoamento da água através das várias partes do sistema, pode ser evidenciado através da queda de potencial ao longo do mesmo e que a maior diferença de potencial ocorre entre as folhas e a atmosfera. Considerando que os valores típicos de Ψ solo, Ψ raiz, Ψ folha e Ψ ar, nas condições normais onde ocorre a vida vegetal, situam-se respectivamente em torno de -1, -10, -15 e -1000 bars.

HONERT (1948) mostrou que a diferença Ψ folha - Ψ ar é maior que a soma de todas as outras em pelo menos uma ordem de magnitude. Portanto, a maior resistência ocorre na transpiração, na qual está envolvida uma mudança de fase da água.

Com efeito, se o potencial químico da água na atmosfera, for expresso em termos da umidade relativa do ar

através da equação:

$$\Psi = RT \ln (e/e_s) \quad (2.1)$$

onde:

R = constante universal dos gases

T = temperatura em graus Kelvin

e/e_s = umidade relativa do ar

então uma variação de umidade relativa de 98% a 48% representa uma faixa de potencial químico da água que vai de, aproximadamente -100 bar até -1000 bar.

Portanto, se a maior resistência está entre as células da folha e o ar, isto implica em que o fluxo através do continuum solo - planta - atmosfera, é determinado principalmente pelos fatores que regulam a transpiração. Este fato torna os estudos e trabalhos relacionados com a determinação da evapotranspiração essenciais para o entendimento da evapotranspiração da planta no ambiente.

2.3.3 - O perfil da absorção da água pelas plantas

A taxa na qual as plantas absorvem água de um determinado volume de solo depende da densidade do sistema radicular, da condutividade do solo e da diferença entre a sucção de água do solo e a sucção das raízes (HILLEL, 1982).

A taxa de absorção de água pelas raízes não é uniforme ao longo do perfil, pois o aumento da taxa de absor

ção resulta em maior redução de umidade do solo e portanto a taxa de absorção de água permanece constante (HILLEL, 1982).

OGATA et alii (1960), encontraram desuniformidade na absorção da água em distintas profundidades do solo.

ROSE & STERN (1967) apresentaram uma análise da velocidade de remoção da água de diferentes profundidades do solo em relação à umidade e propriedades hidráulicas e em relação à taxa de absorção de água pelo sistema radicular, e escreveram:

$$\int_{t_1}^{t_2} (i - v_z - q) dt - \int_0^z \int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial \theta}{\partial t} dz dt = \int_0^z \int_{t_1}^{t_2} r_z dz dt \quad (2.2)$$

i = taxa de fornecimento da água pela irrigação ou chuva;

q = taxa de evaporação na superfície do solo;

v_z = fluxo vertical da água na profundidade z ;

θ = taxa de decréscimo da umidade do solo devido a absorção de água pelas plantas.

A taxa média de absorção de água pelas raízes na profundidade z é

$$\bar{r}_z = \int_{t_1}^{t_2} dz dt / (t_2 - t_1) \quad (2.3)$$

O padrão de extração de água do solo por um

sistema radicular pode então ser determinado por cálculos repetidos, com base nas equações (2.2) e (2.3) para pequenos e sucessivos intervalos de tempo e profundidade.

Portanto, a absorção total de água pelas raízes é dada por:

$$R_z = \int_0^z rz dz \quad (2.4)$$

Aplicando este método a uma cultura de algodão, ROSE & STERN (1967) determinaram que a maior parte da água extraída por esta cultura ocorre nos 30 cm mais próximos à superfície, durante os primeiros estágios. Por outro lado, ROSE & STERN (1967), também concluíram que a maior parte da absorção de água ocorre nos primeiros 100 cm do perfil do solo.

Portanto, a zona em que ocorre absorção de água pelas plantas não é constante. Ao longo do ciclo, a absorção ocorre a profundidades cada vez maiores, admitindo-se que se estabiliza a partir de determinado ponto.

2.3.4 - O processo de secagem de um solo desnudo

A manutenção do equilíbrio entre a demanda evaporativa da atmosfera e a água que é fornecida às plantas é indispensável para um crescimento normal das mesmas.

O solo se constitui num indispensável reservatório de água e dos nutrientes nele depositados e por ela transportado para as plantas. Com efeito, a demanda evaporativa

da atmosfera é contínua, enquanto o fornecimento natural de água através das chuvas é aleatório. É através das forças de retenção da água que o solo regula a disponibilidade de água para a planta ou sua liberação diretamente para a atmosfera. Essas forças, portanto, dominam o processo de secagem do solo.

Admitindo como constante a demanda evaporativa da atmosfera, foi observado por FISHER (1923) e por PEARCE et alii (1949), que o processo de secagem do solo ocorre em três estágios, ao longo dos quais aumenta a resistência oferecida pelo solo à evaporação.

Enquanto o solo está suficientemente úmido, para suprir de água a zona de evaporação, com uma taxa compatível com a demanda evaporativa, ocorre um estágio inicial no qual a taxa de secagem permanece constante. Durante este estágio, a taxa de evaporação é limitada e controlada pelas condições meteorológicas externas.

Ao longo do segundo estágio, a taxa de evaporação cai progressivamente abaixo da taxa máxima e potencial. Neste estágio, a taxa de evaporação é limitada à taxa pela qual o perfil do solo pode liberar umidade para a zona de evaporação.

É possível que se estabeleça um terceiro estágio, no qual a taxa de evaporação é baixa, e que permaneça por um tempo que pode durar desde dias até meses.

Em condições externas semelhantes, o primeiro

estágio de secagem será observado por maior tempo num solo argiloso do que num solo arenoso. Com efeito, um solo argiloso mantém maiores volumes de umidade e condutividade a medida que a sucção se desenvolve na zona superficial do perfil.

Nos locais onde o nível de água está próximo à superfície, a sucção na superfície do solo é baixa e a taxa de evaporação é determinada pelas condições externas. À medida que o lençol d'água torna-se mais profundo e a sucção na superfície aumenta, a taxa de evaporação tende para um valor limite e independente dos valores atingidos pela demanda evaporativa da atmosfera.

A taxa de evaporação máxima diminui com a profundidade do lençol de água mais rapidamente em solos de textura grossa do que em solos de textura fina.

2.3.5 - Forças atuantes na camada limite planetária

A aparente digressão constituída pelos itens (2.2,3) e (2.2.4) tem o objetivo de acentuar que as equações e parâmetros usados neste trabalho para a descrição do ambiente físico, apesar de que sejam baseados em princípios físicos sólidos, ainda constituem simplificações. Por outro lado, este item tem o objetivo de tornar clara a grande influência de fenômenos que ocorrem em grande escala sobre as respostas e resultados obtidos num determinado ponto do planeta.

Este raciocínio, que é considerado válido em

termos da atmosfera, também deve ser aplicado às equações e parâmetros que procuram descrever os processos dinâmicos que ocorrem no solo e nas plantas e que tem sido, frequentemente, objeto de revisões trazidas nos trabalhos da área agrônômica.

Os trabalhos conduzidos em grande escala consideram que as principais forças que atuam na atmosfera são a força de Coriolis, a gravidade efetiva, a força do gradiente de pressão e a força de atrito.

A equação do movimento dos fluidos da atmosfera na sua forma geral, usando a notação tensorial, para qualquer das três direções do sistema de coordenadas é:

$$\frac{du_i}{dt} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{g}{T} \delta_{i3} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - 2\epsilon_{ijk} n_j u_k \quad (2.5)$$

(1) (2) (3) (4) (5) (6) (7)

O termo (1), taxa de variação total de momentum por unidade de massa, pode ser expandido em dois termos:

- termo (2) correspondente à taxa de variação local;
- termo (3) correspondente à taxa de variação advectiva.
- termo (4) é igual a força do gradiente de pressão na direção x_i
- termo (5) representa as forças de flutuação, e que agem somente na vertical.

O termo (6) representa as forças viscosas e o termo (7) é a força de Coriolis (HOLTON, 1979; SHAW, 1977).

Considerando somente os componentes horizon-

tais tem-se:

$$\frac{du_i}{dt} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial u_i} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - 2\Omega \epsilon_{ijk} n_j u_k \quad (2.6)$$

A equação do movimento é consideravelmente simplificada quando é aplicada à camada limite, com as seguintes suposições:

1) a camada é estacionária ($du_i/d_t = 0$) e o valor médio dos componentes do vento não mudam com o tempo;

2) a camada é horizontalmente homogênea ou seja, o vento médio é horizontal e não há gradientes das quantidades médias na direção horizontal. Apenas a pressão atmosférica apresenta gradientes horizontais;

3) o estresse viscoso é desprezível quando comparado com o estresse turbulento (SHAW, 1977).

2.3.5.1 - escoamento sem atrito

No caso do escoamento sem atrito na atmosfera livre acima da camada limite, as equações do escoamento horizontal tornam-se:

$$0 = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + f\bar{v} \quad (2.7)$$

$$0 = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} - f\bar{u} \quad (2.8)$$

Estas são as equações do vento geostrófico nas

quais existe um balanço entre a força de Coriolis e a componente horizontal da força do gradiente de pressão (HOLTON, 1979).

2.3.5.2 - Escoamento na camada superficial

Como a magnitude da força de Coriolis é diretamente proporcional à velocidade do vento ($C = 2\Omega \sin \theta V$) e desde que a velocidade do vento cai a zero na superfície, a força de Coriolis desaparece junto ao solo. Por outro lado, a força do gradiente de pressão varia pouco com a altura e a força de atrito atinge o seu valor máximo na superfície.

Assim, é possível definir uma camada onde a força de Coriolis possa ser desprezada. Para esta camada pode-se escrever as seguintes equações do movimento:

$$0 = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \quad \text{e} \quad (2.9)$$

$$0 = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \quad (2.10)$$

Estas equações mostram que o estresse varia com a altura numa taxa proporcional ao gradiente horizontal de pressão.

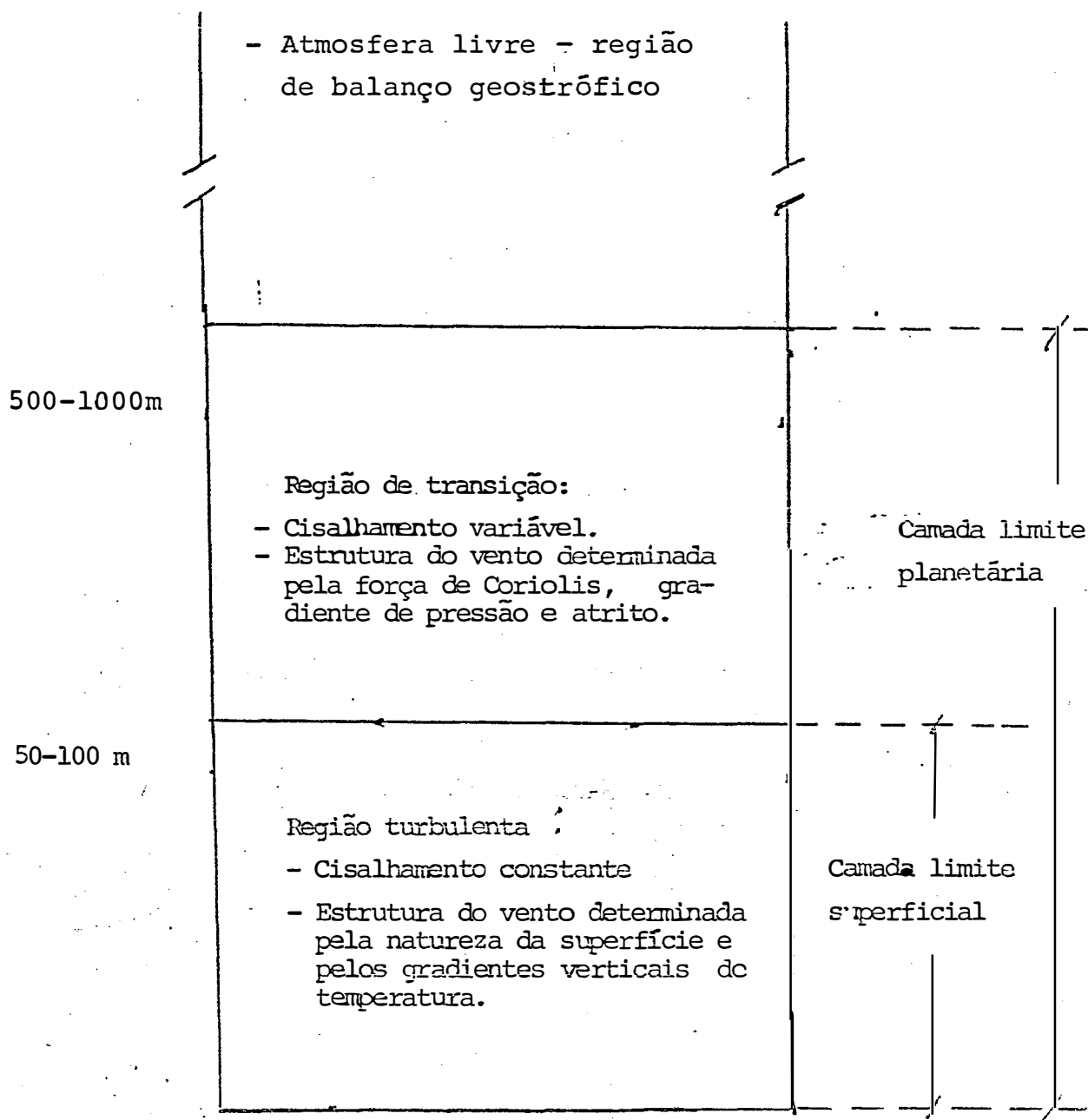


Figura 2.1. Divisão da atmosfera em camadas conforme a predominância das forças de atrito, Coriolis e gradiente de pressão. (FONTE: SHAW (1977))

2.3.5.3. A camada de Ekman

Ainda ao nível da escala sinótica, através de todo conjunto da camada limite planetária, é necessário não só considerar a força de fricção como também a força de Coriolis e temos:

$$0 = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} + f\bar{v} \quad (2.11)$$

$$0 = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} - f\bar{u} \quad (2.12)$$

O vento geostrófico torna-se paralelo às isobatas, pois a força de Coriolis deve estar em balanço com a força do gradiente de pressão. Entretanto, em virtude dos efeitos adicionais do atrito, os ventos na camada limite planetária são sub-geostróficos para manter o balanço de forças.

2.3.6 - Relações fluxo-perfil e deslocamento do plano zero na sub-camada dinâmica

Entretanto, quando se trabalha ao nível da micro-escala, como é o caso do presente trabalho, as forças de Coriolis e de flutuação poderiam ser desprezadas.

Neste item serão apresentadas as relações fluxo-perfil, para velocidade do vento e umidade específica.

Em virtude das dificuldades no ajustamento das equações, estas relações não são derivadas das equações de transporte. Obtêm-se as relações através do princípio da similaridade e da aplicação da análise dimensional. A análise dimensional, entretanto, só estabelece a possível existência de uma relação funcional entre as quantidades adimensionais. A função propriamente dita, deve ser determinada através de experimentos. Também algumas constantes precisam ser determinadas experimentalmente (BRUTSAERT, 1982).

2.3.6.1 - A sub-camada dinâmica

A sub-camada dinâmica consiste de uma região, totalmente turbulenta, que é suficientemente próxima da superfície do solo para que os efeitos das forças de Coriolis e de flutuação possam ser desprezados. A sub-camada dinâmica, por outro lado, está situada bastante longe da superfície para que a viscosidade do ar e os elementos individuais

da rugosidade, não tenham efeito no movimento.

Sob condições diabáticas, isto é, com extratificação do ar por densidade, esta camada pode se estender apenas por alguns metros. Porém, sob condições de estabilidade neutra, a sub-camada dinâmica ocupa toda a sub-camada superficial (BRUTSAERT, 1982).

2.3.6.2 - Perfil logarítmico do vento

Atualmente está bem verificado experimentalmente e, portanto, quase que aceito por definição, que na sub-camada dinâmica os perfis de velocidade média do vento, umidade específica média e temperatura média, são funções logarítmicas de z . Esta relação logarítmica foi estabelecida primeiramente para o vento médio (BRUTSAERT, 1982).

A lei do perfil logarítmico do vento foi estabelecida no final dos anos 20 e introduzida na meteorologia por Prandtl (1932) e é útil para a compreensão da transferência turbulenta de vapor de água e outras propriedades.

Uma das mais simples derivações desta lei é apresentada por LANDAU & LIFSHITZ (1959). Este trabalho baseou-se na análise dimensional e consistiu em notar que, num escoamento plano paralelo, o aumento da velocidade média do vento na direção z , (\bar{u}/dz) , evidencia a existência de um fluxo de momentum para baixo. Evidencia também o fato de que a superfície é um sumidouro de momentum.

Assim, o gradiente de velocidade média num fluido de densidade ρ , é determinado pela tensão de cisalhamento τ_0 , na parede, e pela distância à parede Z . No caso da atmosfera, a parede é a superfície do solo.

Estas variáveis podem ser combinadas numa única quantidade adimensional.

$$k = \frac{u^*}{z \left(\frac{d\bar{u}}{dz} \right)} \quad (2.13)$$

Nesta expressão u^* é a velocidade de fricção definida por:

$$u^* = \left(\frac{\tau_0}{\rho} \right)^{1/2} \quad (2.14)$$

sendo τ_0 é a tensão de cisalhamento na superfície.

Experimentalmente verificou-se que k é aproximadamente constante e foi designada como a constante de von Kármán. O seu valor, que é da ordem de 0,40, ainda é objeto de alguma incerteza. Foram relatados na literatura valores experimentais desde 0,35 (BUSSINGER et alii, 1971 e HOGSTRON, 1974) até 0,47 (PIERCE & GOLD, 1971).

Entretanto, no presente, não há nenhuma razão para abandonar o valor de consenso que considera $k = 0,40$ (HICKS, 1976; YAGLON, 1977).

Tomando a expressão (2.13) e rearranjando tem-se:

$$\frac{u^*}{kz} = \frac{du}{dz}, \text{ ou ainda:}$$

$$\frac{u^*}{k} \cdot \frac{dz}{z} = du$$

Integrando esta expressão entre dois níveis na atmosfera, Z_1 e Z_2 , e entre as velocidades do vento u_1 e u_2 , nestes níveis temos:

$$\int_{Z_1}^{Z_2} \frac{u^*}{k} \frac{dz}{z} = \int_{u_1}^{u_2} du, \text{ ou}$$

$$\frac{u^*}{k} \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{dz}{z} = \int_{u_1}^{u_2} du$$

$$\frac{u^*}{k} \ln z \Big|_{Z_1}^{Z_2} = u \Big|_{u_1}^{u_2}$$

$$\frac{u^*}{k} (\ln Z_2 - \ln Z_1) = u_2 - u_1$$

Então:

$$u_2 - u_1 = \frac{u^*}{k} \ln \frac{Z_2}{Z_1} \quad (2.15)$$

Os subscritos referem-se a dois níveis na sub

camada dinâmica.

Alternativamente (2.15), pode ser escrita como

$$\bar{u} = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{Z}{Z_{0m}} \right) \text{ para } Z \gg Z_{0m} \quad (2.16)$$

onde Z_{0m} é uma constante de integração cuja dimensão é comprimento. O valor desta constante depende das condições no limite mais baixo da região de validade da equação (2.13).

Graficamente Z_{0m} , pode ser visualizada como a intersecção, na velocidade 0, da reta resultante de uma plotagem dos dados de velocidade média do vento x altura, na subcamada dinâmica, em papel semi-logarítmico (Figura (2.3)).

Quando a altura média ou tamanho dos elementos de rugosidade da superfície é muito maior que (ν/u^*) a superfície é chamada dinamicamente rugosa.

Para uma superfície rugosa Z_{0m} é normalmente escrito como Z_0 :

$$Z_{0m} = Z_0$$

onde Z_0 é designado como o comprimento da rugosidade da superfície.

Exceto para obstáculos flexíveis ou para ondas de água, o valor de Z_0 é teoricamente independente do escoamento. Portanto, Z_0 é uma função da natureza da superfície, ou seja, é função da geometria, do tamanho e do arranjo espacial dos elementos rugosos (BRUTSAERT, 1982).

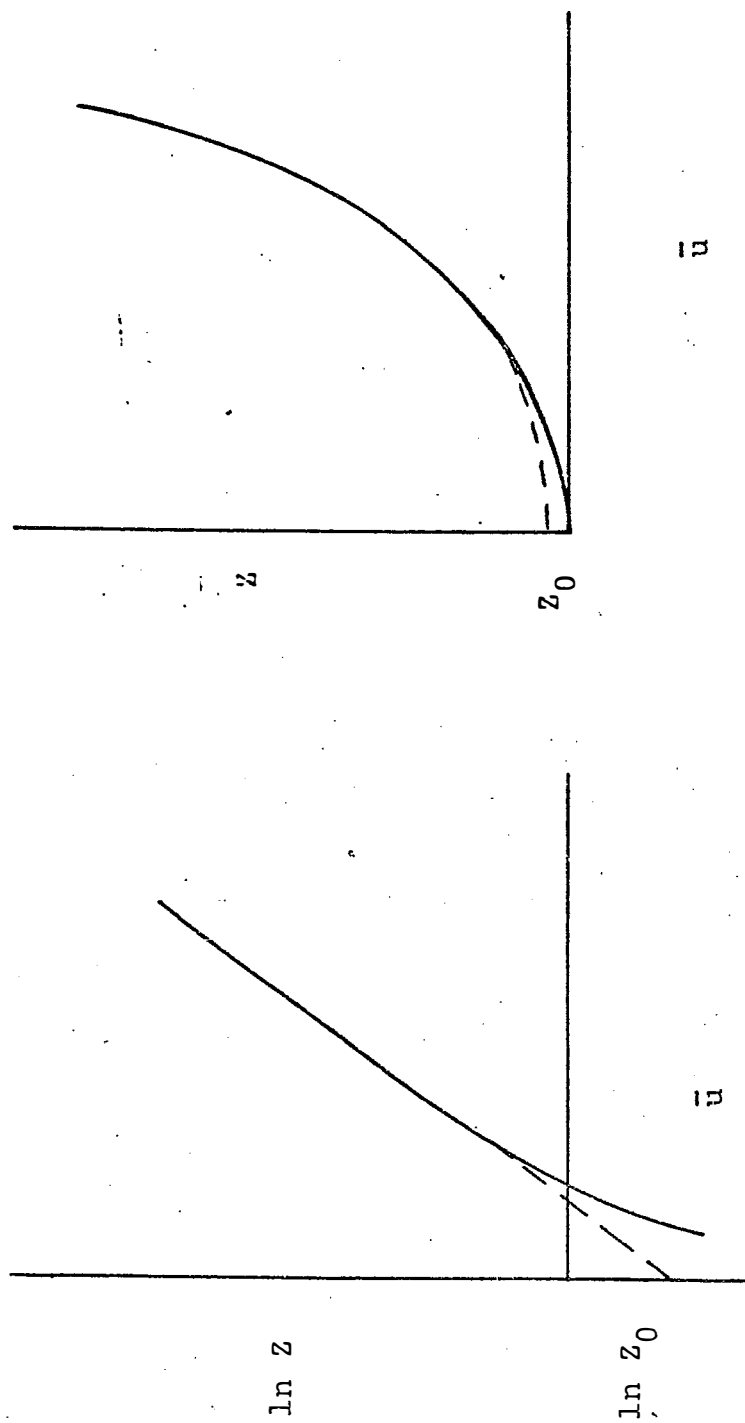


Figura 2.2 Método empírico de determinação de parâmetros aerodinâmicos (z_0) sujeito à tendência conforme a habilidade do operador. Fonte: SHAW (1977).

2.3.6.3 - Deslocamento do plano zero

No caso de superfícies rugosas há uma certa incerteza relacionada com o nível de referência, $Z = 0$, usado em (2.13).

Claramente, para elementos rugosos colocados muito esparsamente, este nível pode ser tomado na base da rugosidade. Por outro lado, para uma situação onde exista alta densidade dos elementos rugosos, $Z = 0$ em (2.13) poderia se referir ao nível do topo destes mesmos elementos rugosos.

Entretanto, para a maioria das situações, o nível zero de referência deveria ser colocado a uma determinada altura entre a base e o topo dos obstáculos de rugosidade.

Para minimizar esta dificuldade é uma prática comum definir $Z = 0$ como o nível da base dos elementos rugosos e permitir uma mudança no nível de referência, do sistema de coordenada na formulação da similaridade.

De acordo com isto, em lugar de (2.13) pode-se escrever:

$$k = \frac{u^*}{(Z-d) \frac{du}{dz}} \quad (2.17)$$

e, após a integração, em lugar de (2.16) tem-se:

$$\bar{u} = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{Z-d}{Z_0} \right) \quad (2.18)$$

onde d é chamado a altura do deslocamento do plano zero.

2.3.6.4 - Perfil de umidade específica

O mesmo tratamento adimensional usado para derivar as expressões (2.13) e (2.17) pode ser estendido para derivar expressões para o perfil de umidade específica e temperatura (BRUTSAERT, 1982).

Um decréscimo da umidade específica com a altura sugere que há um fluxo de vapor de água para cima. A dinâmica deste escoamento é governada por $d\bar{u}/dz$, ζ_0 e $(z-d)$.

Desde que estas três variáveis estão interrelacionadas por (3.5), somente duas delas, digamos ζ_0 e $(z-d)$, são exigidas para descrever o escoamento.

Cinco variáveis com quatro dimensões básicas admitem uma razão adimensional. Então pode-se escrever:

$$-k_v = \frac{E}{u^* (z-d) \rho \left(\frac{d\bar{q}}{dz} \right)} \quad (2.19)$$

que é considerada invariante como em (2.13) e (2.17).

k_v em (2.19) é a constante de von Kármán para o vapor de água e que também pode ser escrita como:

$$k_v = a_v k$$

A razão $a_v = k_v/k$ entre as constantes de von Kármán, conforme sugerido na revisão de DYER (1974) pode ser

tomada como igual à unidade ($a_v = 1,0$), para propósitos práticos.

Rearranjando a expressão (2.19) e integrando entre os níveis Z_1 e Z_2 dentro da sub-camada dinâmica tem-se:

$$\bar{q}_1 - \bar{q}_2 = \frac{E}{a_v k u^* \rho} \ln \left(\frac{Z_2 - d_0}{Z_1 - d_0} \right)$$

se \bar{q}_s é o valor da umidade específica na superfície, o perfil pode ser escrito como:

$$\bar{q}_s - \bar{q} = \frac{E}{k u^* \rho} \ln \left(\frac{Z - d_0}{Z_{0v}} \right) \quad (2.20)$$

para $Z \gg Z_{0v}$ e $a_v = 1,0$,

onde Z_{0v} é o comprimento da rugosidade para vapor de água.

Em situações onde não é necessário considerar d tem-se:

$$\bar{q}_2 - \bar{q}_1 = \frac{E}{k u^* \rho} \ln \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right) \quad (2.21)$$

2.3.7 - Cálculo da evaporação sob condições neutras

A mais simples expressão para o cálculo da evaporação de uma superfície livre de água, foi apresentada por Dalton, em 1802, e que se constituiu num método aerodinâmico simplificado:

$$E_o = (e_s - e_a) f(u)$$

na qual:

E_o = evaporação sobre a superfície livre de água;

e_s = pressão de vapor de saturação na superfície;

e_a = pressão de vapor do ar observada a uma determinada altura da superfície;

$f(u)$ = função da velocidade horizontal do vento.

Esta expressão, em virtude da inconveniente dificuldade de estimativa da medida do valor de e_s , para uma superfície vegetal, não é largamente usada para estimar a evapotranspiração.

ROHWER (1934), após avaliar as constantes da expressão de Dalton, propôs a seguinte expressão:

$$E_o = 0,40 (e_s - e_a) (1 + 0,17 u^2) \text{ mm/dia}$$

Ainda na primeira metade do Século XX, THORNTON WAITE & HOLZMANN (1939) derivaram uma expressão para cálculo da evaporação, sob condições neutras, com base na equação do perfil logarítmico do vento.

Assim, a eliminação de u^* entre as expressões:

$$\bar{q}_s - \bar{q} = \frac{E}{ku^*} \rho \ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right) \quad (2.22)$$

e

$$u_2 - u_1 = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right),$$

produz a clássica fórmula de THORTHWAITE & HOLZMANN (1939):

$$\bar{q}_1 - \bar{q}_2 = \frac{E}{\rho k k} \frac{u_2 - u_1}{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)} \ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)$$

$$E = \frac{k^2 (\bar{q}_1 - \bar{q}_2) (u_2 - u_1) \rho}{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right) \ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)}$$

$$E = \frac{k^2 (\bar{q}_1 - \bar{q}_2) (u_2 - u_1) \rho}{\left(\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)\right)^2} \quad (2.23)$$

onde:

E = evaporação ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)

\bar{q}_2 e \bar{q}_1 = umidades específicas às alturas Z_2 e Z_1 (g/g)

\bar{u}_2 e \bar{u}_1 = velocidade do vento às alturas Z_2 e Z_1 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)

ρ = densidade do ar ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)

k = constante de von Kármán (0,40)

Esta equação é própria para estimar a evaporação de superfície livre de água ou superfície de solo com vegetação de porte baixo.

Considerando o deslocamento do plano zero, esta equação pode tomar a seguinte versão, para estimar a evapotranspiração em vegetação mais alta (PASQUILL, 1950):

$$E = \frac{k^2(q_1 - q_2)(u_2 - u_1)}{\ln \left(\frac{Z_2 - d}{Z_1 - d} \right)^2} \quad (2.24)$$

na qual:

d = deslocamento do plano zero;

Z_2 e Z_1 = níveis onde está sendo medida a velocidade do vento u_1 e u_2 .

PENMAN (1948, 1956), com base na avaliação das constantes da fórmula de Dalton feita por ROHWER (1931), apresentou um método que combina o balanço de energia com a aproximação aerodinâmica.

A equação final é:

$$E_o = \frac{\Delta R_n + \psi^* E_a}{\Delta + \psi} \quad (2.25)$$

onde:

E_o = evaporação em superfície livre de água (mm dia^{-1});

$\Delta = \frac{des}{dt}$ = derivada da pressão de vapor de saturação em relação à temperatura (mm Hg K^{-1});

e_s = pressão de vapor de saturação à temperatura T (mm Hg);

T = temperatura em K;

$$R_n = (1 - a) R_a (0,18 + 0,55 n/N) - \sigma T^4 (0,56 - 0,092 e a^{0,5}) (0,10 + 0,90 n/N)$$

$$R_n = \text{saldo de radiação } (\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1})$$

R_a = constante de Angot

n = horas de brilho solar observado (h)

N = número máximo de horas de brilho solar (h)

σ = constante de Stefan-Boltzman = $8,128 \times 10^{-4} \text{lyk}^{-4}\text{min}^{-1}$

a = constante psicrométrica

$$E_a = 0,35 (e_s - e_a) (1 + u_2/100)$$

E_a = termo aerodinâmico

u_2 = velocidade do vento a 2 m (milhas dia⁻¹)

$e_s - e_a$ = déficit de saturação à temperatura T_a do ar

e_a = pressão do vapor à temperatura T_a do ar.

Esta expressão de Penman é baseada em princípios físicos sólidos e apresenta a facilidade de não exigir a medida da temperatura da superfície da vegetação e utilizar valores de variáveis que podem ser medidos rotineiramente.

MONTEITH (1965) substituiu o termo E_a da equação de Penman e produziu a seguinte expressão:

$$LE = \frac{\Delta R_n + \rho a C_p |e_s(T) - e_a| / r_a}{\Delta + \gamma} \quad (2.26)$$

Para as superfícies como plantas ou solos, nos quais a superfície evaporante está localizada dentro de uma

superfície natural, foi incluída uma componente de resistência interna, usando a relação:

$$\frac{\Delta^* LE}{\rho a C_p} = \frac{|e_s(T_0) - e_a|}{r_n} = \frac{(e_s - e_a)}{r_a} \quad (2.27)$$

Assim pode-se chegar a:

$$[e_s(T_0) - e_a] = \left(1 + \frac{r_n}{r_a}\right)(e_s - e_a),$$

e obter uma expressão para cálculo da evapotranspiração de uma comunidade vegetal:

$$LE_{(cultura)} = \frac{\Delta R_n + \rho a C_p |e_s(T) - e_a|/r_a}{\Delta + \gamma (1+r_n/r_a)} \quad (2.28)$$

Atualmente, ainda existem grandes dificuldades para a utilização prática da equação (2.28) em virtude das dificuldades existentes para uma adequada previsão de r_n a partir dos dados micrometeorológicos.

Em (2.28) r_n e r_a ($sog\ cm^{-1}$) são respectivamente, a resistência interna da cobertura vegetal à transferência de vapor e a resistência do ar à transferência do vapor à superfície da cultura.

2.4. Análise Harmônica

2.4.1. Resultados obtidos no Brasil

AMARAL (1968), apresentou os fundamentos teóricos e a metodologia de utilização da análise harmônica para o estudo de séries temporais de precipitação mensal. Os resultados apresentados contemplam a realização de análise de variância, e de testes de significância, que permitem selecionar os componentes harmônicos que são significativos e que, portanto, devem ser considerados na equação de regressão representativa do transcurso anual de precipitação. AMARAL (1968) exemplificou a utilização desta metodologia aplicando-se às séries de dados de precipitação mensal de Pelotas (RS) e Morro Velho (MG).

A partir deste primeiro trabalho vem se desenvolvendo no Brasil, uma série de estudos climatológicos utilizando a análise harmônica.

THIEBAUT (1976), PEREIRA (1978), FELTRIN (1980) e SANTOS (1984) aplicaram a metodologia proposta por AMARAL (1968) a dados de precipitação mensal de diversas localidades brasileiras.

DUARTE (1981) determinou, através da análise harmônica, a curva epidemiológica da ferrugem do cafeeiro na Zona da Mata de Minas Gerais, bem como os meses de infestação máxima e mínima. DUARTE (1981) também verificou que as ondas

de 2,25 e de 3 anos foram significativas na maioria das variedades de porta-enxertos e explicaram a maior parte da variação total calculada. COELHO (1980) estudou, através da análise harmônica, uma série de dados de produção anual de variedades de laranja (*Citrus sinensis*, L. Osbeck) em idade adulta.

SILVA (1977) utilizou a análise harmônica para estudar a série de precipitação pluviométrica pentadal de Pelotas (RS), tendo utilizado a transformação $y = x^{0,333}$ para ajustar os dados à distribuição normal.

FELTRIN (1980) trabalhando com dados de precipitação mensal de Bandeirantes, no Norte do Paraná, aplicou o método para o período anual (janeiro a dezembro), para o período chuvoso (outubro a março) e para o período seco (abril a setembro) obtendo, com esta sub-divisão um resultado mais informativo e de maior utilidade prática. Com efeito, o primeiro harmônico da onda anual explicou 86,96%, enquanto os componentes semestral e quadrimestral explicaram apenas 0,49 e 10,57% da variação total, respectivamente. Por outro lado, quando o cálculo foi realizado considerando o período seco, os componentes harmônicos semestral e trimestral explicaram respectivamente 40,47 e 59,07% da variação devida a meses. No que se refere ao período chuvoso, os resultados de FELTRIN (1980) comprovaram que 66,48%, 19,25% e 14,27% da variação foram devidas aos componentes harmônicos semestral, trimestral e bimestral, respectivamente.

FELTRIN (1980), através de uma transformação do tipo $y = x^{0,5}$ aplicada aos dados originais, obteve coeficientes de assimetria e curtose dos contrastes p_j e q_j que permitiram o estudo dos dados através de distribuição normal.

As equações de regressão obtidas foram:

a) período anual:

$$\hat{y}_t = 9,77 + 3,360495 \text{ sen } (30t + 70,591) + 0,252515 \text{ sen } (60t + 60,704) + 1,17164 \text{ sen } (90t + 281,984) \quad (2.29)$$

b) período seco:

$$\hat{y}_t = 7,44 + 0,882221 \text{ sen } (60t + 8,327) + 1,066 \text{ sen } (120t + 73,821) \quad (2.30)$$

c) período chuvoso:

$$\hat{y}_t = 12,10 + 1,256 \text{ sen } (60t + 206,899) + 0,676 \text{ sen } (120t + 295,449) + 0,411 \text{ sen } (180t + 270) \quad (2.31)$$

onde o argumento da função seno é em graus e,

\hat{y}_t = estimativa da raiz quadrada da precipitação para o mês t .

FELTRIN (1980) determinou o ponto de máxima em janeiro e o ponto de mínima em agosto, através das três equações citadas acima.

2.4.2. Fundamentos teóricos da análise harmônica

AMARAL (1968), THIEBAULT (1976), PEREIRA (1978), FELTRIN (1980), COELHO (1980), DUARTE (1981) e SANTOS (1984), apresentaram, no Brasil, sínteses dos fundamentos da análise

harmônica e que são rerepresentados a seguir.

2.4.2.1. Função periódica

Uma função $f(t)$ é periódica de período $T > 0$, se, para todo t , ocorrer

$$f(t \pm T) = f(t)$$

ou ainda,

$$f(t \pm nT) = f(t) \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

As funções trigonométricas $\sin t$ e $\cos t$ são funções periódicas, de período $T = 360^\circ$, ou seja:

$$\sin(t \pm n 360) = \sin t$$

$$\cos(t \pm n 360) = \cos t \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

A função, representada pela série trigonométrica de FOURIER,

$$f(t) = a_0 + \sum_{j=1}^{\infty} a_j \sin(j \theta t + A_j) \quad (2.32)$$

é periódica, de período T , onde $\theta = \frac{360^\circ}{T}$, sendo θ chamado frequência angular.

Desenvolvendo-se (2.8), tem-se:

$$f(t) = a_0 + a_1 \sin(\theta t + A_1) + a_2 \sin(2\theta t + A_2) + \dots + a_j \sin(j \theta t + A_j) + \dots \quad (2.33)$$

Budak & Fomim (1973), citados por PEREIRA (1978), consideram esta função uma soma de componentes senoidais com frequências distintas, e sendo T um período comum a todos os componentes.

0 componente senoidal com frequência angular

$\theta_j = j\theta$ é o j -ésimo harmônico da função periódica. O primeiro harmônico, também chamado onda fundamental, tem o mesmo período e a mesma frequência que a função.

Os coeficientes a_j ($a_j > 0$) e A_j ($0^\circ < A_j < 360^\circ$) são denominados respectivamente, amplitude harmônica e ângulo fase.

Desenvolvendo o seno da soma para cada um dos harmônicos em (2.33), tem-se:

$$f(t) = a_0 + a_1 (\text{sen } \theta t \cos A_1 + \text{sen } A_1 \cos \theta t) + \\ + a_2 (\text{sen } 2\theta t \cos A_2 + \text{sen } A_2 \cos 2\theta t) + \\ + a_j (\text{sen } j\theta t \cos A_j + \text{sen } A_j \cos j\theta t) + \quad (2.34)$$

Fazendo

$$\begin{array}{ll} a_1 \text{ sen } A_1 = p_1 & a_1 \text{ cos } A_1 = q_1 \\ a_2 \text{ sen } A_2 = p_2 & a_2 \text{ cos } A_2 = q_2 \\ \dots & \dots \\ a_j \text{ sen } A_j = p_j & a_j \text{ cos } A_j = q_j \\ \dots & \dots \end{array}$$

e substituindo-se estes valores em (2.34), tem-se

$$f(t) = a_0 + q_1 \text{ sen } \theta t + p_1 \text{ cos } \theta t + \\ + q_2 \text{ sen } 2\theta t + p_2 \text{ cos } 2\theta t + \dots + \\ + q_j \text{ sen } j\theta t + p_j \text{ cos } j\theta t + \dots \quad (2.35)$$

Para o j -ésimo harmônico, tem-se:

$$p_j = a_j \text{ sen } A_j \quad \text{e} \quad q_j = a_j \text{ cos } A_j,$$

portanto,

$$a_j^2 = p_j^2 + q_j^2 \quad (2.36)$$

$$\frac{p_j}{q_j} = \text{tg } A_j \quad (2.37)$$

ou ainda:

$$a_j = \sqrt{p_j^2 + q_j^2} \quad (2.14)$$

$$A_j = \text{arc tg} \left(\frac{p_j}{q_j} \right) \quad (2.15)$$

Os parâmetros p_j , q_j , a_j e A_j são representados graficamente na Figura 2.03.

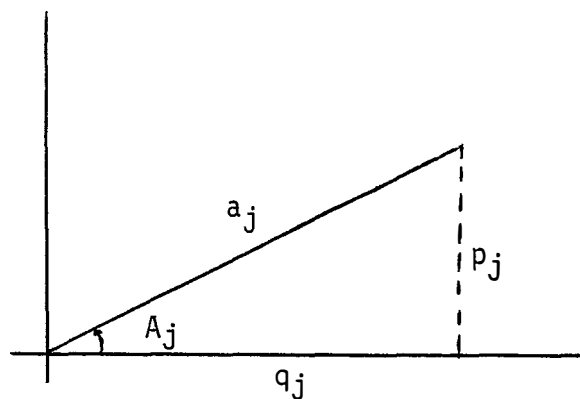


Figura 2.03. Representação gráfica dos contrastes (p_j e q_j), amplitudes (a_j) e ângulos fase (A_j).

O quadrante ao qual pertence o arco A_j é determinado pelos sinais dos parâmetros p_j e q_j , segundo (2.37), conforme descrito abaixo:

Sinal do parâmetro p_j	Sinal do parâmetro q_j	Quadrante a que pertence o arco A_j
+	+	1º
+	-	2º
-	-	3º
-	+	4º

2.4.2.2. Modelo matemático

Seja Y_t a precipitação mensal observada para $t = 1, 2, \dots, T$, onde t representa os meses em que foram tomadas as medidas, e T é o comprimento do período a ser estudado.

O modelo a ser utilizado, oriundo da série de Fourier, é:

$$Y_t = a_0 + \sum_{j=1}^K a_j \sin(j\theta t + A_j) + e_t \quad (2.40)$$

onde: a_0 = média geral \hat{Y} ;

a_j = amplitude do j -ésimo componente harmônico;

A_j = ângulo fase do j -ésimo componente harmônico;

e_t = efeito residual referente a t -ésima observação,

$$e_t \sim N(0; \sigma^2).$$

Desenvolvendo o seno da soma em (2.40) obtem-se:

$$Y_t = a_0 + \sum_{j=1}^K (a_j \sin A_j \cos j\theta t + a_j \cos A_j \sin j\theta t) + e_t \quad (2.41)$$

Fazendo-se em (2.41).

$$p_j = a_j \sin A_j \quad (2.42)$$

$$q_j = a_j \cos A_j \quad (2.43)$$

$$y_t = Y_t - a_0 \quad (2.44)$$

de tal modo que

$$a_j = \sqrt{p_j^2 + q_j^2}, \quad p \text{ e } j = 1, 2, \dots, (k - 1) \quad (2.45)$$

$$e \quad a_k = \left| \sqrt{p_k^2 + q_k^2} \right| = \left| p_k \right| \quad (2.46)$$

para o caso de T par,

$$A_j = \text{arc tg} \left(\frac{p_j}{q_j} \right) \quad (2.47)$$

o modelo matemático passa a ser apresentado sob a forma,

$$y_t = \sum_{j=1}^{k-1} (p_j \cos j\theta t + q_j \sin j\theta t) + p_k \cos k\theta t + e_t \quad (2.48)$$

para o caso de T par.

Ou ainda,

$$\begin{aligned} y_t = & p_1 \cos \theta t + p_2 \cos 2\theta t + \dots + p_{(k-1)} \cos (k-1) \theta t + \\ & + p_k \cos k\theta t + q_1 \sin \theta t + q_2 \sin 2\theta t + \dots + \\ & + q_{(k-1)} \sin (k-1) \theta t + e_t \end{aligned} \quad (2.49)$$

para o caso de T par.

O sistema de equações pode ser representado matricialmente por:

$$Y = X \beta + \varepsilon,$$

onde: Y = vetor das observações y_t ;

X = matriz dos coeficientes;

β = vetor dos parâmetros p_j e q_j ;

ε = vetor dos erros aleatórios.

Assim:

$$Y = \begin{vmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y_T \end{vmatrix}$$

e,

$$X = \begin{vmatrix} \cos \theta & \dots & \cos k\theta & \text{sen}\theta & \dots & \text{sen } (k-1)\theta \\ \cos 2\theta & \dots & \cos 2k\theta & \text{sen } 2\theta & \dots & \text{sen } 2(k-1)\theta \\ \cos 3\theta & \dots & \cos 3k\theta & \text{sen } 3\theta & \dots & \text{sen } 3(k-1)\theta \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cos T\theta & \dots & \cos Tk\theta & \text{sen } T\theta & \dots & \text{sen } T(k-1)\theta \end{vmatrix}$$

quando T é par.

$$\beta = \begin{vmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ p_k \\ q_1 \\ q_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ q_{(k-1)} \end{vmatrix} \quad \text{quando } T \text{ é par;}$$

$$\epsilon = \begin{vmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ e_T \end{vmatrix}$$

2.4.2.3. Estimativa dos parâmetros, suas variâncias e covariâncias

Através do método dos quadrados mínimos, chega-se à solução do sistema de equações, obtendo-se

$$\hat{\beta} = S^{-1} X'Y$$

onde a matriz S é não-singular, resultante da multiplicação da transposta da matriz X pela própria matriz X , obtendo-se:

ANDERSON (1971) através das fórmulas de Euler,

$$\cos \theta = \frac{1}{2} (e^{i\theta} + e^{-i\theta}),$$

$$\operatorname{sen} \theta = \frac{1}{2i} (e^{i\theta} - e^{-i\theta}),$$

e,

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \operatorname{sen} \theta,$$

comprova que:

$$\sum_{t=1}^T \cos^2 j\theta t = \frac{T}{2}, \text{ para } j = 1, 2, \dots, (k-1),$$

$$\sum_{t=1}^T \cos^2 K\theta t = T, \text{ quando } T \text{ é par}$$

$$\sum_{t=1}^T \operatorname{sen}^2 j\theta t = \frac{T}{2}, \text{ para } j = 1, 2, \dots, K$$

$$\sum_{t=1}^T \cos j\theta t \operatorname{sen} i\theta t = 0, \text{ para } \begin{matrix} j = 1, 2, \dots, K \\ i = 1, 2, \dots, K \end{matrix}$$

$$\sum_{t=1}^T \cos j\theta t \cos i\theta t = 0, \text{ para } \begin{matrix} j = 1, 2, \dots, K \\ i = 1, 2, \dots, K \end{matrix}$$

$$\sum_{t=1}^T \operatorname{sen} j\theta t \operatorname{sen} i\theta t = 0, \text{ para } \begin{matrix} j = 1, 2, \dots, K \\ i = 1, 1, \dots, K \end{matrix}$$

Desta forma a matriz S pode ser escrita :

$$S = \begin{vmatrix} T/2 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & T/2 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & T & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & T/2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & T/2 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & T/2 \end{vmatrix}$$

quando T é par.

A matriz $X'Y$ resulta em:

$$X'Y = \begin{vmatrix} \sum_{t=1}^T y_t \cos \theta t \\ \sum_{t=1}^T y_t \cos 2\theta t \\ \vdots \\ \sum_{t=1}^T y_t \cos k\theta t \\ \sum_{t=1}^T y_t \sen \theta t \\ \sum_{t=1}^T y_t \sen 2\theta t \\ \vdots \\ \sum_{t=1}^T y_t \sen (k-1)\theta t \end{vmatrix}$$

quando T é par.

As estimativas dos parâmetros p_j e q_j , através da matriz $\hat{\beta}$, são:

$$\hat{p}_1 = \frac{2}{T} \sum_{t=1}^T y_t \cos \theta t$$

$$\hat{p}_2 = \frac{2}{T} \sum_{t=1}^T y_t \cos 2\theta t$$

⋮

$$\hat{p}_k = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T y_t \cos k\theta t, \text{ quando } T \text{ é par.}$$

$$\hat{q}_1 = \frac{2}{T} \sum_{t=1}^T y_t \sin \theta t$$

$$\hat{q}_2 = \frac{2}{T} \sum_{t=1}^T y_t \sin 2\theta t$$

⋮

$$\hat{q}_{(k-1)} = \frac{2}{T} \sum_{t=1}^T y_t \sin (k-1) \theta t$$

$$\hat{q}_k = \frac{2}{T} \sum_{t=1}^T y_t \sin k\theta t$$

As variâncias e covariâncias dos parâmetros estimados são obtidas na matriz de dispersão $D = S^{-1} \cdot \sigma^2$, sendo:

$$V(\hat{p}_j) = \frac{2\sigma^2}{T} \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, (k-1) \quad (2.50)$$

$$V(\hat{p}_k) = \frac{\sigma^2}{T} \quad \text{quando } T \text{ é par} \quad (2.51)$$

$$V(\hat{q}_j) = \frac{2\sigma^2}{T} \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, k \quad (2.52)$$

$$\text{COV}(\hat{p}_j, \hat{p}_i) = 0 \quad \left| \begin{array}{l} \text{para } i \neq j \\ i = 1, 2, \dots, k \end{array} \right. \quad (2.53)$$

$$\text{COV}(\hat{q}_j, \hat{q}_i) = 0 \quad \left| \begin{array}{l} \text{para } i \neq j \\ j = 1, 2, \dots, k \end{array} \right. \quad (2.54)$$

$$\text{COV}(\hat{p}_j, \hat{q}_i) = 0 \quad \text{para} \quad \left| \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, k \\ j = 1, 2, \dots, k \end{array} \right. \quad (2.55)$$

Como as covariâncias são todas nulas, conclui-se que os parâmetros estimados são independentes.

Será também de interesse determinar as variâncias das estimativas das amplitudes dos componentes harmônicos (a_j).

Devido a complexidade existente para a determinação exata destas variâncias, foi utilizado o processo de diferenciação, para a obtenção de seus valores aproximados.

$$\text{Se } \hat{a}_j = |\sqrt{\hat{p}_j^2 + \hat{q}_j^2}|, \text{ da equação} \quad (2.45)$$

e conhecendo-se as variâncias e covariâncias de \hat{p}_j e \hat{q}_j , equações (2.50) a (2.55),

$$d(\hat{a}_j) = \frac{2\hat{p}_j}{2\sqrt{\hat{p}_j^2 + \hat{q}_j^2}} d\hat{p}_j + \frac{2\hat{q}_j}{2\sqrt{\hat{p}_j^2 + \hat{q}_j^2}} d\hat{q}_j$$

$$d(\hat{a}_j)^2 = \frac{\hat{p}_j^2}{\hat{p}_j^2 + \hat{q}_j^2} (d\hat{p}_j)^2 + \frac{\hat{q}_j^2}{\hat{p}_j^2 + \hat{q}_j^2} (d\hat{q}_j)^2 + \\ + \frac{2\hat{p}_j\hat{q}_j}{\hat{p}_j^2 + \hat{q}_j^2} (d\hat{p}_j)(d\hat{q}_j)$$

$$V(\hat{a}_j) = \frac{\hat{p}_j^2}{\hat{p}_j^2 + \hat{q}_j^2} V(\hat{p}_j) + \frac{\hat{q}_j^2}{\hat{p}_j^2 + \hat{q}_j^2} V(\hat{q}_j) + \frac{2\hat{p}_j\hat{q}_j}{\hat{p}_j^2 + \hat{q}_j^2} \text{COV}(\hat{p}_j, \hat{q}_j).$$

Como $\text{COV}(\hat{p}_j, \hat{q}_j) = 0$, equação (2.55),

$$V(\hat{a}_j) = \frac{\hat{p}_j^2}{\hat{p}_j^2 + \hat{q}_j^2} V(\hat{p}_j) + \frac{\hat{q}_j^2}{\hat{p}_j^2 + \hat{q}_j^2} V(\hat{q}_j) \quad (2.56)$$

Como pelas equações (2.50) a (2.52)

$$V(\hat{p}_j) = V(\hat{q}_j) = \frac{2\sigma^2}{T}, \text{ para } j = 1, 2, \dots, X(k-1)$$

$$V(\hat{p}_k) = \frac{\sigma^2}{T}, \text{ quando } T \text{ \u00e9 par.}$$

chega-se, atrav\u00eas de (2.49), a:

$$V(\hat{a}_j) = \frac{2\sigma^2}{T}, j = 1, 2, \dots, (k-1) \quad (2.57)$$

$$V(\hat{a}_k) \approx \frac{\sigma^2}{T}, \text{ quando } T \text{ é par} \quad (2.34)$$

A $V(\hat{a}_j)$ coincide sempre com $V(\hat{p}_j)$ ($j = 1, 2, \dots, k$), pelo método aproximado adotado.

2.4.2.4. Transformação dos dados

Uma das exigências do modelo matemático e dos testes de significância é que os erros aleatórios tenham distribuição normal.

Quando isto não ocorre, há necessidade de se fazer a aproximação normal através de transformação nos dados.

AMARAL (1968) aconselha uma transformação baseada na fórmula $\sigma_x = \beta x^a$, onde os valores a e β podem ser determinados para cada grupo de observações, sendo x a média de precipitação mensal num período de N anos e σ_x o desvio-padrão das observações utilizadas para o cálculo desta média. Determinado o valor de a , aconselha a transformação $y = x^{(1-a)}$.

SILVA (1977) sugere a padronização da transformação para dados de precipitação, através da fórmula $y = \sqrt[3]{x}$. No presente caso, utilizar-se-á a transformação $y = \sqrt{x}$.

2.4.2.5. Análise de variância

A repetição das observações mensais para N períodos ou anos conduz, naturalmente, ao emprego da análise

de variância, testando-se então a estabilidade dos componentes harmônicos no decorrer dos N períodos estudados.

Para que a análise de variância possa ser aplicada aos contrastes, há necessidade de testar-se a normalidade dos mesmos, visando atender a uma das exigências do teste F.

AMARAL (1968) aconselha que isto seja feito a través do teste de normalidade, para grandes amostras, apresentado por Fisher em 1941, no qual se comparam as medidas de assimetria (g_1) e curtose (g_2) dos contrastes, com as respectivas medidas de assimetria ($g_1 = 0$) e curtose ($g_2 = 0$) da distribuição normal, através do teste t.

As estatísticas g_1 e g_2 são estimadas através das fórmulas:

$$\hat{g}_1 = \sqrt{\frac{w_3^2}{w_2^3}}, \quad (2.59)$$

$$\hat{g}_2 = \sqrt{\frac{w_4^2}{w_2^2}}, \quad (2.60)$$

nas quais, para o contraste p_1 , por exemplo, tem-se:

$$w_2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{p}_{1i} - \bar{p}_1)^2}{(N-1)} \quad (2.61)$$

$$w_3 = \frac{N \sum_{i=1}^N (\hat{p}_{1i} - \bar{p}_1)^3}{(N-1)(N-2)} \quad (2.62)$$

$$w_4 = \frac{N}{(N-1)(N-2)(N-3)} \left[(N+1) \sum_{i=1}^N (\hat{p}_{1i} - \bar{p}_1)^4 - \frac{3(N-1)}{N} \sum_{i=1}^N \left[(\hat{p}_{1i} - \bar{p}_1)^2 \right]^2 \right] \quad (2.63)$$

Segundo aquele autor, g_1 e g_2 têm distribuição normal de média zero e desvios-padrão dados por:

$$s(\hat{g}_1) = \sqrt{\frac{6N(N-1)}{(N-2)(N+1)(N+3)}} \quad (2.64)$$

$$s(\hat{g}_2) = \sqrt{\frac{24N(N-1)^2}{(N-3)(N-2)(N+3)(N+5)}} \quad (2.65)$$

A distribuição de cada contraste será considerada como aproximadamente normal se a um nível α de significância os valores de t calculados não superarem os da tabela, com $N-1$ graus de liberdade, comprovando-se as seguintes hipóteses de nulidade:

$$H_0 : g_1 = 0 \qquad H_0 : g_2 = 0$$

$$H_1 : g_1 \neq 0 \qquad H_1 : g_2 \neq 0$$

$$t_1 = \frac{\hat{g}_1}{s(\hat{g}_1)} \quad (2.66)$$

$$t_2 = \frac{\hat{g}_2}{s(\hat{g}_2)} \quad (2.67)$$

Comprovada a normalidade dos contrastes, pode-se, então, aplicar a análise de variância, utilizando-se o teste F.

De acordo com BLISS (1958) e AMARAL (1968), a análise de variância para o presente caso, assemelha-se ao modelo empregado para blocos ao acaso, usando-se, para cada componente harmônico, uma variância residual específica, relativa à variação apresentada no decorrer dos anos, conforme mostram os Quadros 2.3 e 2.4.

Devido ao emprego de um resíduo específico para cada contraste, as estimativas das variâncias para as amplitudes estimadas deverão ser calculadas através da equação (2.56) em 2.4.2.3, pois, neste caso, não teremos necessariamente $\hat{V}(\hat{p}_j) = \hat{V}(\hat{q}_j)$

Segundo AMARAL (1968), deve-se aplicar a análise de variância, não apenas aos contrastes, mas também a cada amplitude dos componentes harmônicos, através da junção dos contrastes que a compõem, desde que as variâncias residuais destes contrastes sejam homogêneas. A junção acima citada, encontra-se representada nos Quadros 2.5 e 2.6.

QUADRO 2.3 - Análise de variância dos contrastes \bar{p}_j e \bar{q}_j , para o caso de T ímpar.

Causas de Variação	G.L.	S.Q.
Contraste \bar{p}_1	1	$\frac{T}{2} \frac{(\sum_{i=1}^N \bar{p}_{1i})^2}{N} = \frac{T}{2} \bar{p}_1^2 = \bar{P}_1$
Contraste \bar{q}_1	1	$\frac{T}{2} \frac{(\sum_{i=1}^N \bar{q}_{1i})^2}{N} = \frac{T}{2} \bar{q}_1^2 = \bar{Q}_1$
Contraste \bar{p}_2	1	$\frac{T}{2} \frac{(\sum_{j=1}^N \bar{p}_{2j})^2}{N} = \frac{T}{2} \bar{p}_2^2 = \bar{P}_2$
...
Contraste \bar{p}_k	1	$\frac{T}{2} \frac{(\sum_{i=1}^N \bar{p}_{ki})^2}{N} = \frac{T}{2} \bar{p}_k^2 = \bar{P}_k$
Contraste \bar{q}_k		$\frac{T}{2} \frac{(\sum_{i=1}^N \bar{q}_{ki})^2}{N} = \frac{T}{2} \bar{q}_k^2 = \bar{Q}_k$
Regressão	T-1 = 2K	$\frac{T}{2} \sum_{j=1}^k (\bar{p}_j^2 + \bar{q}_j^2) = \sum_{j=1}^k (\bar{P}_j + \bar{Q}_j)$
Anos	N-1	$\frac{1}{T} \sum_{i=1}^N (\sum_{t=1}^T y_{ti})^2$
Anos x \bar{p}_1	N-1	$\frac{T}{2} (\sum_{i=1}^N \bar{p}_{1i}^2) - \bar{P}_1$
Anos x \bar{q}_1	N-1	$\frac{T}{2} (\sum_{i=1}^N \bar{q}_{1i}^2) - \bar{Q}_1$
...
Anos x \bar{p}_k	N-1	$\frac{T}{2} (\sum_{i=1}^N \bar{p}_{ki}^2) - \bar{P}_k$
Anos x \bar{q}_k	N-1	$\frac{T}{2} (\sum_{i=1}^N \bar{q}_{ki}^2) - \bar{Q}_k$
Total	NT-1	$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N y_{ti}^2$

Quadro 2.4 - Análise de variância dos contrastes \bar{p}_j e \bar{q}_j , para o caso de T par.

Causas de Variação	G.L.	S.Q.
Contraste \bar{p}_1	1	$\frac{T}{2} \frac{(\sum_{i=1}^N \bar{p}_{1i})^2}{N} = \frac{T}{2} \bar{p}_1^2 = \bar{P}_1$
Contraste \bar{q}_1	1	$\frac{T}{2} \frac{(\sum_{i=1}^N \bar{q}_{1i})^2}{N} = \frac{T}{2} \bar{q}_1^2 = \bar{Q}_1$
...
Contraste \bar{p}_{k-1}	1	$\frac{T}{2} \frac{(\sum_{i=1}^N \bar{p}_{(k-1)i})^2}{N} = \frac{T}{2} \bar{p}_{k-1}^2 = \bar{P}_{k-1}$
Contraste \bar{q}_{k-1}	1	$\frac{T}{2} \frac{(\sum_{i=1}^N \bar{q}_{(k-1)i})^2}{N} = \frac{T}{2} \bar{q}_{k-1}^2 = \bar{Q}_{k-1}$
Contraste \bar{p}_k	1	$T \frac{(\sum_{i=1}^N \bar{p}_{ki})^2}{N} = T \bar{p}_k^2 = \bar{P}_k$
Regressão	T-1	$\frac{T}{2} \sum_{j=1}^{k-1} (\bar{p}_k^2 + \bar{q}_j^2) + T \bar{p}_k^2 = \sum_{j=1}^{k-1} (\bar{P}_j + \bar{Q}_j) + \bar{P}_k$
Anos	N-1	$\frac{1}{T} \sum_{i=1}^N (\sum_{t=1}^T y_{ti})^2$
Anos x \bar{p}_1	N-1	$\frac{T}{2} (\sum_{i=1}^N \bar{p}_{1i}^2) - \bar{P}_1$
Anos x \bar{q}_1	N-1	$\frac{T}{2} (\sum_{i=1}^N \bar{q}_{1i}^2) - \bar{Q}_1$
...
Anos x \bar{p}_{k-1}	N-1	$\frac{T}{2} \sum_{i=1}^N \bar{p}_{(k-1)i}^2 - \bar{P}_{k-1}$
Anos x \bar{q}_{k-1}	N-1	$\frac{T}{2} \sum_{i=1}^N \bar{q}_{(k-1)i}^2 - \bar{Q}_{k-1}$
Anos x \bar{p}_k	N-1	$T \sum_{i=1}^N \bar{p}_{ki}^2 - \bar{P}_k$
Total	NT-1	$\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T y_{ti}^2$

Quadro 2.5. Análise de variância das amplitudes \hat{a}_j , para o caso de T ímpar.

Causas da Variação	G.L.	S.Q.
Amplitude \hat{a}_1	2	$\hat{P}_1 + \hat{Q}_1$
Amplitude \hat{a}_2	2	$\hat{P}_2 + \hat{Q}_2$
...
Amplitude \hat{a}_k	2	$\hat{P}_k + \hat{Q}_k$
Regressão	$T - 1 = 2k$	$\sum_{j=1}^k (\hat{P}_j + \hat{Q}_j)$
Anos	$N-1$	$\frac{1}{T} \sum_{i=1}^N \left(\sum_{t=1}^T y_{ti} \right)^2$
Anos x \hat{a}_1	$2(N-1)$	$\frac{T}{2} \sum_{i=1}^N (\hat{p}_{1i}^2 + \hat{q}_{1i}^2) - (\hat{P}_1 + \hat{Q}_1)$
...
Anos x \hat{a}_k	$2(N-1)$	$\frac{T}{2} \sum_{i=1}^N (\hat{p}_{ki}^2 + \hat{q}_{ki}^2) - (\hat{P}_k + \hat{Q}_k)$
Total	$NT-1$	$\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T y_{ti}^2$

Quadro 2.6 - Análise de variância das amplitudes \hat{a}_j , para o caso de T par.

Causas da Variação	G.L.	S.Q.
Amplitude \hat{a}_1	2	$\hat{P} + \hat{Q}$
...
Amplitude $\hat{a}_{(k-1)}$	2	$\hat{P}_{(k-1)} + \hat{Q}_{(k-1)}$
Amplitude \hat{a}_k	1	\hat{P}_k
Regressão	(T-1)	$\sum_{j=1}^{k-1} (\hat{P}_j + \hat{Q}_j) + \hat{P}_k$
Anos	(N-1)	$\frac{1}{T} \sum_{i=1}^N \left(\sum_{t=1}^T y_{ti} \right)^2$
Anos x \hat{a}_1	2(N-1)	$\frac{T}{2} \sum_{i=1}^N (\hat{p}_{1i}^2 + \hat{q}_{1i}^2) - (\hat{P}_1 + \hat{Q}_1)$
...
Anos x $\hat{a}_{(k-1)}$	2(N-1)	$\frac{T}{2} \sum_{i=1}^N \hat{p}_{(k-1)i}^2 + \hat{q}_{(k-1)i}^2 - \hat{P}_{(k-1)} + \hat{Q}_{(k-1)}$
		$T \sum_{i=1}^N \hat{P}_{ki}^2 - \hat{P}_k$
Total	NT-1	$\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T y_{ti}^2$

2.4.2.6. Intervalo de confiança para os parâmetros estimados

De posse das estimativas \hat{p}_j , \hat{q}_j e \hat{a}_j , e, dos quadrados médios de suas respectivas interações com anos, obtidos na análise de variância (Quadros 2.3 a 2.6), pode-se determinar os intervalos de confiança para os parâmetros.

Para \hat{p}_j e \hat{q}_j , os intervalos de confiança são dados por:

$$\hat{p}_j - t \cdot s(\hat{p}_j) \leq p_j \leq \hat{p}_j + t \cdot s(\hat{p}_j) \quad (2.68)$$

$$\hat{q}_j - t \cdot s(\hat{q}_j) \leq q_j \leq \hat{q}_j + t \cdot s(\hat{q}_j) \quad (2.69)$$

onde t é obtido na tabela \underline{t} , para o teste bilateral com $N-1$ graus de liberdade, a um determinado nível de significância.

Para \hat{a}_j , o intervalo de confiança é dado por:

$$\hat{a}_j - t \cdot s(\hat{a}_j) \leq a_j \leq \hat{a}_j + t \cdot s(\hat{a}_j) \quad (2.70)$$

onde t é obtido na tabela de \underline{t} , para o teste bilateral, a um determinado nível α de significância, com $2(N-1)$ graus de liberdade, exceto no caso de a_k , para T par, quando o número de graus de liberdade será $N-1$.

2.4.2.7. Equação de Regressão

Determinados os componentes harmônicos signi-

ficativos, através da análise de variância, pode-se estabelecer a equação de regressão para os dados observados.

Para tanto, serão considerados todos os componentes harmônicos até o último significativo.

Para melhor visualização utiliza-se, ainda, a representação gráfica de cada componente harmônico considerado, e a função resultante do conjunto destes componentes, através de curvas representadas em eixos ortogonais. Esta representação não será realizada neste trabalho.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos biológicos que serviram de base para este estudo foram conduzidos no Campo Experimental do Centro Nacional de Pesquisa de Soja, localizado no município de Londrina, e situado na Região Norte do Estado do Paraná.

3.1. Descrição ambiental

3.1.1. Geologia

Optou-se por apresentar a geologia do Estado do Paraná através da Figura 3.01 e do Quadro 3.01, ambas extraídas de SHOBENHAUS et alii (1984) e que, em conjunto, são autoexplicativos.

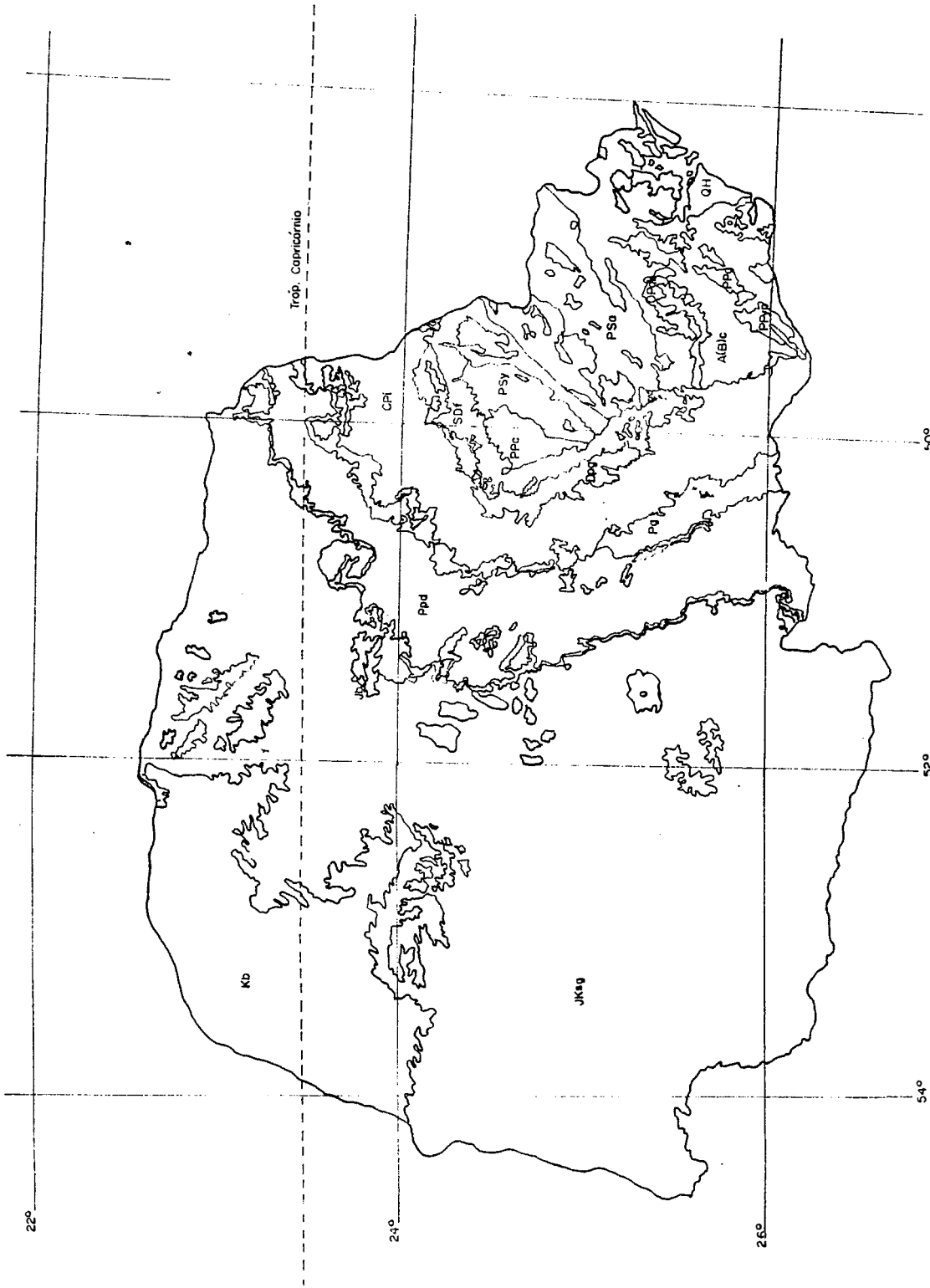


Figura 3.01 - Geologia do Estado do Paraná, com identificação apresentada no Quadro 3.1. Adaptado de SHOBENHAUS et alii (1984).

Quadro 3.1 - Material de origem, formações e respectivos períodos geológicos, ocorrentes no Estado do Paraná, conforme símbolos de identificação constantes da Figura (3.1). Adaptado de SHOBENHAUS et alii (1984).

Identificação	Período Geológico	Formação/Grupo	Material de Origem
JKBsg	Juro-cretáceo	Serra Geral	basalto toleitico com intercalações de arenitos
Kb	Cretáceo	Baurú	arenitos, salitos e conglomerados restritos.
Ppd	Permiano	-	folhelhos, arenitos, siltitos, folhelhos pirobeteminosos, calcários.
Pg	Permiano	Ponta Grossa	siltitos, folhelhos, arenitos e carvão.
CPI	Carbonífero-permiano	Irati	arenitos, siltitos, arcoseos, conglomerados, diamictitos, folhelhos, varvitos e tilitos.
Dpg	Devoniano	Ponta Grossa	siltitos, folhelhos e arenitos.
Sdf	Silúrio-devoniano	Furnas	arenitos, conglomerados e siltitos.
PPC	Cambro-ordoviciano	Castro	conglomerados, arcóseos, siltitos e vulcânicas ácidas.
PSy	Pré-cambriano Superior	-	granitóides e sintectones.
PSa	Pré-cambriano Superior	Açungui	filitos, xistos, calcários dolomitas, quartzitas e meta conglomerados.
ACB/C	Arqueano	-	gnaiesses e magmatitas.
QH	Quartenário	-	depósitos aluviais, depósitos fluviais, depósitos marinhos e eólicos, etc.

Fonte: SHOBENHAUS, C. CAMPOS, D.A, DERZE, G.R. ASMUS, H.E. Geologia do Brasil, texto explicativo do Mapa Geográfico do Brasil e da Área Oceânica Adjacente, incluindo depósitos marinhos. MME/DNPM, Brasília, 1984.

3.1.2. Clima

No Estado do Paraná, conforme a classificação de KÖPPEN, apresentada por GODOY et alii (1978), ocorrem os tipos climáticos Af, Cfb e Cfa. A Região Norte do Paraná, do tipo Cfa, apresenta uma transição entre o tipo Cfb, do Centro e Sul do Paraná, e o tipo Cwa, que ocorre no Sul do Estado de São Paulo (Figura 3.2.)

3.1.3. Solos

Os principais solos do Estado do Paraná são apresentados através da Figura 3.03, adaptada de IGUE et alii (1976), e que é autoexplicativa.

Na Região Norte do Paraná ocorrem predominantemente a Terra Roxa Extruturada (TR), Latossolo Roxo (LR), associação Terra Roxa com Solos Litólicos (TR+RE).

Na Região Noroeste predominam o Latossolo Vermelho Escuro (LE) e o Podzólico Vermelho Amarelo eutrófico (PE).

A associação de Terra Roxa com Solos Litólicos (TR+RE) e também o Latossolo Roxo (LR) predominam em toda a área da Região Nordeste. (Figura 3. 3).

No local de execução dos experimentos biológicos, o solo é classificado como Latossolo Roxo distrófico, bem drenado, profundo e ocupando um relevo ondulado.

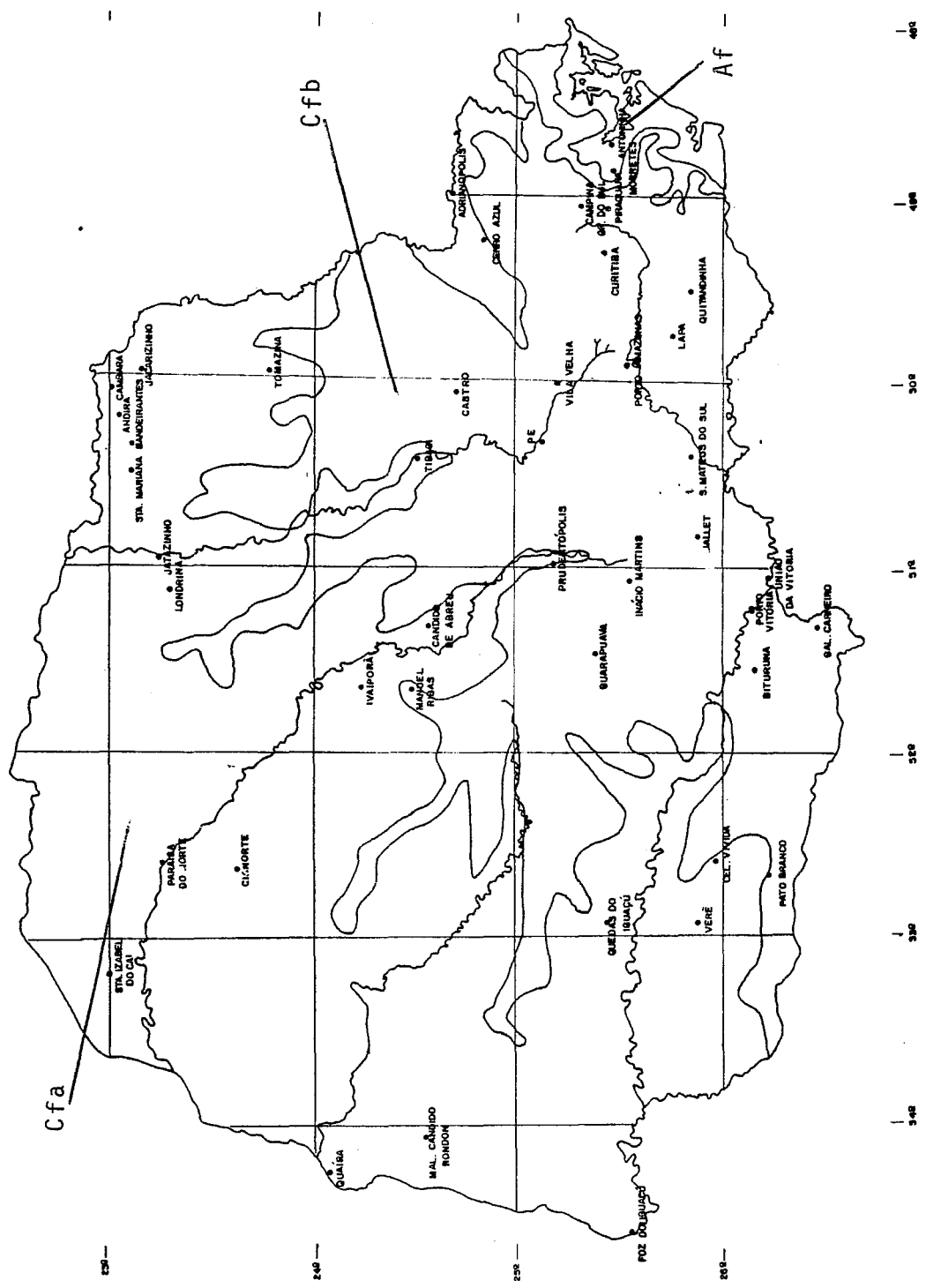


Figura 3.02 - Principais tipos climáticos de KÖEPPEN ocorrentes no Estado do Paraná. Adaptado de GODDY et alii (1978).

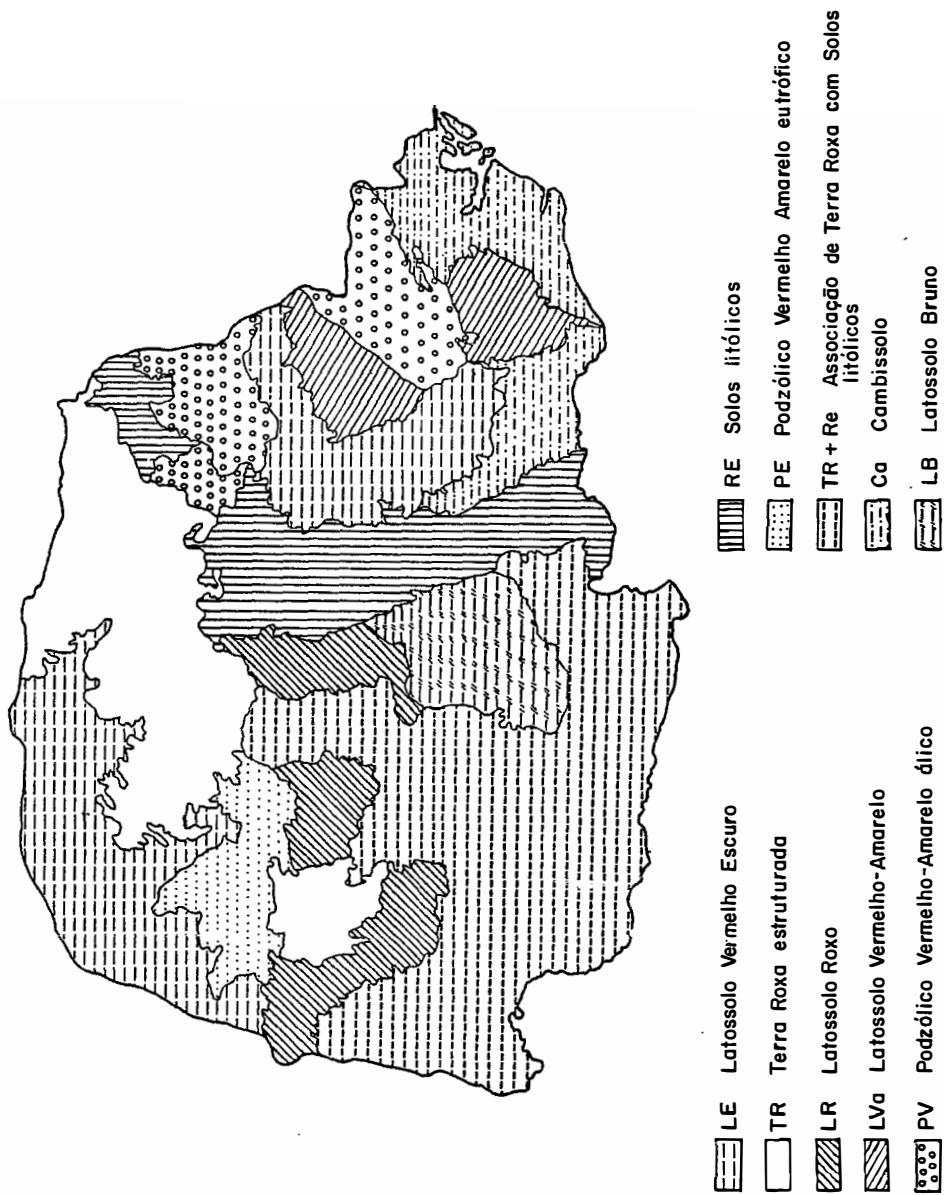


Figura 3.03 - Principais solos ocorrentes no Estado do Paraná. Adaptado de IGUE et alii (1976).

3.2. Variáveis estudadas

As principais variáveis de estudo foram cultivares e épocas de plantio, para atender ao principal objetivo de estudar a interação entre genótipos e ambientes.

3.2.1. Variáveis genotípicas

Escolheram-se algumas cultivares, pertencentes aos diversos grupos de maturação, e cuja descrição é resumidamente apresentada no Quadro 3.2. Predominantemente, foram estudadas as cultivares Paranã, Bossier e Santa Rosa, consideradas representativas dos grupos de maturação VI, VII e VIII, da Classificação Americana, respectivamente. Estas mesmas cultivares representam os grupos de cultivares precoce, médio e semi-tardio, segundo a terminologia corrente no Estado do Paranã.

3.2.2. Variáveis ambientais

Os experimentos foram instalados em épocas distribuídas desde o início do mês de outubro até o início do mês de janeiro. As datas de plantio planejadas estão apresentadas no Quadro (3.3). Admitiu-se a antecipação do plantio de dois a três dias em relação a estas datas, todas as vezes em que ocorriam condições ótimas de umidade para a emer-

Quadro 3.2 - Descrição, características e origem genética das cultivares participantes dos experimentos de campo.

Número	Cultivar	Grupo de maturação	Origem genealógica	Cor do hipocotilo	Cor da flor	Cor da pubescência	Cor do hilo	Cor do hilo	Cor da semente	Hábito de crescimento
1	Forrest	IV	Dyer x Bragg	Verde	Branca	Marrom	Marrom	Preto	Amarela	Determinado
2	Paraná	VI	Hill x D52-810	Verde	Branca	Cinza	Marrom	Buff*	Amarela	Determinado
3	Pampeira	V	Seleção em Hood	Verde	Branca	Cinza	Marrom	Buff	Amarela	Determinado
4	Planalto	VI	Hood x Kedeele STR 452	Púrpura	Púrpura	Cinza	Amarelo	Buff	Amarela	Determinado
5	Davis	VII	D49-2573 x N45-1497	Verde	Branca	Cinza	Amarelo	Buff	Amarela	Determinado
6	Bragg	VII	Jackson x D49-2491	Verde	Branca	Marrom	Marrom	Preto	Amarela	Determinado
7	IAS-4	VII	Hood x Jackson	Verde	Branca	Cinza	Amarelo	Buff	Amarela	Determinado
8	Flórida	VII	D515091 x Jackson	Verde	Branca	Cinza	Marrom	Buff*	Amarela	Indeterminado
9	Bienville	VIII	Pelican nº 2 x Ogdén	Púrpura	Púrpura	Marrom	Marrom	Marrom	Amarela	Determinado
10	Viçoja	IX	D49-491(2)xImproved Pelican	Púrpura	Púrpura	Marrom	Marrom	Marrom	Amarela	Determinado
11	Hardee	VIII	D49-772 x Improved Pelican	Verde	Branca	Cinza	Marrom	Buff	Amarela	Determinado
12	Santa Rosa	VIII	D49-772 x La 411219	Verde	Branca	Marrom	Marrom	Marrom	Amarela	Determinado
13	IAC-4	IX	IAC-2 x Hardee	Verde	Branca	Cinza	Marrom	Buff	Amarela	Determinado
14	IAC-2	IX	La 41-1219 x Yelnanda	Verde	Branca	Cinza	Marrom	Buff	Amarela	Indeterminado
15	UFV-1	IX	"Mutante" de Viçoja**	Púrpura	Púrpura	Marrom	Marrom	Marrom	Amarela	Determinado
16	Júpiter	IX	D491491 x PI240664	Púrpura	Púrpura	Marrom	Marrom	Preto im-perfeito	Amarela	Determinado
17	Bossier	VII	Seleção em Lee***	Púrpura	Púrpura	Marrom	Amarelo	Preto	Amarela	Determinado

* Buff - marrom claro rosado.

** Viçoja: D49-491(2) x Improved Pelican.

*** Lee: S100 x CNS.

Quadro 3.3 - Descrição dos experimentos de campo utilizados na elaboração deste trabalho.

Título	Cultivares (1)	Época de plantio	Espaçamento (m)	População mil plantas/ha	Sistema de preparo (2)	Adubação verde (3)	Período de execução
"Sucessão"	2, 17 e 12	10/10, 10/11, 10/12, 10/01	0,60	400	1	2	1976/77 a 1983/84
"Plantio direto" (4)	2, 17 e 12	15/10, 15/11, 15/12	0,60	400	1 e 2	2	1978/79 a 1984/85
"Adubação verde"	2, 17 e 10	15/10, 15/11, 15/12	0,60	400	1	1 e 2	1979/80 a 1983/84
"Ecológico"	1 a 16	20/10, 05/11, 20/11, 05/12, 20/12	0,60	400	1	2	1976/77 a 1980/81
"Interação de prás (5) ticas"	2, 12 e 15	15/10, 15/11, 15/12	0,30, 0,60 e 0,90	200, 400 e 600	1	2	1976/77 a 1979/80

1 - Os números das cultivares estão citados no Quadro 3.2

2 - Sistema de preparo do solo

1 - plantio convencional

2 - plantio direto

3 - Utilização de adubação verde

1 - com adubação verde

2 - sem adubação verde

4 - As datas deste experimento, planejadamente, foram postergadas ou antecipadas em função da ocorrência de condições favoráveis à emergência, para execução do plantio à máquina.

gência. Nos casos em que houve condições de insuficiência hídrica para a emergência, procedeu-se à irrigação para garantir o estabelecimento de populações de plantas por unidade de área desejada.

A outra fonte de variação ambiental foi a instalação dos experimentos ao longo dos anos agrícolas 1976/77 a 1983/84.

3.2.3. Variáveis tecnológicas

As variáveis aqui designadas como tecnológicas são complementares e não constituem o principal objeto do estudo. Estas variáveis estão citadas no Quadro (3.3) que descrevem os experimentos usados para este estudo, e fazem parte apenas dos experimentos complementares.

3.3. Descrição dos experimentos de campo

Os experimentos de campo que serviram de base para a realização deste estudo estão descritos no Quadro (3.3).

O principal experimento foi o de época de plantio na sucessão trigo-soja e escolhido para gerar os modelos derivados neste trabalho. O "Ensaio de Plantio Direto" foi utilizado para gerar resultados em condições mais próximas às condições de lavoura. Por esta razão, foi insta

lado à máquina e somente em datas nas quais ocorreram condições de umidade que garantissem a emergência sem irrigação.

3.4. Variáveis mantidas sob controle

Procedeu-se à correção de solo, adubação, inoculação de sementes com bactérias do gênero *Rhizobium* spp., controle de invasoras, pragas e moléstias, conforme recomendações das respectivas áreas de pesquisa. Entretanto, sempre foi mantido o objetivo de se obter o máximo controle sobre as variáveis que não foram objeto de estudo.

3.5. Determinações e Observações

3.5.1. Observações fenológicas

Determinaram-se as datas de emergência (V_0) e as datas de ocorrência de todos os estágios reprodutivos (R_1 a R_3) segundo o critério proposto por FEHR et alii (1971).

3.5.2. Observações fenométricas

Após colhidas e trilhadas as plantas da área útil dos experimentos, pesou-se a produção de grãos da menor unidade experimental (sub-parcela ou sub-sub-parcela, conforme o experimento), aqui genericamente designada por parcela,

com precisão de uma grama.

Com os dados de produção por parcela, área de parcela e teor de umidade, calculou-se o rendimento por hectare, corrigido para 13% de umidade, segundo a equação:

$$Y_r = \frac{(100 - A) \times B}{(100 - C) \times D}$$

onde:

$$\begin{aligned} Y_r &= \text{rendimento (kg/ha)} \\ A &= \text{umidade das sementes (\%)} \\ B &= \text{rendimento por parcela (g)} \\ C &= \text{umidade desejada (13\%)} \\ D &= \frac{\text{área da parcela (m}^2\text{)}}{10} \end{aligned}$$

3.5.3. Observações meteorológicas de superfície

3.5.3.1. Período de execução dos experimentos

Para a descrição das condições meteorológicas ocorridas durante o período de execução dos experimentos, foram utilizados, os dados meteorológicos diários disponíveis na Estação Meteorológica do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), localizada próxima ao experimento, e a $23^{\circ}22'$ de latitude sul, $51^{\circ}10'$ de longitude Oeste de Greenwich e a 585 metros de altitude.

Utilizaram-se as observações diárias de:

1) precipitação (mm dia^{-1});

- 2) temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$);
- 3) radiação solar ($\text{cal. cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);
- 4) horas de brilho solar (hs. dia^{-1});
- 5) velocidade do vento a 2 m (milhas dia^{-1});
- 6) evaporação de Pichê (mm dia^{-1}).

3.5.3.2. Sêrie histôrica

Para a descrição das disponibilidades climáticas da localidade de Londrina, foram usados os dados meteorológicos de superfície, coletados de janeiro de 1958 até junho de 1984, na Estação Climatológica Principal pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INEMET), do Ministério da Agricultura. Esta Estação localiza-se próxima ao Aeroporto de Londrina, à $23^{\circ}23'S$, $51^{\circ}11'W$ e a 566 metros de altitude.

Utilizaram-se dados diários apenas de precipitação, temperatura média do ar e evaporação de Pichê.

Utilizaram-se também os dados de precipitação mensal, do período compreendido entre janeiro de 1958 a junho de 1984, observados em 54 outras localidades do Estado do Paraná, listadas no Apêndice (8.1). Finalmente, utilizaram-se os dados de precipitação mensal observada no período compreendido entre junho de 1976 e junho de 1984 nas 382 Estações e Postos pluviométricos listados no Apêndice (8.1).

3.6. Análises estatísticas realizadas

3.6.1. Análise de variância

Foram realizadas as análises de variância individuais e conjuntas do rendimento observado nos diversos anos de cada experimento. Para estas análises foram usados os pacotes computacionais SAEST e SANEST, desenvolvidos por ZONTA et alii (1986) e disponíveis no Centro Nacional de Pesquisa de Soja.

3.6.2. Análises de regressão e correlação

Utilizou-se o módulo Regmult, do pacote computacional acima citado, para calcular as equações de regressão lineares, quadráticas e cúbicas que relacionam os dados de emergência com as datas de ocorrência dos diversos estágios reprodutivos (R_1 a R_8), e com o rendimento. O módulo Stepwise foi utilizado para se proceder os cálculos das equações que relacionam a disponibilidade hídrica ou a precipitação observada, nas sub-períodos $V_0 - R_1$, $R_1 - R_4$ e $R_4 - R_6$ com o rendimento da soja. Estes módulos, além de determinar os parâmetros das equações, exibem o valor calculado do Teste F e o respectivo nível de probabilidade.

Também utilizou-se a análise de correlação para calcular as equações lineares e os coeficientes de corre-

lação entre as séries históricas de precipitação mensal das 54 localidades do período 1958/84 e das 382 localidades do período 1976/84 com a série histórica da localidade de Londrina. Para esta análise foi elaborado um programa para o computador Burroughs B 6800 do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) e que apresenta as seguintes opções de cálculo:

a) anual: utiliza os dados de todos os meses do ano em conjunto (12 x 26 pares de valores);

b) mensal: utiliza os dados de cada mês separadamente (26 pares de valores);

c) estacional: utiliza os dados do período cultivo da soja no Paraná, ou seja, setembro a abril (8 x 26 pares de valores), sendo um par para cada ano.

Este programa também apresenta a opção de traçar isolinhas de coeficiente de correlação, com a "PLOTTER 1051" do computador Burroughs B 6800, utilizando um arquivo de coordenadas geográficas do ponto e o respectivo valor do coeficiente de correlação. As rotinas utilizadas procedem o cálculo dos valores dos pontos de grade equidistantes a partir dos pontos desigualmente distribuídos na área a ser mapeada.

3.6.3. Análise harmônica

Para a derivação dos modelos matemáticos que descrevem o transcurso anual da precipitação, utilizou-se a

metodologia descrita por CONRAD & POLLAK (1950) e apresentada no Brasil por AMARAL (1968) e que, correntemente, é chamada de Análise Harmônica. Esta metodologia também foi usada para estudar, separadamente, o regime de chuvas de outono-inverno e primavera-verão.

A análise harmônica pode ser desenvolvida através da álgebra matricial, sendo essencialmente a expansão em série de Fourier de uma função $f(t)$ periódica e definida em dado intervalo.

O modelo matemático oriundo de (2.48) em 2.4.2.2., para o período anual, onde $T = 12$, é:

$$Y_t = p_1 \cos \theta t + p_2 \cos 2\theta t + p_3 \cos 3\theta t + p_4 \cos 4\theta t + p_5 \cos 5\theta t \\ + p_6 \cos 6\theta t + q_1 \operatorname{sen} \theta t + q_2 \operatorname{sen} 2\theta t + q_3 \operatorname{sen} 3\theta t + q_4 \operatorname{sen} \\ 4\theta t + q_5 \operatorname{sen} 5\theta t + e_t \quad (3.1.)$$

onde:

$$\theta = \frac{360^\circ}{12} = 30^\circ$$

$$t = 1, 2, \dots, 12.$$

Os componentes harmônicos considerados em (3.1.), apresentam períodos de:

$T = 12$ meses (para $J = 1$), $\frac{T}{2} = 6$ meses para $J = 2$), $\frac{T}{3} = 4$ meses (para $J = 3$), $\frac{T}{4} = 3$ meses (para $J = 4$), $\frac{T}{5} = 2,4$ meses (para $J = 5$) e $\frac{T}{6} = 2$ meses (para $J = 6$).

Como para cada mês têm-se $N = 26$ repeti-

ções:

$$Y_{ti} = p_{1i} \cos \theta t + p_{2i} \cos 2\theta t + p_{3i} \cos 3\theta t + p_{4i} \cos 4\theta t + p_{5i} \cos 5\theta t + p_{6i} \cos 6\theta t + q_{1i} \sin \theta t + q_{2i} \sin 2\theta t + q_{3i} \sin 3\theta t + q_{4i} \sin 4\theta t + q_{5i} \sin 5\theta t + e_{ti} \quad (3.2.)$$

Desta forma, a matriz Y terá dimensões $T \times N$, ou seja, 12×26 .

Por outro lado, o modelo matemático, oriundo de (2.48) em 2.4.2.2., para o período seco (abril a setembro) ou chuvoso (outubro a março), em que $T = 6$, tem a forma:

$$Y_t = p_1 \cos \theta t + p_2 \cos 2\theta t + p_3 \cos 3\theta t + q_1 \sin \theta t + q_2 \sin 2\theta t + e_t \quad (3.3.)$$

onde:

$$\theta = \frac{360^\circ}{6} = 60^\circ$$

$$t = 1, 2, \dots, 6.$$

Os componentes harmônicos, considerados em (3.3.) tem os seguintes períodos: $T = 6$ meses (para $J = 1$), $\frac{T}{2} = 3$ meses (para $J = 2$) e $\frac{T}{3} = 2$ meses (para $J = 3$).

Como têm-se N repetições para cada mês pode-se escrever:

$$Y_{ti} = p_{1i} \cos \theta t + p_{2i} \cos 2\theta t + p_{3i} \cos 3\theta t + q_{1i} \sin \theta t + q_{2i} \sin 2\theta t + e_{ti} \quad (3.4.)$$

A matriz Y terá dimensões $T \times N$, ou seja 6×26 .

Para o estudo do período anual utilizaram-se dados de janeiro de 1958 a dezembro de 1983. O estudo do pe

período outono-inverno, aqui designado por período seco, baseou-se em dados dos meses de abril a setembro desde 1958 até 1983. Este período corresponde à entre-safra da soja e é, aproximadamente, a estação de cultivo do trigo.

O estudo do período considerado chuvoso foi feito com base em dados de outubro a março desde a primavera-verão do ano agrícola 1958/59 até a primavera-verão do ano agrícola 1983/84. Este período (setembro a abril) abrange a estação de crescimento da soja no Paraná.

Para a execução desta análise, procedeu-se a adaptação de programa de computador apresentado por PEREIRA (1978) para o micro computador Polymax 201-DP.

Este programa compreende a realização da Análise Harmônica fornecendo os seguintes resultados:

- 1) estimativa dos valores dos contrastes, amplitudes e ângulos fase;
- 2) teste de normalidade dos contrastes;
- 3) análise de variância dos contrastes e amplitudes;
- 4) variância dos parâmetros estimados e intervalos de confiança;
- 5) equação de regressão.

3.7. Cálculo da evapotranspiração potencial e do balanço hídrico

3.7.1. Balanço hídrico seriado mensal e decendial

Para a execução do balanço hídrico mensal e decendial calculou-se a evapotranspiração, utilizando-se a forma clássica sugerida por THORNTHWAITE & MATHER (1955):

$$E = 1,6 (10 T/I)^a$$

onde:

E = evapotranspiração potencial (mm);

T = temperatura média mensal do ar ($^{\circ}\text{C}$);

I = Índice anual de calor definido por:

$$I = \sum_{i=1}^{12} (T/5)^{1,514}$$

i = número de ordem do mês

a = $0,000000675I^3 - 0,0000771I^2 + 0,01792I + 0,49239$

3.7.2. Balanço hídrico seriado diário

Para a execução do balanço hídrico seriado diário calculou-se a evapotranspiração potencial através da seguinte equação proposta por PENMAN (1956):

$$E_o = \frac{\Delta R_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (3.5)$$

onde:

E_0 = evaporação em superfície livre de água (mm dia^{-1});

$\Delta = \frac{des}{dt}$ = derivada da pressão de vapor de saturação em relação à temperatura = (mm Hg K^{-1});

e_s = pressão de vapor de saturação à temperatura T (mm Hg);

T = temperatura em K ;

$R_n = (1 - a) R_a (0,18 + 0,55 n/N) - \sigma T^4 [0,56 - 0,092 (e_s)^{0,5}]$
 ($0,10 + 0,90 n/N$) ($\text{cal . cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)

R_n = saldo de radiação ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)

R_a = constante de Angot

n = horas de brilho solar observado (h)

N = número máximo de horas de brilho solar (h)

σ = constante de Stefan-Boltzman

γ = constante psicrométrica

$E_a = 0,35 (e_s - e_a) (1 + u_2/100)$

E_a = termo aerodinâmico

u_2 = velocidade do vento a 2m (milhas dia^{-1})

e_a = pressão real do vapor a temperatura T_a ao ar (mm Hg)

O balanço hídrico seriado diário foi efetuado utilizando-se os dados observados na Estação Climatológica do IAPAR, situada a poucos metros do local de condução dos experimentos, para o período compreendido entre 1º de janeiro de 1976 a 31 de dezembro de 1984.

3.8. Somatório de Variável Meteorológica por Sub-período do Ciclo

3.8.1. Elaboração do calendário absoluto

Elaborou-se um programa de computador que procede à transformação de datas do calendário romano em calendário absoluto, seqüencialmente, e considerando, em cada ano agrícola, o dia 23 de setembro como o primeiro dia. Assim, transformaram-se em números reais as datas de plantio, emergência e as datas de todos os estágios fenológicos reprodutivos observados. Com estes dados transformados, estabeleceram-se todas as equações de regressão entre datas de plantio e emergência com estágios fenológicos, sub-períodos do ciclo e rendimento. Para o Ensaio de Sucessão Trigo-Soja, o programa calculou todas as combinações possíveis entre as diversas datas observadas, resultando em sub-períodos do ciclo.

3.8.2. Cálculo da somatória

Um outro programa utiliza este arquivo de dados fenológicos e um arquivo de variável meteorológica diária (precipitação ou deficiência hídrica diárias, no caso deste estudo) e fornece o total para cada sub-período desejado. Finalmente, com estes somatórios, realizados para os sub-períodos $V_0 - R_1$, $R_1 - R_4$ e $R_4 - R_6$, calcularam-se as equa-

ções de regressão passo a passo que relacionam precipitação ou deficiência hídrica com o rendimento, sendo este último a variável dependente.