

**FUNÇÕES DE RESPOSTA DO FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* L.)  
AO USO DE NITROGÊNIO E LÂMINA DE IRRIGAÇÃO**

**JOSÉ ANTONIO FRIZZONE**

**Orientador: Prof. Dr. ANTONIO FERNANDO LORDELO OLITTA**

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**  
**Maio - 1986**

À

MINHA ESPOSA, MARIA APARECIDA,

com quem divido os momentos de tristeza e alegrias, que me compreende e auxilia nas horas difíceis com seu amor;

AOS

MEUS FILHOS, MAICON E CAIO,

que me fazem sentir a continuidade da vida e abrandam-me o coração com seus olhares meigos e carinhosos;

AOS

MEUS PAIS e IRMÃOS,

que com humildade sempre ofereceram o carinho e o apoio necessários à jornada da minha vida;

AOS

MEUS SOGRO E SOGRA,

pela amizade, amor e carinho que sempre me dispensaram.

DEDICO

## A G R A D E C I M E N T O S

Ao Prof. Dr. Antonio Fernando Lordelo Olitta, pela segura orientação neste trabalho, amizade e ensinamentos recebidos.

Ao Prof. Gener Tadeu Pereira, pela prestimosa colaboração nas análises e interpretações estatísticas.

À Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", através do Departamento de Agricultura da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, onde prestamos nossos serviços e à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"- USP, que possibilitaram a nossa participação no Curso de Pós-Graduação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudo concedida.

À minha esposa, Maria Aparecida, pelos serviços de datilografia.

À todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram para que este trabalho pudesse ser realizado.

## INDICE

	Pág.
RESUMO .....	xiii
SUMMARY .....	xv
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	4
2.1 - Efeitos do déficit de água sobre os estágios fenológicos do feijoeiro.....	5
2.2 - Demanda de água do feijoeiro.....	8
2.3 - Resposta do feijoeiro a diferentes níveis de manejo de irri gação e de adubação nitrogenada.....	11
2.4 - Distribuição do sistema radicular do feijoeiro e extração de água pelas raízes .....	13
2.5 - Aplicações das superfícies de resposta .....	14
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	16
3.1 - Localização e características da área experimental .....	16
3.2 - Variedades e práticas culturais .....	19
3.3 - Sistema de aplicação de água .....	23
3.4 - Delineamento experimental .....	27
3.5 - Controle da irrigação .....	27
3.6 - Demanda de água do feijoeiro .....	29
3.6.1 - Considerações sobre $K_p$ , $ET_o$ , $ET_m$ e $K_c$ .....	30
3.6.2 - Evapotranspiração real ou atual ( $ET_a$ ) .....	31
3.7 - Observações fenológicas .....	33
3.7.1 - Data da emergência .....	33
3.7.2 - Data da floração .....	34

	Pág.
3.7.3 - Data do início do enchimento das vagens .....	34
3.7.4 - Data do início da maturação .....	34
3.7.5 - Data da maturação de colheita .....	34
3.8 - Produção e componentes da produção .....	35
3.8.1 - Rendimento de grãos .....	35
3.8.2 - Número de vagens por planta .....	36
3.8.3 - Número de grãos por vagem .....	36
3.8.4 - Peso de 100 grãos .....	36
3.9 - Eficiência de uso de água (EUA) .....	37
3.10 - Função de produção .....	38
3.10.1 - Função de produção de água .....	38
3.10.2 - Função de produção de nitrogênio .....	40
3.10.1 - Função de produção de feijão tendo a água como fa tor variável .....	38
3.10.2 - Função de produção de feijão tendo o nitrogênio como fator variável .....	40
3.10.3 - Superfície de resposta .....	41
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	44
4.1 - Duração dos estágios fenológicos da cultura .....	44
4.2 - Manejo da irrigação .....	46
4.3 - Evapotranspiração do feijoeiro .....	49
4.4 - Rendimento de grãos .....	58
4.4.1 - Efeito das lâminas totais de água sobre o rendimen to de grãos .....	60
4.4.2 - Lâmina de água economicamente ótima .....	71

4.4.3 - Efeito das doses de nitrogênio sobre o rendimento de grãos .....	75
4.4.4 - Dose de nitrogênio economicamente ótima .....	81
4.4.5 - Superfície de resposta .....	83
4.4.5.1 - Curvas de isoproducto .. ..	87
4.4.5.2 - Produto físico marginal .....	89
4.4.5.3 - Taxa marginal de substituição .....	90
4.4.5.4 - Região de produção racional .....	92
4.4.5.5 - Combinação de custo mínimo para W e N ...	94
4.4.5.6 - Combinações dos fatores W e N que conduzem a rendimento máximo .....	98
4.4.5.7 - Máxima receita líquida a ser obtida com o emprego de W e N .....	98
4.5 - Peso médio de 100 grãos .....	99
4.6 - Número de grãos por vagem .....	101
4.7 - Número de vagens por planta .....	108
4.8 - Eficiência de uso de água .....	112
5. CONCLUSÕES .....	119
6. LITERATURA CITADA .....	122

## LISTA DE TABELAS

TABELA		Pág.
1	Atributos físicos do solo da área experimental .....	17
2	Características químicas do solo da área experimental, antes de se proceder a calagem e quatro meses após .....	19
3	Esquema de pulverizações realizadas durante o ciclo da cultura .....	22
4	Lâminas totais de água aplicadas em cada parcela, frequência de irrigação e valores de algumas variáveis climáticas durante a fase experimental .....	48
5	Valores médios de $ET_a$ ( $mm.dia^{-1}$ ), em três estágios do ciclo da cultura, em função das diversas lâminas totais de água dentro da dose de nitrogênio de $90kg.ha^{-1}$ (Ilha Solteira, SP, 1982).....	55
6	Valores médios do rendimento de grãos de feijão ( $kg.ha^{-1}$ ) em função das lâminas totais de água e das doses de nitrogênio (Ilha Solteira, SP, 1982) .....	59
7	Resumo da análise de variância do rendimento de grãos .....	60
8	Resumo da análise de variância para o efeito das lâminas de água dentro de cada dose de nitrogênio (IV caso-SATTERTHWAITE: $s = 141,234$ e $n = 92,681$ ) .....	63
9	Resumo da análise de variância da regressão, para lâmina total de água dentro das doses de nitrogênio .....	64
10	Produtos físicos marginais da água, dentro de cada dose de nitrogênio, para diferentes lâminas totais de água ( Ilha Solteira, SP , 1982) .....	72

## TABELA

Pág.

11	Resumo da análise de variância para efeito das doses nitrogênio dentro de cada lâmina total de água .....	78
12	Resumo da análise de variância da regressão, para doses de nitrogênio dentro das lâminas totais de água .....	79
13	Produtos físicos marginais do nitrogênio, dentro de cada lâmina total de água, para as diferentes doses de nitrogênio (Ilha Solteira, SP, 1982) .....	82
14	Produtos físicos marginais da água (valor superior) e do nitrogênio (valor inferior entre parêntesis), para as diferentes lâminas totais de água e doses de nitrogênio ( Ilha Solteira , SP; 1982). $PFM_a = \frac{\partial Y}{\partial W}$ e $PFM_n = \frac{\partial Y}{\partial N}$ .....	89
15	Combinações de lâminas de água e doses de nitrogênio e correspondentes taxas marginais de substituição de água por nitrogênio, para níveis fixos de rendimento de grãos (Ilha Solteira, SP, 1982). $TMS_{W/N} = dW/dN = - \partial Y/\partial N/\partial Y/\partial W$ .....	91
16	Valores de W e N para as isóclinas nas quais $dW/dN = 0$ e $dN/dW = 0$ (Ilha Solteira, SP, 1982) .....	92
17	Valores $W^*$ e $N^*$ que proporcionam a combinação de custo mínimo, para uma relação $P_n/P_w = 2,23$ (Ilha Solteira, SP, 1982): ..	96
18	Peso médio de 100 grãos, em gramas, obtidos em função das lâminas totais de água e das doses de nitrogênio (Ilha Solteira, SP, 1982).....	100
19	Resumo da análise de variância do peso de 100 grãos, obtido em função das lâminas totais de água e das doses de nitrogênio .....	101

## TABELA

Pág.

20	Número médio de grãos por vagem, em função das lâminas totais de água e das doses de nitrogênio (Ilha Solteira, SP, 1982) .....	104
21	Resumo da análise de variância do número médio de grãos por vagem, em função das lâminas totais de água e das doses de nitrogênio .....	105
22	Número médio de vagens por planta, em função das lâminas totais de água e das doses de nitrogênio (Ilha Solteira, SP ; 1982) .....	108
23	Resumo da análise de variância do número de vagens por planta, obtido em função das lâminas totais de água e das doses de nitrogênio .....	109
24	Valores médios da eficiência de uso de água ( $\text{kg.m}^{-3}$ ), em função das lâminas totais de água e das doses de nitrogênio (Ilha Solteira, SP, 1982) .....	113
25	Resumo da análise de variância para eficiência de uso de água, obtida em função das lâminas totais de água e das doses de nitrogênio .....	114
26	Resumo da análise de variância para as interações entre lâminas totais de água e doses de nitrogênio.....	115

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA		Pág.
1	Variação diária da temperatura média ( $^{\circ}\text{C}$ ), umidade relativa (%) e da precipitação pluvial (mm) .....	18
2	Curva de retenção de água do solo .....	20
3	Diagrama esquemático de um bloco experimental .....	25
4	Distribuição da precipitação dos aspersores NAAN 233/92, em função da distância da linha de aspersores .....	26
5	Lâminas totais de água aplicadas durante o ciclo da cultura .....	28
6	Relação entre a disponibilidade de água e o coeficiente de umidade, para o solo com DTA = 74,6 mm até 40cm de profundidade .....	32
7	Caracterização dos estágios fenológicos da cultura nos diversos tratamentos utilizados .....	45
8	Variação dos valores de K ao longo do ciclo da cultura, para as diversas lâminas totais de água dentro da dose de nitrogênio de $90\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ .....	50
9	Valores acumulados de $\text{ET}_a$ para o feijão, em mm, para as diversas lâminas totais de água, dentro da dose de nitrogênio de $90\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ .....	51
10	Valores diários de ECA, $\text{ET}_o$ , $\text{ET}_m$ e $K_c$ , durante o ciclo da cultura .....	52
11	Relação entre o rendimento relativo de grãos ( $Y/Y_{\text{máx}}$ ) e a evapotranspiração relativa ( $\text{ET}_a/\text{ET}_m$ ) .....	54
12	Valores de $\text{ET}_a$ ( $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ ) em função do teor de água no solo	

FIGURA	Pág.
( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ), da água disponível (%) e da $ET_m$ (mm) .....	57
13 Curva de rendimento médio de grãos em função das lâminas de água .....	61
14 Rendimento de grãos de feijão, em $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ , em função das lâminas totais de água, dentro das seis doses de nitrogênio...	66
15 Rendimento relativo de grãos de feijão, em função das lâminas totais de água, na dose de nitrogênio $N_3$ .....	67
16 Rendimento relativo de grãos de feijão, em função do potencial matricial da água no solo, na dose de nitrogênio $N_3$ .....	68
17 Variação do potencial matricial da água no solo, em função do tempo após a irrigação, para um valor médio de $ET_m$ igual a $3,7\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ .....	70
18 Lâmina total de água economicamente ótima, em função da relação entre o preço da água e o preço do produto .....	74
19 Curva de rendimento médio de grãos em função das doses de nitrogênio .....	76
20 Rendimento de grãos em função das doses de nitrogênio aplicadas, nas diferentes lâminas totais de água .....	80
21 Dose de nitrogênio economicamente ótima, em função da relação entre o preço do nitrogênio e o preço do produto .....	84
22 Rendimento de grãos em função das lâminas totais de água e das doses de nitrogênio .....	86
23 Curvas de isoproducto .....	88
24 Região de produção racional .....	93
25 Combinações de custo mínimo para água e nitrogênio, usando	

TABELA		Pág.
	uma relação de preços $P_n/P_w = 2,23$ .....	97
26	Peso médio de 100 grãos em função das lâminas totais de água .....	102
27	Peso médio de 100 grãos em função das doses de nitrogênio...	103
28	Número médio de grãos por vagem em função das lâminas totais de água .....	106
29	Número médio de grãos por vagem em função das doses de nitro <u>g</u> ênio .....	107
30	Número médio de vagens por planta em função das lâminas <u>to</u> tais de água .....	110
31	Número médio de vagens por planta em função das doses de ní <u>t</u> rogênio .....	111
32	Eficiência de uso de água, em função das doses de nitrogênio dentro das lâminas totais de água .....	116
33	Eficiência de uso de água, em função das lâminas totais de água dentro das doses de nitrogênio .....	117

FUNÇÕES DE RESPOSTA DO FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* L.)  
AO USO DE NITROGÊNIO E LÂMINA DE IRRIGAÇÃO

Candidato: José Antonio Frizzone

Orientador: Dr. Antonio Fernando Lordelo Olitta

RESUMO

Com o objetivo de estudar o efeito da lâmina de água aplicada, da adubação nitrogenada e da interação destes fatores sobre o rendimento econômico e componentes da produção do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.); um experimento foi conduzido com a cultivar carioca, no campo experimental da UNESP, Campus de Ilha Solteira, SP.

O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso com parcelas subdivididas, com quatro repetições. Os tratamentos constaram da combinação de seis lâminas de água ( $W_1=621$ ,  $W_2=534$ ,  $W_3=420$ ,  $W_4=298$ ,  $W_5=181$  e  $W_0=105$ mm), localizadas nas parcelas e seis doses de nitrogênio ( $N_0=0$ ,  $N_1=30$ ,  $N_2=60$ ,  $N_3=90$ ,  $N_4=120$  e  $N_5=150$ kg.ha<sup>-1</sup>) localizadas nas subparcelas.

A aplicação de água foi realizada através de um equipamento de aspersão disposto no campo segundo o "sistema de aspersão em linha". As irrigações foram controladas em função da evaporação acumulada no tanque "Classe A" (ECA), aplicando-se água sempre que ECA atingiu 50mm. A parcela  $W_1$  recebeu, em cada irrigação, uma lâmina de água igual a 100% de ECA.

Através das análises dos resultados obtidos concluiu-se que:

- A aplicação de água e nitrogênio aumentaram o rendimento de grão segundo uma relação quadrática, sendo significativas as interações entre os fatores. O peso médio de 100 grãos, o número médio de grãos por vagem e de vagens por planta aumentaram com a aplicação de água e nitrogênio, contudo as interações entre água e nitrogênio não foram significativas.
- . A análise conjunta dos fatores água e nitrogênio mostrou que o máximo rendimento de grãos estimado ( $2261,8 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) foi alcançado com a aplicação de 570,4 mm de água e  $117,4 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  de nitrogênio.
  - . Para uma dada relação entre os preços da água e do produto, a maior lâmina de água economicamente ótima ocorreu quando se aplicaram  $90 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  de nitrogênio. A inviabilidade econômica da irrigação foi atingida mais rapidamente quando não se utilizou adubação nitrogenada.
  - . Para uma dada relação entre os preços do nitrogênio e do produto, a máxima receita líquida pode ser atingida com a aplicação de uma lâmina de água de 534mm e com a correspondente dose de nitrogênio economicamente ótima. A inviabilidade econômica da adubação nitrogenada foi atingida mais rapidamente na menor lâmina de água aplicada (105mm).
  - . O máximo rendimento relativo de grãos foi obtido no regime de irrigação manejado a -1,9 bar, correspondendo a uma frequência de irrigação de 6 dias.

RESPONSE FUNCTIONS OF THE BEAN  
(*Phaseolus vulgaris* L.) TO THE USE OF  
NITROGEN AND IRRIGATION DEPTH

Candidate: José Antonio Frizzone

Adviser: Dr. Antonio Fernando Lordelo Olitta

SUMMARY

This work reports an experiment conducted of the field in the Experimental Station of the UNESP, Campus de Ilha Solteira (SP), Brazil, with the objective of studying the effect of applied water depth, nitrogen fertilization and intercation between such factors on the economic yield and production components of bean, cultivar carioca.

The experiment was conducted in randomized blocks design, with split-plots and four replicates. On the plots six water depth were applied ( $W_1 = 621$ ,  $W_2 = 534$ ,  $W_3 = 420$ ,  $W_4 = 298$ ,  $W_5 = 181$  and  $W_0 = 105$  mm). On the sub-plots six dosages of nitrogen fertilization were applied ( $N_0 = 0$ ,  $N_1 = 30$ ,  $N_2 = 60$ ,  $N_3 = 90$ ,  $N_4 = 120$  and  $N_5 = 150$  kg.ha<sup>-1</sup>).

Water application was conducted using a line source sprinkler system. The control of the irrigations was done based on the cumulative evaporation from "Class A" pan (ECA). Water was applied when ECA was 50 mm. The  $W_1$  plot received a water depth equal to 100% of ECA.

The analysis of the results led to the following conclusions:

- . Water and nitrogen application increased the grain yield according to a quadratic relationship. The interactions between factors were significant. The 100 grains weight, number of grains per pod and number of pods per plant increased with the water and nitrogen applications. However, the interactions between water and nitrogen were not significant.
- . The joint analysis of the factors water and nitrogen, showed that the maximum grain yield ( $2261.8 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) was achieved with the application of 570.4 mm of water and  $117.4 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  of nitrogen.
- . For a given relationship between the water and grain prices, the major optima water depth occurred when  $90 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  of nitrogen were applied. The economic non-viability of the irrigation was achieved faster without nitrogen fertilization.
- . For a given relationship between the nitrogen and grain prices, the maximum net income was obtained with the application of a depth water equal to 534 mm and with the corresponding optima dosage of nitrogen. The economic non-viability of nitrogen fertilization was achieved faster with the least water depth application (105 mm).
- . The maximum relative profit was obtained in the irrigation regime controlled at the -1.9 bar level, corresponding the an irrigation frequency of 6 days.

## 1. INTRODUÇÃO

O feijão (*Phaseolus vulgaris*, L.) é originário provavelmente da região sul do Brasil, de onde se espalhou para outros continentes no século XV, logo após o descobrimento da América. Constitui, desde então, a base da alimentação do povo brasileiro.

Um exame do comportamento do setor agrícola brasileiro durante a última década, permite observar uma redução no rendimento da cultura do feijão, conforme mostram os dados apresentados por VIEIRA (1984). Dentre os diversos fatores envolvidos na produção e que têm afetado o rendimento da cultura, estão incluídos a expansão da área cultivada em regiões de clima e solo desfavoráveis ao cultivo, pragas, doenças, falta de variedades adaptadas e carência de programas de pesquisas agronômicas, visando elevar o rendimento.

Dos fatores climáticos, a precipitação pluviométrica é aquele que frequentemente limita o rendimento. Em regiões de insuficiência pluviométrica, seja por quantidade ou distribuição, o êxito da atividade agrícola depende da irrigação. O feijoeiro, como a maioria das culturas, apresenta períodos do seu ciclo de desenvolvimento que são muito sensíveis à falta de água no solo. Se este déficit hídrico ocorre em períodos críticos como o da pós-floração, o rendimento reduz-se consideravelmente (KATTAN e FLEMING, 1956 ; MIRANDA e BELMAR, 1977 ; MAGALHÃES e MILLAR , 1978 e MUIRHEAD e WHITE , 1981).

Na agricultura irrigada, são clássicas as perguntas: quanto, quando e como irrigar? As duas primeiras referem-se à quantidade de água que se deve aplicar à cultura e aos intervalos de irrigação que permitem obter um rendimento ótimo econômico; a terceira refere-se à metodologia de aplicação da água que se deve usar para permitir uma distribuição uniforme da água no solo e minimizar as perdas na aplicação.

Na agricultura de sequeiro, uma pergunta frequente relativa à quantidade e distribuição das chuvas durante o ciclo de desenvolvimento da cultura é: que efeito tem no rendimento da cultura, a quantidade precipitada e sua distribuição durante o desenvolvimento vegetativo?

As respostas a estas perguntas são obtidas mediante a análise das relações entre a água, o solo, a planta e os fatores atmosféricos. As funções que relacionam de forma empírica o rendimento das culturas com os fatores de produção permitem responder a maioria das questões acima mencionadas.

Dentre os fatores do solo, a fertilidade tem merecido especial atenção por estar diretamente relacionada ao rendimento da cultura .

Resultados obtidos por GALLO e MIYASAKA (1961) mostraram que, na cultura do feijão, o nitrogênio é o nutriente absorvido em maior quantidade, seguido pelo potássio, cálcio, magnésio, enxofre e, finalmente, pelo fósforo.

Evidentemente, a disponibilidade de água e nutrientes no solo é fundamental ao desenvolvimento das culturas e o conhecimento destes fatores da produção possibilitam o manejo adequado das irrigações e das adubações. O uso das funções de produção permite encontrar soluções úteis na otimização do uso da água e dos fertilizantes na agricultura ou na previsão de rendimentos culturais.

O objetivo deste trabalho foi estudar o efeito da lâmina total de água aplicada, da adubação nitrogenada e da interação destes fatores sobre o rendimento econômico e componentes da produção do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*, L.).

## 2. REVISAO DE LITERATURA

Dos fatores complementares da produção, a água e os nutrientes são os fatores que limitam os rendimentos com maior frequência, de modo que o controle da água do solo e de sua fertilidade constitui um critério preponderante para o êxito da agricultura.

A absorção de elementos químicos pelas raízes das plantas dá-se à partir da solução do solo, na forma iônica. Os teores de nucrientes em solução são baixos e as quantidades existentes em solução, em geral, não são suficientes para o suprimento das culturas e, portanto, há necessidade de reposição dos nutrientes em solução através da liberação da fase sólida (MALAVOLTA, 1980),

A absorção de nutrientes do solo pelas raízes dá-se por três processos: intercepção radicular, fluxo de massa e difusão. O nitrogênio é predominantemente absorvido pelo processo de fluxo de massa, isto é,

a água está constantemente sendo absorvida, movendo-se para a superfície das raízes e penetrando nela, arrastando o nitrogênio, que é absorvido (OLSEN e KEMPER, 1968; BARLEY, 1970 e MALAVOLTA, 1980).

## 2.1. EFEITOS DO DÉFICIT DE ÁGUA SOBRE OS ESTÁGIOS FENOLÓGICOS DO FEIJOEIRO

Com base nos resultados experimentais obtidos no México em 1977, por Mojano, citado por VELEZ e GARZA (1978), recomenda-se dividir em quatro estágios o ciclo fenológico do feijoeiro, para fins de análise experimental: (1) da germinação ao início do florescimento; (2) do início do florescimento ao aparecimento das primeiras vagens; (3) do aparecimento das vagens ao final do desenvolvimento das mesmas e (4) dos enchimento dos grãos à maturação. Contudo, segundo NIX e FITSPATRICK (1969), a divisão em estágios de uma cultura é arbitrária.

A maioria dos estudos realizados com leguminosas indica que esta classe de plantas é muito sensível ao déficit hídrico durante o período de florescimento, observando-se significativa redução no rendimento de grãos e no número de vagens por planta (KATTAN e FLEMING, 1956; VITTUM *et alii*, 1963; SALTER e GOODE, 1967; MAGALHÃES E MILLAR, 1978; MAGALHÃES *et alii*, 1979 e MUIRHEAD e WHITE, 1981). Experimentos conduzidos com feijoeiro, na Flórida, por JANES (1948) e NETTLES (1948) já demonstravam a sensibilidade da cultura ao déficit de água no solo.

ROBINS e DOMINGO (1956), em Washington, trabalhando com feijoeiro, verificaram redução do número de vagens por planta quando o défi

cit de água foi imposto antes do florescimento. Quando o déficit ocorreu durante o florescimento, houve redução do número de vagens por planta e do número de grãos por vagem; quando ocorreu durante a maturação, reduziu o peso médio dos grãos.

A sensibilidade do feijoeiro ao estresse de água no solo, foi estudada em Arkansas por KATTAN e FLEMING (1956), determinando os estágios do ciclo nos quais a manutenção de no mínimo 50% da água disponível no solo resultaria no máximo rendimento. Os resultados foram os seguintes: a injúria causada pela seca e o consumo de água aumentaram com a idade das plantas. Irrigação no primeiro estágio (germinação ao florescimento) não foram importantes quando houve um suprimento de água adequado após este estágio, desde que no plantio houvesse alta disponibilidade de água no solo. Déficit hídrico no estágio de desenvolvimento das vagens à maturação, limitou o rendimento de grãos, mesmo que nos estágios anteriores tenham se mantido condições ótimas de umidade no solo.

Uma cuidadosa revisão de mais de mil experimentos foi realizada por SALTER e GOODE (1967), relacionando o efeito da tensão da água no solo, em diferentes estágios de desenvolvimento das culturas, sobre o rendimento. Com base neste trabalho é possível concluir que, se o déficit hídrico é imposto no estágio de pós-floração, o rendimento de grãos de feijão reduz-se consideravelmente. Ainda, para obter rendimento máximo e ótima qualidade dos grãos, deve existir no solo um conteúdo de água suficiente durante o período de florescimento e desenvolvimento das vagens. Estas assertivas corroboram àquelas apresentadas por DOOREMBOS e KASSAN (1979) e MUIRHEAD e WHITE (1981). MAURER *et alii* (1969), observaram relativa recuperação do feijoeiro quando, após o déficit hídrico imposto antes do flo

rescimento, forneceu-se adequado regime de água no restante do ciclo. Entretanto, quando a cultura sofreu déficit hídrico apenas à partir do florescimento, o rendimento médio de grãos foi significativamente reduzido.

FISCHER e WEAVER (1974) e DOOREMBOS e PRUITT (1975), indicam para o feijoeiro os estágios do desenvolvimento, críticos em relação ao déficit de água no solo como sendo o pré-florescimento, florescimento e enchimento de grãos, nos quais a falta de água causará redução no rendimento grãos, no número de vagens por planta e no peso de grãos por vagem. MIRANDA e BELMAR (1977), em experimentos realizados no Chile, durante dois anos consecutivos, observaram redução significativa no rendimento de grãos quando submeteram a cultura ao déficit de água no solo durante o florescimento e maturação das vagens. O peso de 1000 grãos foi significativamente reduzido com a imposição do déficit hídrico, contudo não houve efeito sobre o número de grãos por vagem.

MAGALHÃES e MILLAR (1978), em Petrolina - PE, Brasil, submeteram o feijoeiro a diferentes déficits contínuos de água, impostos a partir de uma semana antes do início da floração e verificaram uma redução de 20% no rendimento de grãos, quando a cultura esteve 14 dias sem irrigação durante a floração. Depois de 17 e 20 dias sem irrigação, as reduções nos rendimentos foram de 30 e 52%, respectivamente, permanecendo quase constante até o final de 29 dias de déficit. GARRIDO *et alii* (1979), em estudos realizados no Norte de Minas Gerais, observaram que o déficit de água no período de formação e crescimento das vagens, reduziu o rendimento de grãos de 58% em relação ao tratamento que recebeu irrigação em todo o ciclo, a um nível de reposição de água no solo de 60% da água disponível. Déficit de água no final da floração reduziu o rendimento em 42%.

Estudos conduzidos no Irã, por HORNER e MOJTEHEDI (1970), mostraram que a ocorrência de déficit de água no solo durante o florescimento e no início da maturação do feijoeiro, reduziu o rendimento de grãos de 18 e 26%, respectivamente, em relação ao rendimento máximo obtido na ausência do déficit hídrico.

## 2.2. DEMANDA DE ÁGUA DO FEIJOEIRO

Diferentes metodologias tem sido utilizadas para estimar a evapotranspiração das culturas. Entre elas destacam-se o uso de lisímetros, o balanço de água no solo, a equação de Penman e o uso do tanque "Classe A". Naturalmente cada metodologia apresenta sua aplicabilidade, algumas sendo mais indicadas pela precisão oferecida na estimativa e outras por serem práticas e econômicas. Quanto a este aspecto, STANHILL (1961) recomendou a utilização do tanque "Classe A" para estimativas do consumo de água das culturas em Israel por se apresentar como um método relativamente preciso, prático e econômico, capaz de fornecer valores integrantes dos fatores meteorológicos envolvidos na evapotranspiração. Dentre os trabalhos que confirmam a viabilidade do uso do tanque "Classe A", destacam-se, ainda, os devidos à DENMEAD e SHAW (1959), DOSS *et alii* (1962), FUCHS e STANHILL (1963), KALMA e STANHILL (1970) e SCARDUA (1970)

O déficit de água no solo e conseqüente déficit na planta tem um acentuado efeito sobre a evapotranspiração da cultura e sobre seu rendimento econômico, conforme discutido por STEWART (1972), HILLEL e GURON (1973), HOWELL e HILER (1975) e BEGG e TURNER (1976). Estes autores admitem uma relação linear entre a evapotranspiração relativa e o ren

dimento relativo de grãos, de forma que o aumento na evapotranspiração relativa é acompanhado pelo aumento no rendimento de grãos. HANKS (1974), utilizou esta relação linear mas acrescentou que a sua validade ainda não está totalmente comprovada, citando casos em que o rendimento de grãos não está adequadamente correlacionado com a evapotranspiração.

Condições de adequado suprimento de água no solo facilitam a evapotranspiração, conforme salientam LEMON *et alii* (1957), FRITSCHER e SHAW (1961), DENMEAD e SHAW (1962) e EAGLEMAN e DECKER (1965). Outros fatores afetam a evapotranspiração das culturas, como variação nas características da superfície vegetada, absorção de energia pela superfície, temperatura do ar, umidade relativa e radiação líquida (BLACK *et alii* , 1970 ; YANG e De JONG, 1972 e RITCHIE , 1973).

A evapotranspiração do feijão foi determinada por diversos pesquisadores em diferentes localidades, utilizando os mais variados métodos. TOSELO (1963), comenta que, desde o início do florescimento até o estado leitoso dos grãos, o feijoeiro é exigente em água. Nestes períodos , nas estações menos quentes, o consumo de água é da ordem de 3 a 4mm.dia<sup>-1</sup>.

REICHARDT *et alii* (1974), estudando o movimento da água em um solo cultivado com feijoeiro, tendo como objetivo o estabelecimento de um balanço hídrico completo, encontraram, para as condições de Piracicaba-SP , uma evapotranspiração real média, durante 48 dias do ciclo , de 3,45 mm.dia<sup>-1</sup>. Também, para as condições climáticas de Piracicaba, utilizando o método do balanço de água no solo, LUCHIARI Jr. (1978), encontrou uma evapotranspiração real média, desde o plantio até a fase de maturação dos frutos, de 3,06mm.dia<sup>-1</sup>.

GARRIDO e TEIXEIRA (1977), em trabalho realizado na região

sul do Estado de Minas Gerais, utilizando o método do balanço de água no solo, encontraram uma evapotranspiração real média para o feijoeiro de  $3,34 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ , durante o ciclo.

FRIZZONE *et alii* (1983), utilizando o mesmo método do balanço de água no solo, encontraram uma evapotranspiração real média de  $5,2 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ , nos últimos 60 dias do ciclo do feijoeiro, nas condições climáticas de Ilha Solteira.

GUIMARÃES *et alii* (1982), utilizando microlisímetros na determinação da evapotranspiração do feijoeiro, em Goiânia, obtiveram consumo diário de água variável durante o ciclo da cultura, para duas populações de plantas: 200000 plantas/ha (A) e 300000 plantas/ha (B) e dois regimes hídricos: com deficiência hídrica (D) e irrigado (I). Aos 10 dias após a emergência, 1,96 mm de água foram gastos em AD, 2,14 mm em BD, 2,24 mm em AI e 2,36 mm em BI. Os maiores gastos foram verificados durante o florescimento com 5,27 mm em AD, 6,56 mm em BD, 7,03 mm em AI e 7,26 mm em BI. Durante o período inicial da maturação foram verificados 0,79 mm em AD, 0,90 mm em BD, 1,56 mm em AI e 1,45 mm em BI.

AZEVEDO (1984), com a finalidade de estimar o consumo de água pela cultura do feijoeiro, nas condições climáticas de Piracicaba, realizou o balanço de água no solo, em duas subparcelas que receberam os seguintes tratamentos:  $(N_{24})$  30 Kg/ha de nitrogênio e 417,0 mm de água;  $(N_{42})$  90 Kg/ha de nitrogênio e 364,0 mm de água. Foi observado um maior consumo de água no tratamento  $N_{24}$  quando comparado ao  $N_{42}$ . Os consumos de água médios diários nos 60 dias estudados (34º ao 93º dias após o plantio) foram 3,17 e 3,84 mm para os tratamentos  $N_{42}$  e  $N_{24}$ , respectivamente.

## 2.3. RESPOSTA DO FEIJOEIRO A DIFERENTES NÍVEIS DE MANEJO DE IRRIGAÇÃO E DE ADUBAÇÃO NITROGENADA

McMASTER *et alii* (1965), estudaram os efeitos de dois tratamentos de irrigação, impostos em dois diferentes períodos de crescimento, sobre a produção de feijão para sementes. A irrigação foi feita quando 40 e 60% da água disponível foram retirados do solo. Verificaram que, no tratamento mais úmido, desde o plântio até o florescimento, a produção de sementes aumentou e a maturação foi alcançada mais cedo do que no tratamento mais seco. A diminuição do nível de água no solo desde o florescimento até a maturação também tendeu a acelerar a maturação, às expensas, porém, de menor produção de sementes. Neste experimento, o tamanho das sementes foi aumentado pelo tratamento mais úmido após o florescimento. CRANDALL *et alii* (1967) encontraram que, quando o conteúdo de água disponível no solo foi mantido acima de 50%, houve um aumento na produção do feijoeiro e uma considerável melhora na qualidade dos grãos.

BARRIOS (1966), empregando os sistemas de irrigação por aspersão e infiltração no feijoeiro, verificou que o ciclo da cultura foi 10 dias maior com o cultivo irrigado e que os rendimentos obtidos com irrigação foram 85% superiores aos obtidos unicamente com chuva.

CAROLUS e SCHLEUSENER (1970), aplicaram cinco regimes de água e dois níveis de nitrogênio na cultura do feijoeiro. Observaram que houve tendência de diminuição na produção de feijão com o aumento da irrigação nas parcelas que receberam doses menores de nitrogênio e uma tendência de aumento da produção de feijão com o aumento da irrigação nas parcelas com altas doses de nitrogênio.

McMASTER *et alii* (1965), concluíram que a maturação do fei

joeiro foi apressada em 8 a 14 dias pelo alto nível de água no solo (40% da água disponível) , durante seu ciclo.

MACK e BONANNO (1981), estudando níveis de água no solo combinados com níveis de nitrogênio, na cultura do feijoeiro, observaram que os maiores rendimentos foram obtidos nos tratamentos em que o potencial matricial da água no solo, a 30 cm de profundidade, foi de -1,0 bar ou maior. Observaram que o efeito da aplicação de nitrogênio sobre a produção de feijão não foi notável, sendo de 110Kg/ha a dose que apresentou maior rendimento.

Estudos realizados por SILVA (1978), com a cultura do feijão-de-corda (*igna sinensis* L. Savi), no Campo Experimental de Bebedouro, Petrolina, testando cinco lâminas de água e quatro níveis de nitrogênio, permitiram concluir que a aplicação de água aumentou linearmente a produção de grãos nos níveis de 80 a 120 Kg/ha de nitrogênio. O número de vagens por planta aumentou linearmente com o aumento dos níveis de irrigação e houve um efeito quadrático para os níveis de nitrogênio. O número de grãos por vagem e peso de 100 grãos não diferiram estatisticamente entre os tratamentos envolvidos.

FRIZZONE *et alii* (1982), em estudos realizados com a cultura do feijoeiro, em Latossolo Vermelho Escuro, verificaram um aumento de 23,4% no rendimento de grãos, quando a lâmina de água aplicada aumentou de 350 para 530 mm. Foram testadas quatro lâminas de água, e verificou-se um aumento linear da produção com o aumento da lâmina d'água no intervalo de 350 a 530 mm.

AZEVEDO (1984), estudando os efeitos de diferentes lâminas de água e doses de nitrogênio na cultura do feijoeiro, em Piracicaba , en

controu um efeito altamente significativo para as lâminas totais de água e doses de nitrogênio, sobre a produtividade de grãos. Para a interação lâmina total de água e dose de nitrogênio não houve efeito significativo.

#### 2.4. DISTRIBUIÇÃO DO SISTEMA RADICULAR DO FEIJOEIRO E EXTRAÇÃO DE ÁGUA PELAS RAÍZES

LIMA *et alii* (1978), trabalhando com feijoeiro irrigado em Mocaminho (MG), observaram que o sistema radicular da cultura atingiu uma profundidade de 40 cm e que 75,5% das raízes situavam na camada de 0 a 20 cm de profundidade. INFORZATO e MYASAKA (1963), estudando a distribuição das raízes do feijoeiro em dois tipos de solos do Estado de São Paulo, determinaram que os primeiros 10 cm de profundidade continham 74,5% das raízes; nos primeiros 20 cm ocorriam 83,6% do total. O restante das raízes estavam distribuídas até 90 cm de profundidade.

STANSEL e SMITTLE (1980), relatam que a extração de água pelas raízes do feijoeiro, em experimento conduzido em três anos distintos, ocorreu principalmente na camada de 0 a 30 cm de profundidade. Na camada de solo de 30 a 45 cm de profundidade a extração da água foi pequena e abaixo de 45 cm, independente do tratamento de estresse hídrico, a absorção não foi significativa.

Em experimento de campo com feijoeiro, REICHARDT *et alii* (1974) determinaram semanalmente a distribuição do sistema radicular da cultura, verificando que 90% das raízes estavam contidas nos 30 cm superiores do perfil do solo.

## 2.5. APLICAÇÕES DAS SUPERFÍCIES DE RESPOSTA

O emprego das funções de produção na análise e discussão dos resultados dos experimentos agrícolas, está hoje bastante difundido. Sua utilização para determinar os níveis economicamente ótimos dos fatores é o principal ponto crítico da aplicação em experimentos agrícolas (ECKERT *et alii*, 1978 e ARAGON e De DATTA, 1982).

A regressão polinomial com duas variáveis independentes, discutida por BOX (1954), tem hoje um vasto emprego agrônômico, embora existam os delineamentos apropriados para seu ajustamento às superfícies de resposta.

HEADY e PESEK (1954), fizeram um estudo do ponto de vista econômico e agrônômico, da aplicação da superfície de resposta a um experimento fatorial de adubação NP em milho. Eles estudaram o comportamento de cada nutriente na presença das doses de 0, 160 e 320 libras do outro, organizando gráficos ilustrativos desses cortes realizados. Quando o N foi fixado em zero, observou-se um declínio total no rendimento. As duas curvas para  $P_2O_5$  com N fixado respectivamente em 160 e 320 libras, tiveram um comportamento semelhante, apresentando ambas uma rápida ascensão para doses relativamente baixas de  $P_2O_5$ , decrescendo a seguir para altas doses. Um comportamento análogo se verificou para o N; quando se fixaram as doses 0, 160 e 320 libras para o  $P_2O_5$ .

Segundo JENSEN e PESEK (1959), a utilidade das funções de produção em agricultura se expressa em dois aspectos: (a) a descrição matemática da relação fator-produto permite obter a informação necessária para ajustar o rendimento à níveis economicamente adequados; (b) o uso dos mode

los permite avançar no conhecimento dos mecanismos biológicos, particularmente o mecanismo transformador de fatores em produtos .

CAMPOS (1967), estudou a aplicação da superfície de resposta aos ensaios fatoriais N P K e concluiu que os parâmetros da equação da superfície apresentam intervalos de confiança muito amplos, traduzindo consequentemente uma imprecisão nas estimativas dos rendimentos, não sendo desprezível, inclusive, a probabilidade de obtenção de produções negativas.

### 3. MATERIAL E METODOS

#### 3.1. LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido no campo experimental da UNESP, Campus de Ilha Solteira, situado à margem direita do rio Paranã, no Estado de Mato Grosso do Sul, a  $20^{\circ}22'$  de latitude Sul,  $51^{\circ}22'$  de longitude Oeste e altitude de 335m. As médias anuais de temperatura, precipitação pluviométrica e umidade relativa são, respectivamente,  $25^{\circ}\text{C}$ , 1330mm e 66%. Cerca de 80% da precipitação pluviométrica média anual ocorre no período de outubro a março (CENTURION, 1982).

O clima da região é do tipo megatérmico,  $A_w$ , segundo a classificação climática proposta por W. Köppen, isto é, tropical de inverno seco. A temperatura média de todos os meses é maior que  $18^{\circ}\text{C}$ , a precipitação

média anual é menor que 10 vezes a precipitação do mês mais seco e a precipitação do mês mais seco é menor que 60mm.

A variação diária da temperatura média, umidade relativa e as precipitações ocorridas durante o período experimental encontram-se na Figura 1, onde se verifica que o período foi relativamente seco, com um total pluviométrico de 72mm.

O solo da área de estudos foi classificado por DEMATTE (1980) como sendo Latossolo Vermelho Escuro, fase argilosa. Alguns de seus atributos físicos, determinados previamente à instalação do experimento, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Atributos físicos do solo da área experimental.

Profundidade (cm)	Granulometria			Teor de água <sup>a/</sup>		Densidade <sup>b/</sup>
	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	CC (% vol.)	PMP	global (g. cm <sup>-3</sup> )
0 - 20	23,00	18,00	59	36,8	18,1	1,45
20 - 40	24,50	14,50	61	35,4	16,8	1,36
40 - 60	26,40	10,60	63	30,2	16,4	1,30
60 - 80	27,00	11,00	62	28,3	16,5	1,26
80 - 100	27,00	11,00	62	27,1	17,9	1,22

<sup>a/</sup> O teor de água na capacidade de campo (CC) foi determinado " *in situ*", baseado na definição de VEIHMEYER e HENDRICKSON (1949) e o teor de água no ponto de murcha permanente (PMP) foi determinado no laboratório a uma tensão de -15 bar.

<sup>b/</sup> A densidade global foi determinada através de amostras coletadas em cilindros UHLAND.

A curva de retenção de água do solo, obtida em laboratório,

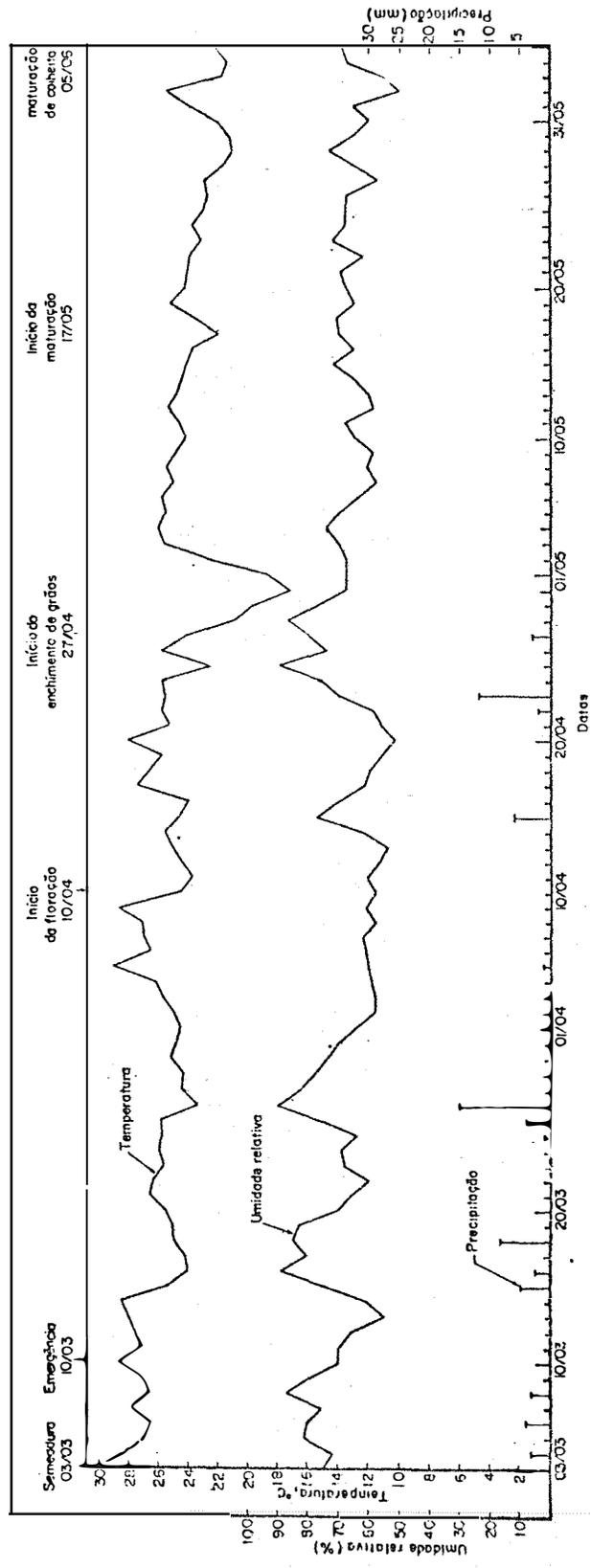


Figura 1 - Variação diária da temperatura média (°C) , umidade relativa (%) e da precipitação pluviual (mm)

com amostras de solo indeformadas, utilizando-se funil de placa porosa e membrana de pressão, segundo recomendações de RICHARDS (1949), é apresentada na Figura 2.

Os resultados revelados pela análise química do solo, antes de ser realizada calagem e quatro meses após, constam na Tabela 2.

Tabela 2 - Características químicas do solo da área experimental, antes de se proceder a calagem e quatro meses após.

Profundidade (cm)	Antes da Calagem					
	pH em água	Al trocável (meq/100g)	Ca <sup>+2</sup> + Mg <sup>+2</sup> (meq/100g)	K <sup>+</sup> (meq/100g)	P (ppm)	C (%)
0 - 20	5,0	1,2	0,4	0,08	1,0	1,26
20 - 40	4,8	1,3	0,3	0,05	1,0	0,76
0 - 20	Quatro meses após a calagem					
	6,2	0,0	4,4	0,09	1,3	1,12
20 - 40	5,6	0,0	3,8	0,07	1,0	1,10

### 3.2. VARIEDADE E PRÁTICAS CULTURAIS

Utilizaram-se no experimento sementes básicas de feijão (*Phaseolus vulgaris*, L.), cultivar carioca, com os seguintes padrões de

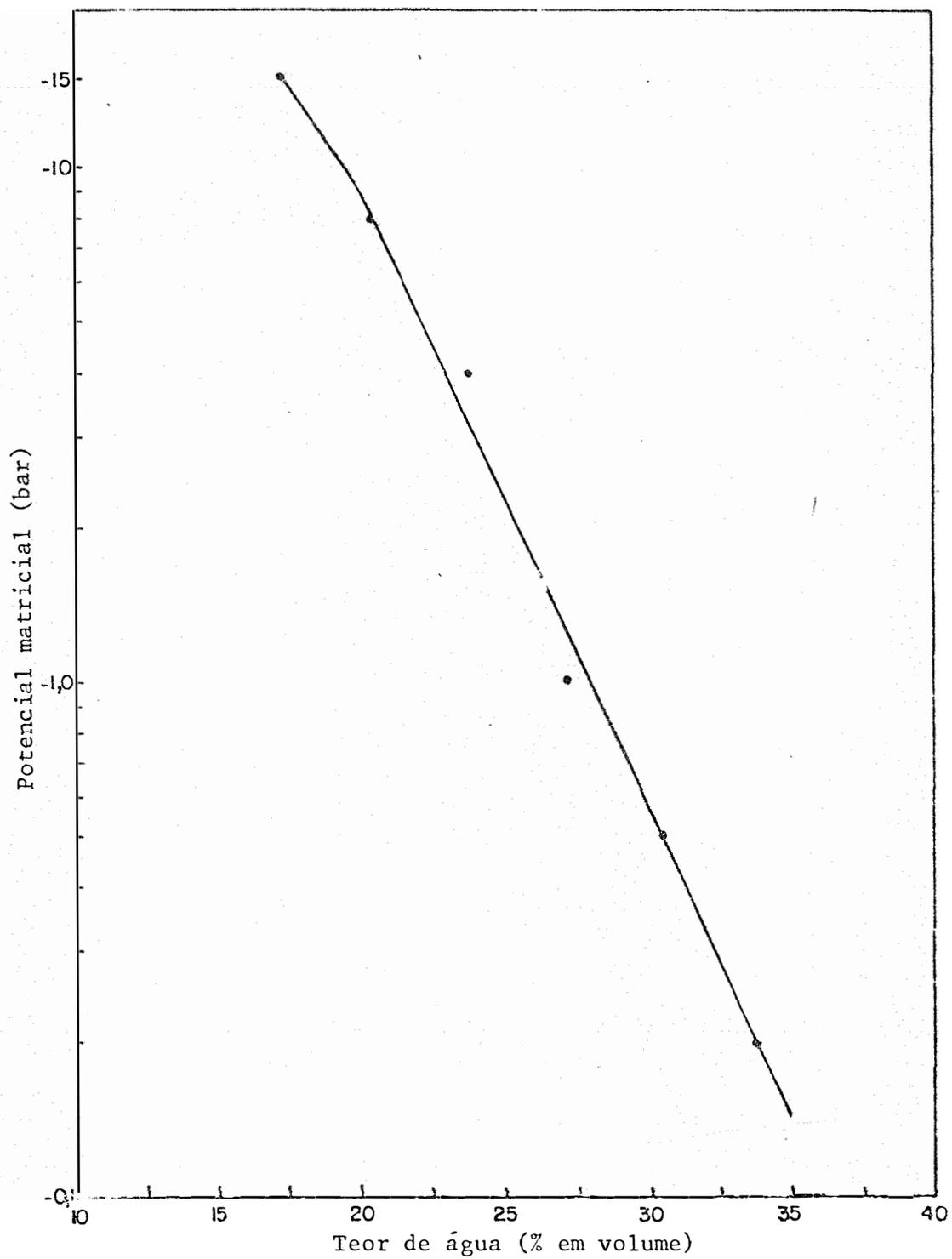


Figura 2 - Curva de retenção de água do solo, para a profundidade de 0 a 40 cm.

qualidade: pureza mínima de 99%; sementes de outras cultivares, porém do mesmo tipo, no máximo 0,5%, sementes de outras variedades, porém de tipos diferentes, no máximo 0,05%, poder germinativo mínimo de 85%, sementes infestadas no máximo 2% e sementes defeituosas no máximo 0,3%.

O preparo do solo constou de uma aração e gradagens em número suficiente para um adequado destorroamento do solo. Em seguida, instalou-se o sistema de irrigação e abriram-se os sulcos para semeadura. Após delimitadas e identificadas as parcelas e subparcelas, procederam-se manualmente, a adubação e semeadura, seguindo as recomendações de VIEIRA (1978). A semeadura iniciou-se em 02-03-82 e terminou em 03-03-82. O espaçamento entre fileiras de plantas foi de 40cm e a quantidade necessária de sementes por subparcelas foi determinada pela expressão apresentada por VIEIRA (1978):

$$Q = \frac{P \cdot D \cdot A}{1000 \cdot G \cdot E} \dots\dots\dots (1)$$

em que, Q = quantidade de semente, em Kg;

P = peso médio de 100 sementes, em g (18g);

D = número de plantas desejado por metro de fileira  
(15 plantas)

A = área da subparcela, em m<sup>2</sup> ( 21,12m<sup>2</sup>);

G = poder germinativo das sementes, em % (85%);

E = espaçamento entre fileiras, em m (0,40m).

A quantidade de sementes determinada pela equação (1) foi de 167,7g por subparcela. Seguindo as sugestões de PORTES (1981), para garantir uma população adequada de plantas, utilizou-se uma quantidade de se

mentos por subparcela duas vezes maior que a calculada, isto é 335,4g. Ao 15º dia após a emergência, iniciou-se o desbaste de todas as subparcelas deixando uma população média de 15 plantas por metro linear, isto é 792 plantas por subparcela (aproximadamente, 365000 plantas por hectare).

Quatro meses antes da semeadura (03-11-81) fez-se calagem do solo, na base de 5 toneladas de calcário por hectare. Previamente à calagem fez-se uma aração do solo e, posteriormente, uma gradagem.

Realizou-se adubação no sulco de plantio, na base de 100Kg.ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (4g por metro linear de sulco) e 70 Kg.ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O (2,8g por metro linear de sulco). A fonte de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> foi o superfosfato simples e a de K<sub>2</sub>O foi o cloreto de potássio. A adubação nitrogenada foi feita utilizando uréia sendo que as doses de nitrogênio foram preestabelecidas para cada tratamento: 0, 30, 60, 90, 120 e 150 Kg.ha<sup>-1</sup> de N. Cada dose total de nitrogênio foi parcelada conforme recomendação de MEIRELLES *et alii* (1980): 1/3 da dose total na semeadura, 1/3 aos 30 dias após a germinação e 1/3 aos 45 dias após a germinação.

O controle fitossanitário foi feito conforme apresentado na Tabela 3. Para o controle das ervas daninhas utilizaram-se capinas.

Tabela 3 - Esquema de pulverizações realizadas durante o ciclo da cultura.

Produtos	Datas						
	13/03	18/03	27/03	05/04	14/04	22/04	25/04
AZODRIN 60E	x		x		x	x	
LANATE 90X + DITHANE M45		x		x			
DISTREPTINE 20							x

### 3.3. SISTEMA DE APLICAÇÃO DE ÁGUA

A aplicação de água foi realizada por um sistema de irrigação por aspersão, disposto no campo segundo o sistema de "aspersão em linha" ("line source sprinkler system"), de acordo com a metodologia proposta por HANKS *et alii* (1976). Este sistema foi desenvolvido para fins experimentais e utilizado por muitos pesquisadores, entre os quais podem ser citados SILVA (1978), MILLER e HANG (1980), FARIA (1981), ARAGON e De DATTA (1982) e AZEVEDO (1984). A metodologia consiste na disposição de aspersores estreitamente espaçados sobre uma tubulação localizada no centro da área experimental. A sobreposição dos jatos de água promove uma maior precipitação junto à linha de aspersores e um gradiente decrescente ao longo da direção perpendicular à tubulação, sendo este efeito denominado de "distribuição triangular da precipitação". A localização das parcelas experimentais ao longo da direção perpendicular à linha de aspersores permite a aplicação de diferentes lâminas de água.

A escolha desta metodologia foi baseada nas vantagens que a mesma oferece, representadas pela simplicidade de instalação, operação, economia de área, equipamento e mão-de-obra, permitindo maior número de tratamentos em menor área e possibilitando uma melhor visualização do efeito dos tratamentos no campo. Entretanto, deve-se considerar a limitação imposta pelas características do sistema de "aspersão em linha", que consiste na impossibilidade de casualização dos tratamentos. FARIA (1981), utilizando dados de produção de grãos de trigo, realizou análise pelo teste de Friedman (análise não paramétrica) e posteriormente realizou a análise de variância para blocos ao acaso, obtendo-se os mesmos resultados em ambas

as análises. Este assunto também foi discutido por BAUDER *et alii* (1975) , onde foram comparados os efeitos dos mesmos tratamentos em dois experimentos, sendo um devidamente casualizado e outro semelhante ao do presente trabalho. A análise estatística dos dados obtidos conduziram às mesmas conclusões, demonstrando que a casualização nem sempre é fator limitante e que , em virtude das vantagens apresentadas pelo "sistema de aspersão em linha", é justificável sua utilização, mesmo com tais limitações.

A Figura 3 mostra esquematicamente a disposição da linha de aspersores colocada no centro da área experimental, dividindo a mesma em duas partes, estando paralela à direção das linhas de plantas. Foram utilizados 14 aspersores marca NAAN, modelo 233/92, de um bocal com diâmetro de 5mm, raio de alcance de 17m, vazão de  $1,80\text{m}^3.\text{h}^{-1}$  , espaçadas de 6m e presção de serviço de  $4,0 \text{Kg}_f.\text{cm}^{-2}$ .

O modelo de distribuição destes aspersores, dispostos em linha , foi obtido previamente no campo, em condições de velocidade de vento menor que  $3,0 \text{m}.\text{seg}^{-1}$  (Figura 4), servindo como base para definir as posições das parcelas . Posteriormente, durante a condução do experimento , determinaram-se os valores médios das lâminas de irrigação em cada parcela, utilizando-se pluviômetros (recipientes de 1 litro) instalados na direção perpendicular às parcelas e à altura da cultura.

Os aspersores trabalhando nas condições especificadas produziram precipitações de 19,6; 17,1; 13,5; 9,3; 4,1 e 1,3  $\text{mm}.\text{h}^{-1}$  , às distâncias de 0,5; 3,7; 6,9; 10,1; 13,3 e 16,5 m da linha de aspersores, respectivamente.

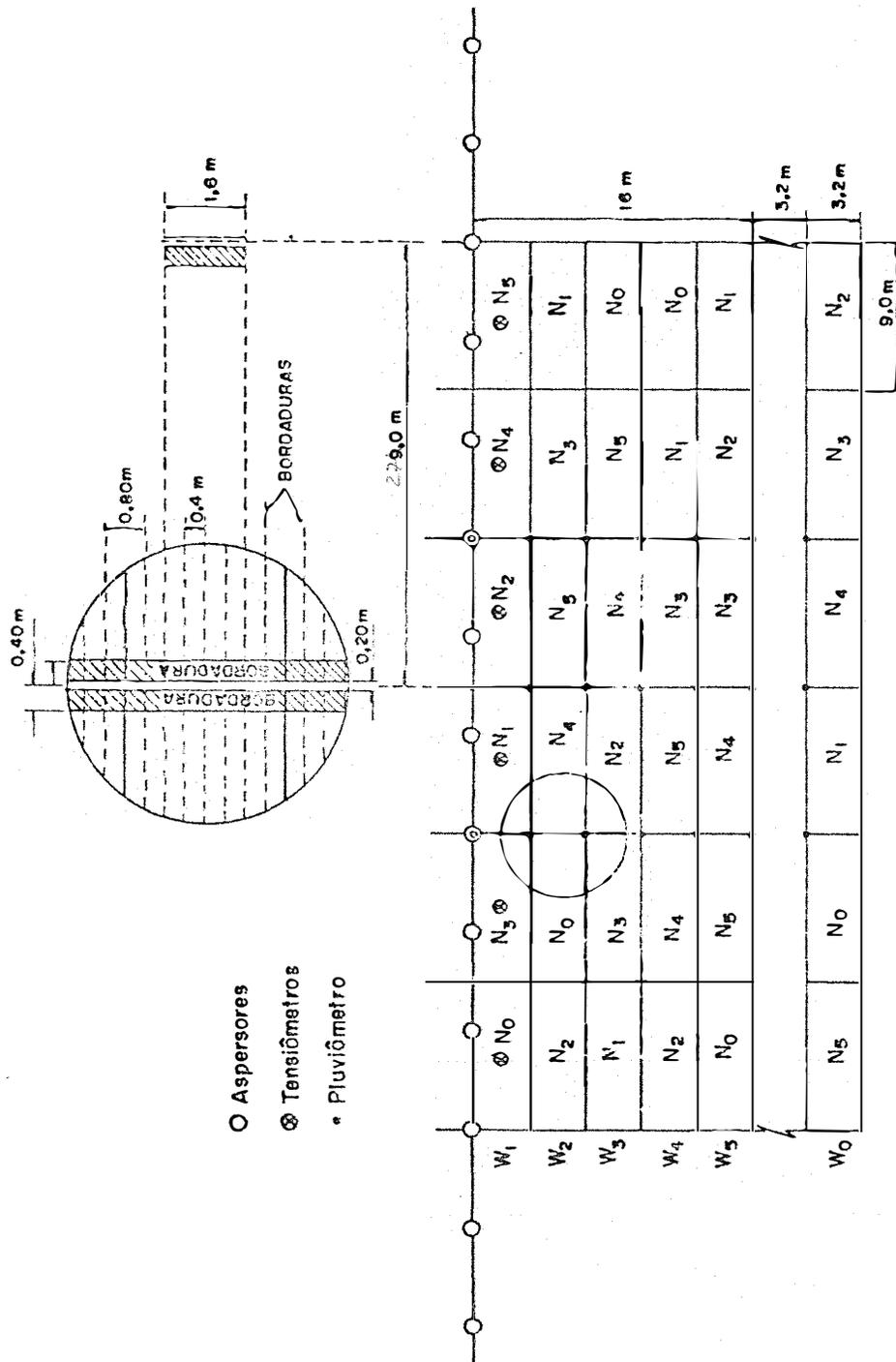


Figura 3 - Diagrama esquemático de um bloco experimental

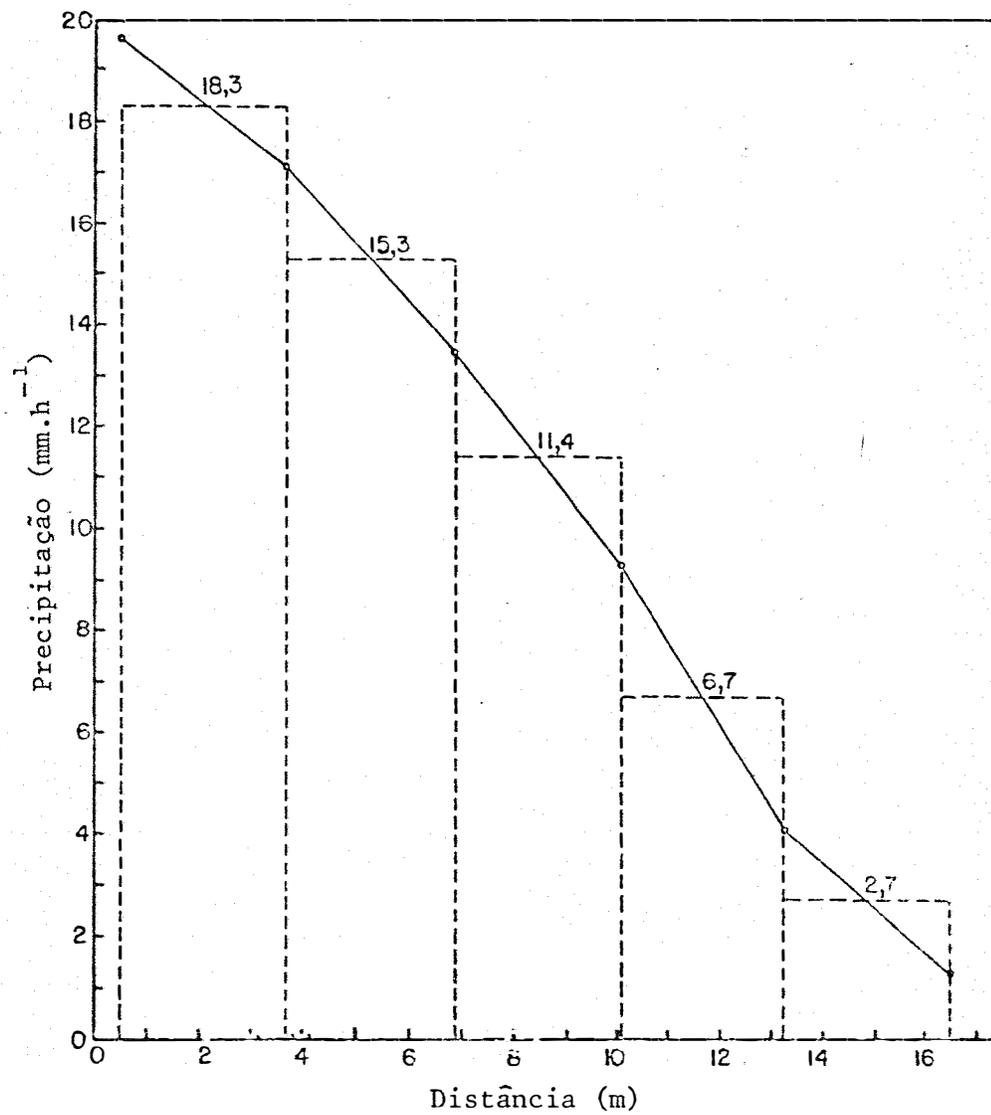


Figura 4 - Distribuição da precipitação dos aspersores NAAN 233/92, em função da distância da linha de aspersores.

### 3.4. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O delineamento experimental usado foi em blocos ao acaso com parcelas subdivididas ("split-plot"), com quatro repetições. Utilizam-se duas linhas de aspersão, sendo que em cada lado das linhas localizou-se um bloco. A Figura 3 apresenta o diagrama esquemático de um bloco.

Os tratamentos constaram da combinação de seis lâminas totais de água ( $W_i$ ) localizadas nas parcelas e seis doses de nitrogênio ( $N_i$ ) localizadas nas subparcelas. As lâminas totais de água aplicadas (Figura 5) foram:  $W_1 = 621\text{mm}$ ,  $W_2 = 534\text{mm}$ ,  $W_3 = 420\text{mm}$ ,  $W_4 = 298\text{mm}$ ,  $W_5 = 181\text{mm}$  e  $W_0 = 105\text{mm}$  (sem irrigação), estando incluído nestes valores a precipitação pluviométrica acumulada de  $72\text{mm}$ . As doses de nitrogênio foram,  $N_0 = 0 \text{ Kg.ha}^{-1}$ ,  $N_1 = 30 \text{ Kg.ha}^{-1}$ ,  $N_2 = 60 \text{ Kg.ha}^{-1}$ ,  $N_3 = 90 \text{ Kg.ha}^{-1}$ ,  $N_4 = 120 \text{ Kg.ha}^{-1}$  e  $N_5 = 150 \text{ Kg.ha}^{-1}$ .

Na Figura 3 estão esquematizados os detalhes das parcelas e subparcelas. A área útil de cada subparcela foi de  $13,12 \text{ m}^2$  ( $1,6 \times 8,2\text{m}$ ), tendo cinco linhas de plantas.

### 3.5. CONTROLE DA IRRIGAÇÃO

Após a semeadura, em 03-03-82, todos os tratamentos receberam irrigação uniforme, tendo-se aplicado uma lâmina de água de  $33,0 \text{ mm}$  para garantir a germinação. No dia 04-03-82 ocorreu uma precipitação pluviométrica de  $3,0\text{mm}$ , no dia 06-03-82 de  $4,0\text{mm}$  e no dia 08-03-82 de  $3,0\text{mm}$ . Entre os dias 03-03 e 10-03-82 a evaporação acumulada no tanque classe A (ECA) foi de  $53,0 \text{ mm}$ .

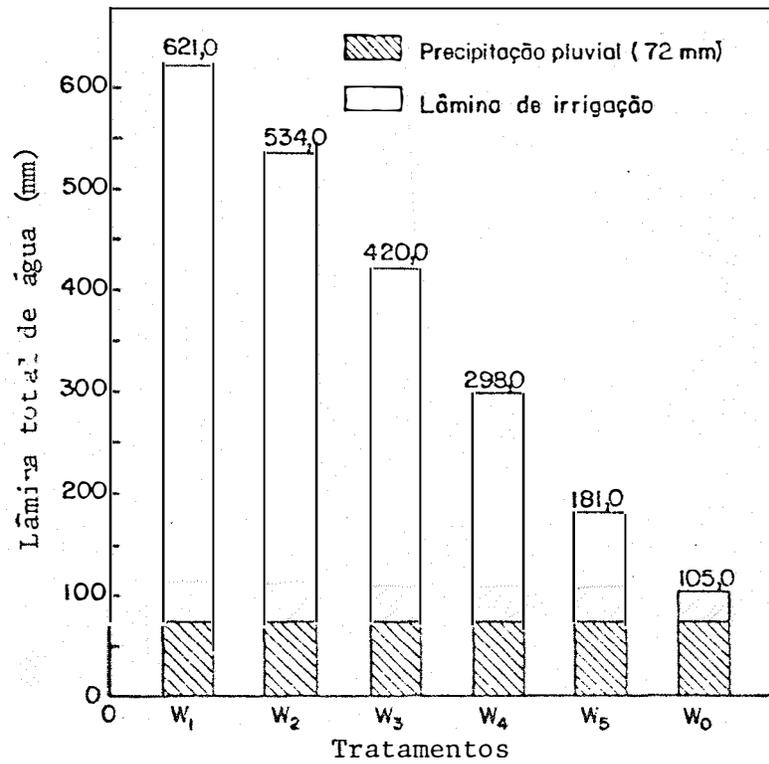


Figura 5 - Lâminas totais de água aplicadas durante o ciclo da cultura.

Em 10-03-82 iniciou-se o controle das lâminas de água por irrigação, utilizando-se o sistema de aspersão em linha e aplicando-se, nesta data, as seguintes lâminas de irrigação: 55,0; 44,0; 35,0; 18,0; 6,0 e 0,0mm, respectivamente nas parcelas  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$ ,  $W_4$ ,  $W_5$  e  $W_0$ . A partir desta data as irrigações foram controladas em função da evaporação acumulada no tanque "Classe A" (ECA). Realizou-se irrigação sempre que ECA atingiu valores de 50mm, aproximadamente. Procurou-se aplicar na parcela  $W_1$ , uma lâmina de irrigação equivalente a ECA no período. Para medir a lâmina aplicada em cada parcela foram utilizados pluviômetros instalados à altura da cultura e regularmente espaçados (Figura 3).

A última irrigação foi efetuada no dia 21-05-82, isto é, 80 dias após a sementeira ou 17 dias antes da colheita. Conforme comenta VIEIRA (1978), irrigações tardias permitem o apodrecimento de vagens que entram em contato com o solo, ocasionam excessivo crescimento vegetativo, atrasam a maturação e aumentam as perdas causadas por moléstias.

### 3.6. DEMANDA DE ÁGUA DO FEIJOEIRO

Para a estimativa da evapotranspiração do feijoeiro, utilizaram-se dados de evaporação obtidos no tanque "Classe A", de acordo com recomendações da FAO (DOORENBOS e KASSAN, 1979). A escolha desta metodologia foi baseada nas vantagens oferecidas, principalmente quanto a sua facilidade e aplicabilidade em controles de irrigação.

### 3.6.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE $K_p$ , $ET_o$ , $ET_m$ , $K_c$

As definições dos parâmetros  $K_p$ ,  $ET_o$ ,  $ET_m$  e  $K_c$ , utilizadas neste trabalho foram propostas por DOORENBOS e KASSAN (1979):

- $K_p$  (coeficiente do tanque "Classe A") = valor pelo qual se deve multiplicar a evaporação do tanque "Classe A" (ECA) para se obter a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ).

$$ET_o = K_p \times ECA \dots\dots\dots (2)$$

- $ET_o$  (evapotranspiração de referência) = água perdida na forma de evaporação e transpiração, por uma superfície com grama batatais (*Paspalum notatum*, Flugge), em condições ótimas de suprimento de água, em fase de desenvolvimento ativo e com bordadura adequada.

- $ET_m$  (evapotranspiração máxima ou demanda ideal de água) = taxa de perda de água por evapotranspiração de uma cultura qualquer em condições de nenhuma restrição hídrica, em qualquer estágio de desenvolvimento.

- $K_c$  (coeficiente de cultura) = valor pelo qual se deve multiplicar a evapotranspiração de referência para se obter a evapotranspiração máxima. Este valor depende da cultura, das condições de vento e da umidade relativa, sendo fornecido por DOORENBOS e KASSAN (1979).

$$ET_m = K_c \times ET_o \dots\dots\dots (3)$$

Neste trabalho, utilizaram-se os valores de  $K_c$  sugeridos pela FAO (DOORENBOS e KASSAN, 1979), tendo em vista que trabalhos desenvolvidos por SCARDUA (1970), SOUZA (1976), VILLA NOVA *et alii* (1978) e ENCARNAÇÃO (1979) verificaram um razoável grau de confiabilidade nestes coeficientes.

### 3.6.2. EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL OU ATUAL ( $ET_a$ )

Refere-se à perda de água por uma cultura qualquer, com ou sem restrição hídrica, em qualquer estágio de desenvolvimento.

A  $ET_a$  foi calculada multiplicando-se  $ET_m$  por um fator  $K$ , que é função da condição atual do teor de água do solo.

$$ET_a = K \times ET_m \dots\dots\dots (4)$$

O coeficiente de umidade do solo ( $K$ ) determina a fração da  $ET_m$  que evapotranspira, à medida que o teor de água do solo vai diminuindo, sendo dado pela seguinte expressão (BERNARDO, 1975):

$$K = \frac{\ln (DAA + 1)}{\ln (DTA + 1)} \dots\dots\dots (5)$$

em que, DAA = disponibilidade atual de água no solo, em mm;

DTA = disponibilidade total de água no solo, em mm.

Essa função dá uma curva do tipo Pierce, como descrito por DENMEAD e SHAW (1962), podendo ser observada na Figura 6.

A  $ET_a$  foi estimada para as parcelas que receberam as lâmi-  
nas totais de água  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$ ,  $W_4$ ,  $W_5$  e  $W_0$ , dentro da dose de nitro-  
gênio  $N_3$ .

O teor de água no solo foi determinado pelo método gravimé-  
trico, em diferentes dias ao longo do ciclo da cultura, sendo que o grau  
de umidade do solo imediatamente antes da irrigação e 24 horas após sempre  
foi determinado. As profundidades de amostragem do solo para determinação  
do teor de água foram de 20 e 40cm, utilizando-se para os cálculos o va-  
lor médio. Para estas determinações foram utilizadas parcelas localizadas  
separadamente dos blocos experimentais, situadas ao longo de uma linha de

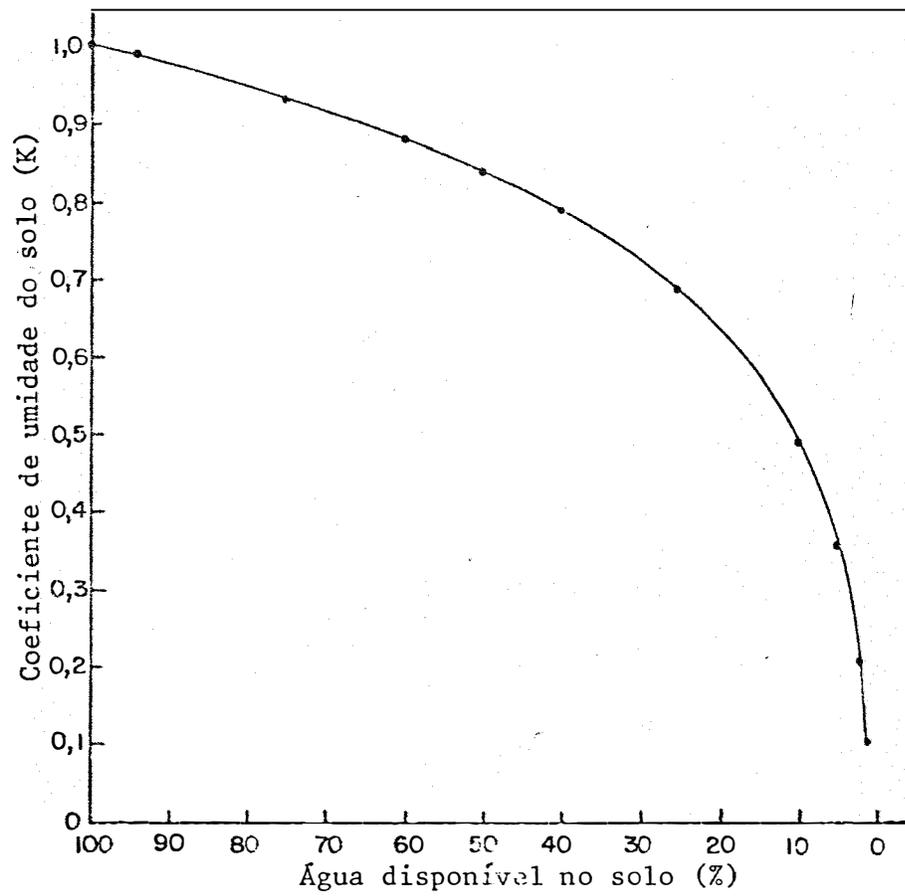


Figura 6 - Relação entre a disponibilidade de água e o coeficiente de umidade, para o solo com DTA = 74,6 mm até 40 cm de profundidade.

irrigação, ocupando os dois lados da mesma, para se ter duas repetições.

A disponibilidade total (DTA) e atual (DAA) de água no solo foram determinadas mediante as seguintes expressões:

$$DTA = \frac{(CC - PMP)}{10} \times dg \times z \dots\dots\dots (6)$$

em que, CC = teor de água do solo na capacidade de campo, % em peso;

PMP = teor de água no solo no ponto de murcha permanente, % em peso;

dg = densidade global, em  $g.cm^{-3}$  ;

z = profundidade efetiva das raízes, em cm;

DTA = Disponibilidade total de água do solo, em mm .

$$DAA = \frac{(\theta - PMP)}{10} \times dg \times z \dots\dots\dots (7)$$

em que,  $\theta$  = teor atual de água no solo, % em peso;

DAA= disponibilidade atual de água no solo, mm .

### 3.7. OBSERVAÇÕES FENOLÓGICAS

Os critérios utilizados foram aqueles descritos por PORTES (1981) e SILVA (1981) e utilizaram-se todas as parcelas de um único bloco experimental

#### 3.7.1. DATA DA EMERGÊNCIA

Considerou-se como sendo a data na qual emergiram 90% das plantulas ( $67 \text{ plantulas}/m^2$ ), e seus cotilédones encontravam-se acima da superfície do solo. A contagem das plantulas foi realizada em uma área de  $1m^2$  .

### 3.7.2. DATA DA FLORAÇÃO

Data na qual 50% das plantas, em uma população contida em 1m<sup>2</sup> de cada subparcela, apresentaram, pelo menos, uma flor aberta por planta. Os outros 50% não apresentaram flores.

### 3.7.3. DATA DO INÍCIO DO ENCHIMENTO DAS VAGENS

Data na qual 50% das vagens, em uma população de 10 plantas, apresentaram sementes em crescimento, as quais foram detectadas através do tato, ao longo da vagem.

### 3.7.4. DATA DO INÍCIO DA MATURAÇÃO

Data na qual 90% das vagens, em uma população de 10 plantas, sofreram mudança na coloração, de verde para amarelo-rosado. Nesta etapa, considerou-se praticamente concluído o enchimento das vagens. Neste ponto já haviam algumas vagens secas.

### 3.7.5. DATA DA MATURAÇÃO DE COLHEITA

Data na qual o grau de umidade do feijão estava entre 15 e 18%.

### 3.8. PRODUÇÃO E COMPONENTES DA PRODUÇÃO

#### 3.8.1. RENDIMENTO DE GRÃOS

O rendimento de grãos foi determinado para cada subparcela, de 13,12m<sup>2</sup>. Para facilidade, a colheita foi realizada aos 97 dias após a semeadura, quando todas as subparcelas já haviam atingido a maturação de colheita (08/06/82).

A trilha foi efetuada manualmente. Após o peneiramento, para remover os resíduos, pesou-se a colheita de cada subparcela. Determinou-se o grau de umidade dos grãos utilizando-se duas amostras de 30 gramas, para cada subparcela, colocando-as em estufa a 100°C por um período de 72 horas. Após retiradas da estufa, estas amostras foram levadas a um dessecador até atingir a temperatura ambiente e então pesadas. A porcentagem de água em base úmida foi obtida pela relação:

$$U = \frac{P_a}{P_i} \times 100 \dots\dots\dots (8)$$

em que, U = teor de água da amostra (%), em base úmida;

P<sub>a</sub> = peso da água evaporada, em gramas;

P<sub>i</sub> = peso inicial da amostra (30 gramas).

A correção do grau de umidade dos grãos para 13% foi efetuada baseando-se na metodologia apresentada na Revista Brasileira de Armazenamento (ANÔNIMO, 1976), utilizando a seguinte expressão:

$$P_f = P_i \frac{(100 - U_i)}{(100 - U_f)} \dots\dots\dots (9)$$

em que, P<sub>f</sub> = peso final dos grãos, em Kg;

$P_i$  = peso inicial dos grãos, em Kg;

$U_i$  = teor inicial de água (%), em base úmida;

$U_f$  = teor final de água (%), em base seca:

### 3.8.2. NÚMERO DE VAGENS POR PLANTA

Utilizaram-se as vagens de 10 plantas selecionadas ao acaso em cada subparcela e procedeu-se a contagem. O número de vagens obtido foi dividido pelo número de plantas.

### 3.8.3. NÚMERO DE GRÃOS POR VAGEM

Das vagens da amostra de 10 plantas, tomaram-se 20 vagens ao acaso. O número de grãos por vagem foi determinado pela divisão do número de grãos pelo número de vagens.

### 3.8.4. PESO DE 100 GRÃOS

Foi obtido utilizando-se uma amostra de cada subparcela. Tomaram-se 8 repetições de 100 grãos e em seguida pesou-se cada repetição. Posteriormente o peso foi corrigido para a base de 13% de umidade. Calcularam-se a variância, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos valores obtidos na pesagem, da seguinte forma:

$$\text{Variância} = \frac{n (\sum x^2) - (\sum x)^2}{n (n - 1)} \dots\dots\dots (10)$$

em que,  $x$  = peso de cada repetição de 100 grãos ;

$n$  = número de repetições.

$$\text{Desvio padrão} = \sqrt{\text{variância}} \dots\dots\dots (11)$$

$$\text{Coeficiente de variação} = \frac{s}{\bar{x}} \dots\dots\dots (12)$$

em que, s = desvio padrão;

$\bar{x}$  = peso médio de 100 grãos

Quando o coeficiente de variação excedia a 4 , repetiam-se as contagens e pesagens.

### 3.9. EFICIÊNCIA DE USO DE ÁGUA (E U.A.)

É definido como sendo a relação entre o rendimento de grãos e a água consumida no processo de evapotranspiração (BEGG e TURNER, 1976). Neste trabalho, utilizou-se a relação apresentada por HILLEL (1972) :

$$\text{EUA} = \frac{Y}{V + T + E + D} \dots\dots\dots (13)$$

em que, Y = rendimento de grãos, Kg.ha<sup>-1</sup> ;

V = água para o crescimento, mm;

T = água para transpiração;

E = água evaporada da superfície do solo, mm;

D = água perdida por drenagem, mm.

O denominador da equação (13) foi representado pela lâmina total de água aplicada.

### 3.10. FUNÇÃO DE PRODUÇÃO

A produção de uma cultura depende de muitos fatores variáveis. De uma forma geral, a produção pode expressar-se mediante uma função da forma da equação (14), denominada por função de produção :

$$Y = f( x_1 , x_2 , \dots , x_j , \dots , x_m ) \dots\dots\dots (14)$$

em que, Y = produção do cultivo;

$x_j$  = fator variável que afeta a produção,

Estas funções de produção são relações empíricas, geralmente obtidas mediante uma análise de regressão entre uma variável dependente e uma ou várias variáveis independentes, segundo um determinado modelo que pretende representar um sistema de produção.

#### 3.10.1. FUNÇÃO DE PRODUÇÃO DE FEIJÃO TENDO A ÁGUA COMO COMO FATOR VARIÁVEL

O modelo utilizado foi um polinômio do segundo grau, conforme equação (15):

$$\hat{Y} = f(W) = \hat{a} + \hat{b}W + \hat{c}W^2 \dots\dots\dots (15)$$

em que ,  $\hat{Y}$  = estimativa do rendimento de grãos, Kg.ha<sup>-1</sup> ;

W = lâmina total de água aplicada, mm;

$\hat{a}$ ,  $\hat{b}$  e  $\hat{c}$  = parâmetros da equação.

Sob considerações econômicas da irrigação para um determinado sistema de produção, PERI *et alii* (1979) introduziram o conceito de lâmina ótima econômica, através do qual a lâmina a ser aplicada deveria ser

determinada em função da máxima receita líquida obtida com uma dada irrigação.

A receita líquida foi expressa pela função:

$$L(W) = P_y \cdot \hat{Y} - P_w \cdot W - C \dots\dots\dots (16)$$

em que,  $L(W)$  = receita líquida;

$P_y$  = preço do produto (grãos);

$P_w$  = preço do fator (água);

$C$  = custo dos fatores fixos.

O preço do produto,  $P_y$ , representa o preço de venda do produto na fazenda, por unidade de produção. O preço da água,  $P_w$ , representa o custo do volume unitário de água, acrescido do custo da energia utilizada no bombeamento, da depreciação do sistema de irrigação e dos custos de operação e manutenção deste sistema. Estes preços devem ser reajustados para o momento em que o produto é colhido.

Uma vez que  $\hat{Y}$  é expresso em  $\text{Kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  e  $W$  em mm, se o preço da água for dado por  $\text{m}^3$ , para ser coerente no sistema de unidades, deve-se multiplicá-lo por 10. Por exemplo, se  $1\text{m}^3$  de água custa 102 centavos de cruzados, o valor de  $P_w$  a ser utilizado deverá ser de Cz\$1,02 por milímetro de água distribuído em 1ha.

Sob a hipótese de que  $L(W)$  tem um máximo e que a água é o único fator variável, tem-se:

$$\frac{dL(W)}{dW} = \frac{d\hat{Y}}{dW} \cdot P_y - P_w = 0 \dots\dots\dots (17)$$

em que,  $\frac{d\hat{Y}}{dW} \cdot P_y$  = valor da produtividade marginal do fator  $W$ ;

$\frac{d\hat{Y}}{dW}$  = produtividade física marginal do fator W.

A produtividade física marginal (PFM) do fator variável é o aumento no produto físico total decorrente do emprego de uma unidade adicional do fator variável.

Reorganizando-se a equação (17), tem-se:

$$\frac{d\hat{Y}}{dW} = \frac{P_w}{P_y} \dots\dots\dots (18)$$

A equação (18) mostra que a receita líquida se maximiza (considerando a água como único fator variável) se a derivada primeira do rendimento em relação à lâmina total de água (produto físico marginal da água) for igual à relação de preços entre fator e produto.

Assim, da equação (15) vem:

$$\frac{d\hat{Y}}{dW} = \hat{b} + 2\hat{c}W = \frac{P_w}{P_y} \dots\dots\dots (19)$$

Da equação (19), obtém-se a lâmina ótima econômica de água ( $W^*$ ), para uma condição específica.

### 3.10.2. FUNÇÃO DE PRODUÇÃO DE FEIJÃO TENDO O NITROGENIO COMO FATOR VARIÁVEL

A estimativa do rendimento de grãos, em função das doses de nitrogênio, foi expressa por uma equação do tipo:

$$\hat{Y} = f(N) = \hat{a} + \hat{b}N + \hat{c}N^2 \dots\dots\dots (20)$$

em que, N = dose de nitrogênio, Kg.ha<sup>-1</sup> ;

$\hat{a}$ ,  $\hat{b}$  e  $\hat{c}$  = parâmetros da equação.

A receita líquida, foi expressa pela função:

$$L(N) = P_y \cdot \hat{Y} - P_n \cdot N - C \dots\dots\dots (21)$$

em que,  $P_n$  = preço do quilo de nitrogênio aplicado no solo e corrigido para a época da colheita;

$N$  = dose de nitrogênio,  $\text{Kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  .

Sob a hipótese de que  $L(N)$  tem um máximo e que o nitrogênio é o único fator variável, tem-se:

$$\frac{d\hat{Y}}{dN} = \frac{P_n}{P_y} \dots\dots\dots (22)$$

Assim, da equação (20) ,obtem-se :

$$\frac{d\hat{Y}}{dN} = \hat{b} + 2\hat{c}N = \frac{P_n}{P_y} \dots\dots\dots (23)$$

Da equação (23), obtem-se a dose ótima econômica de nitrogênio ( $N^*$ ) , para uma condição específica.

### 3.10.3. SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Estudou-se o rendimento de grãos,  $\hat{Y}$  , como uma função de dois fatores: água ( $W$ ) e nitrogênio ( $N$ ), ou seja:

$$\hat{Y} = f( W, N ) \dots\dots\dots (24)$$

A relação representada pela equação (24) é denominada função ou superfície de resposta. Sua representação polinomial, conforme apresentada e discutida por BOX (1954) e HAXEM e HEADY (1978) , é a que segue:

$$\hat{Y} = \hat{b}_0 + \hat{b}_1W + \hat{b}_2N + \hat{b}_{11}W^2 + \hat{b}_{22}N^2 + \hat{b}_{12}WN \dots\dots\dots (25)$$

Os níveis ótimos econômicos dos fatores W e N, foram definidos como aqueles que conduziram ao rendimento que traduziu a receita líquida máxima.

A receita líquida foi definida pela função:

$$L(W, N) = P_y \cdot \hat{Y} - (P_w \cdot W + P_n \cdot N + C) \dots\dots\dots (26)$$

em que,  $P_y$  = preço do produto na fazenda;

$\hat{Y}$  = estimativa da produção de grãos, pela equação (25);

$P_w$  = preço da lâmina unitária de água;

$P_n$  = preço da dose unitária de nitrogênio;

W = lâmina total de água aplicada;

N = dose de nitrogênio aplicada;

C = despesas fixas.

Uma condição necessária para que se tenha um máximo da função  $L(W, N)$  é que  $dL = 0$  e  $d^2L < 0$ . Conseqüentemente, tem-se:

$$\frac{\partial \hat{Y}}{\partial W} = \frac{P_w}{P_y} \dots\dots\dots (27)$$

$$\frac{\partial \hat{Y}}{\partial N} = \frac{P_n}{P_y} \dots\dots\dots (28)$$

em que,  $P_w/P_y$  e  $P_n/P_y$  representam relações entre o preço de custo da água e o preço de venda do produto e entre o preço de custo do nitrogênio e o preço de venda do produto, respectivamente.

Obtem-se, pois:

$$\begin{cases} 2\hat{b}_{11}W + \hat{b}_{12}N = \frac{P_w}{P_y} - \hat{b}_1 \\ \hat{b}_{12}W + 2\hat{b}_{22}N = \frac{P_n}{P_y} - \hat{b}_2 \end{cases} \dots\dots\dots (29)$$

A solução do sistema de equações (29) fornece os valores de  $W^*$  e  $N^*$ , respectivamente de  $W$  e  $N$  que podem conduzir à receita líquida máxima.

De acordo com CAMPOS (1967), uma condição necessária para que  $L(W, N)$  tenha um máximo relativo no ponto  $(W^*, N^*)$  é que os coeficientes dos termos quadráticos ( $\hat{b}_{11}$  e  $\hat{b}_{22}$ ) de  $\hat{Y}$  sejam todos negativos.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. DURAÇÃO DOS ESTÁGIOS FENOLÓGICOS DA CULTURA

A Figura 7 caracteriza a duração dos estágios fenológicos da cultura em função dos tratamentos utilizados. Observou-se que em todas as doses de nitrogênio, a floração iniciou-se mais cedo quando foi aplicada uma lâmina total de água de 420,0 mm. A dose de nitrogênio que permitiu a floração mais precoce foi de  $60\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  (aos 29 dias após a semeadura). Este tratamento ( $W_3N_2$ ) proporcionou um ciclo da cultura de 90 dias, dos quais 27 dias foram gastos no enchimento da vagens, caracterizando-se como um dos maiores estágios de enchimento das vagens. As maiores doses de nitrogênio proporcionaram ciclos da cultura mais longos, graças a um relativo atraso no início da floração. Pequenas lâminas totais de água também provocaram um atraso no início da floração, o mesmo ocorrendo com grandes lâminas de

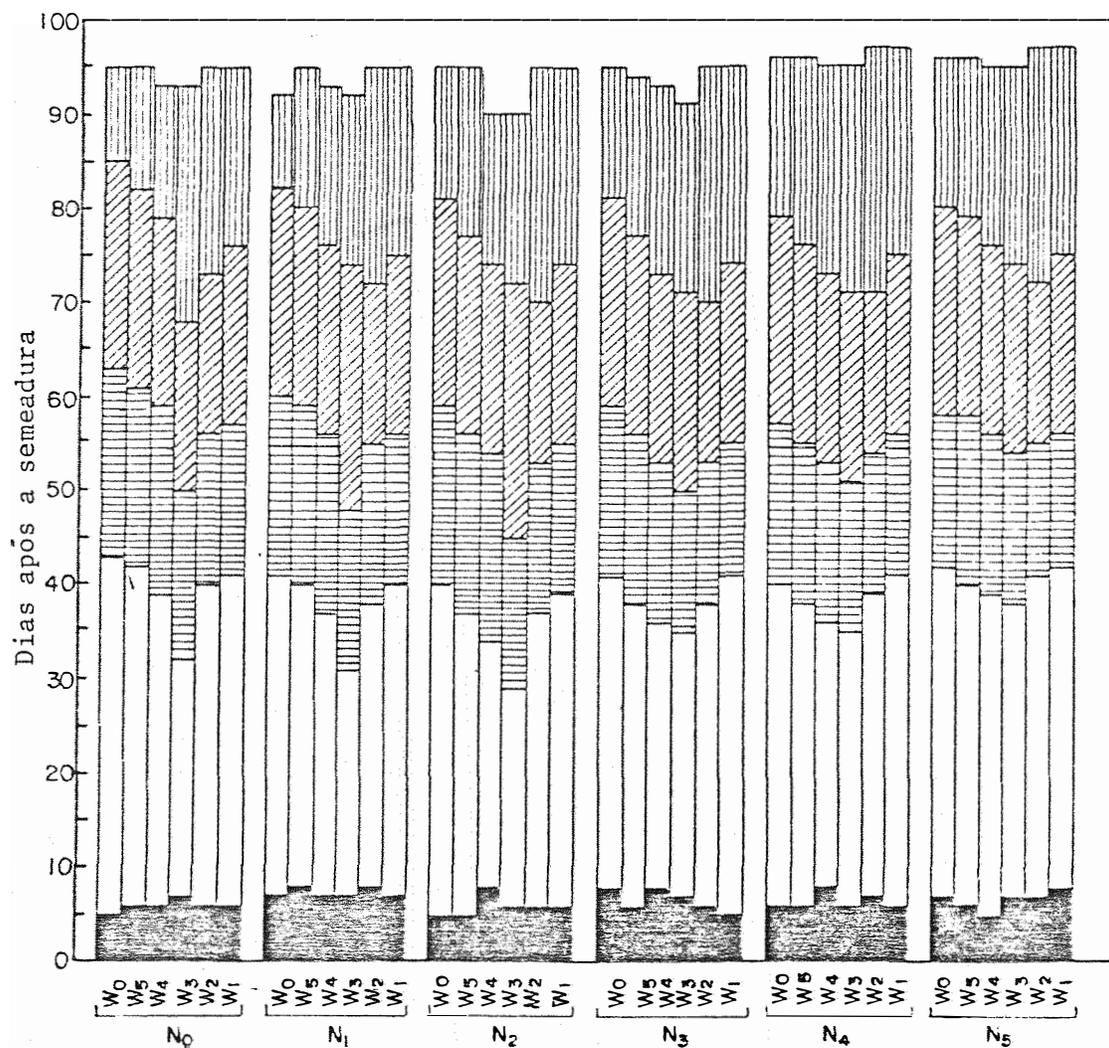


Figura 7 - Caracterização dos estágios fenológicos da cultura nos diversos tratamentos utilizados. ■ - Semeadura à emergência; □ - emergência ao início da floração; ▨ - início da floração ao início do enchimento de grãos; ▩ - início do enchimento de grãos ao início da maturação; ▨ - início da maturação ao final da maturação.

totais de água. Todavia, os tratamentos que não receberam irrigação foram os que mais atrasaram o início da maturação mas não foram os que conduziram a maiores ciclos da cultura, discordando dos resultados encontrados por AZEVEDO (1984) que observou um atraso de 17 dias na maturação para o tratamento não irrigado. Por outro lado, VIEIRA (1984) observou uma redução do ciclo do feijoeiro, em consequência da aplicação do tratamento de estresse hídrico durante o estágio compreendido entre o início de formação de grãos e a maturação fisiológica. O estresse hídrico provocou uma redução neste estágio .

#### 4.2. MANEJO DA IRRIGAÇÃO

O manejo da irrigação foi realizado de forma a aplicar, logo após a semeadura, uma lâmina de água uniforme de 33,0mm , em todas as parcelas, de modo a garantir a germinação. Nos sete primeiros dias após a semeadura ocorreram 10,0mm de precipitação pluvial.

O controle das lâminas de irrigação diferenciadas iniciou no 7º dia após a semeadura, sendo aplicadas através de irrigação lâminas totais de água de 0 (zero); 76,0 ; 193,0 ; 315,0 ; 429,0 e 516,0 mm , perfazendo um total de 10 irrigações diferenciadas. Computando a precipitação acumulada durante o período experimental (72,0mm) e a lâmina de água distribuída uniformemente por irrigação (33,0mm) logo após a semeadura, as lâminas totais de água aplicadas foram: 105,0 ; 181,0 ; 298,0 ; 420,0 ; 534,0 e 621,0mm respectivamente nas parcelas  $W_0$  ;  $W_5$  ;  $W_4$  ;  $W_3$  ;  $W_2$  e  $W_1$ .

O valor médio da frequência de irrigação foi de 8 dias. Durante o mesmo período (até os 80 dias após a semeadura) a evaporação acumulada no tanque

"Classe A" foi de 514,0 mm.

Na Tabela 4, encontram-se os valores médios das lâminas de irrigação ( $w_i$ ), da evaporação acumulada no tanque "Classe A" (ECA), da precipitação acumulada (PREC), da temperatura (TEMP) e da umidade relativa (UR). Observa-se que o maior intervalo entre duas irrigações sucessivas (menor frequência de irrigação) foi de 11 dias e ocorreu entre o 52º e 63º dias após a semeadura e entre o 69º e 80º dias. Nestes períodos ocorreram, respectivamente, temperaturas de 22,8°C e 24,2°C, umidades relativas de 74,9 e 66,6% e precipitações de 16,0 e 0 (zero)mm. Estes valores correspondem, dentro do período experimental, àqueles menos favoráveis ao consumo de água. Por outro lado, condições relativamente mais favoráveis ao consumo de água ocorreram entre o 31º e 37º dias após a semeadura e entre 63º e 69º dias, com um intervalo de 6 dias entre duas irrigações sucessivas. Este fato, vem confirmar a relação funcional entre evaporação, temperatura e umidade relativa, entre outros fatores meteorológicos não mensurados neste trabalho, conforme discutidos por DENMEAD e SHAW (1962), RITCHIE (1973) e WRIGHT (1982).

Observa-se na Tabela 4 que a precipitação pluviométrica acumulada, durante o período experimental foi muito baixa, correspondendo a 14% da evaporação acumulada no tanque "Classe A".

Tabela 4 - Lâminas totais de água aplicadas em cada parcela, frequência de irrigação e valores de algumas variáveis climáticas durante a fase experimental.

Dias após semeadura	Datas	TEMP média no período (°C)	UR no período (%)	PREC no período (mm)	ECA no período (mm)	Lâminas de irrigação (mm)					Frequência de irrigação (dias)	
						w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	w <sub>3</sub>	w <sub>4</sub>	w <sub>5</sub>		w <sub>0</sub>
0	03/03	27,8	79,0			33,0	33,0	33,0	33,0	33,0	33,0	7,0
07	10/03	26,3	73,3	10,0	53,0	55,0	44,0	35,0	18,0	6,0	0,0	7,0
14	17/03	25,9	68,6	17,0	52,0	53,0	43,0	33,0	19,0	7,0	0,0	8,0
22	25/03	24,8	72,2	1,0	54,0	54,0	46,0	30,0	17,0	5,0	0,0	9,0
31	03/04	27,5	60,2	19,0	49,0	51,0	42,0	30,0	20,0	9,0	0,0	6,0
37	09/04	24,7	62,9	1,0	50,0	48,0	42,0	34,0	18,0	7,0	0,0	8,0
45	17/04	26,6	57,5	6,0	49,0	50,0	40,0	32,0	19,0	8,0	0,0	7,0
52	24/04	22,8	74,9	2,0	52,0	53,0	43,0	30,0	22,0	10,0	0,0	11,0
63	05/05	25,1	63,6	16,0	52,0	54,0	45,0	31,0	19,0	9,0	0,0	6,0
69	11/05	24,2	66,6	0,0	52,0	49,0	43,0	29,0	20,0	8,0	0,0	11,0
80	22/05			0,0	51,0	49,0	41,0	31,0	21,0	7,0	0,0	
TOTALS				72,0	514,0	549,0	462,0	348,0	226,0	109,0	33,0	
W <sub>i</sub> = w <sub>i</sub> + PREC						621,0	534,0	420,0	298,0	181,0	105,0	
(w <sub>i</sub> + PREC)/ECA						1,21	1,04	0,82	0,58	0,35	0,20	

### 4.3. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DO FEIJOEIRO

A evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) e a evapotranspiração máxima ( $ET_m$ ) do feijoeiro foram estimadas a partir de dados de evaporação obtidos no tanque "Classe A" (ECA), utilizando coeficientes de conversão do tanque ( $K_p$ ) e coeficientes de cultura ( $K_c$ ) sugeridos pela FAO (DOOREMBOS e KASSAN, 1979).

Durante todo o ciclo da cultura foram estimados  $ET_o$  (equação 2),  $ET_m$  (equação 3) e  $ET_a$  (equação 4), sendo que para estimar  $ET_a$  utilizou-se um coeficiente de umidade do solo calculado pela equação 5. Para os dias nos quais não se determinou o grau de umidade do solo, utilizaram-se valores de  $K$  interpolados da Figura 8. Os valores acumulados de  $ET_a$  estão apresentados na Figura 9. A Figura 10 mostra a variação diária dos valores de ECA,  $ET_o$ ,  $ET_m$  e  $K_c$ .

As relações  $ET_a/ECA$  no período, foram : 0,567 ; 0,518 ; 0,506 ; 0,494 ; 0,442 e 0,118 , respectivamente para  $W_1N_3$  ,  $W_2N_3$  ,  $W_3N_3$  ,  $W_4N_3$  ,  $W_5N_3$  e  $W_0N_3$  .

O déficit de água no solo e o conseqüente déficit na planta, tem um acentuado efeito sobre a evapotranspiração da cultura e sobre seu rendimento , conforme relatado por STEWART (1972), HILLEL e GURON (1973), HOWELL e HILER (1975) e BEGG e TURNER (1976), entre outros. O déficit de água na planta pode ser quantificado mediante a relação  $ET_a/ET_m$  . Quando as necessidades de água da cultura são atendidas plenamente, tem-se  $ET_a = ET_m$  . Quando o fornecimento de água é insufici

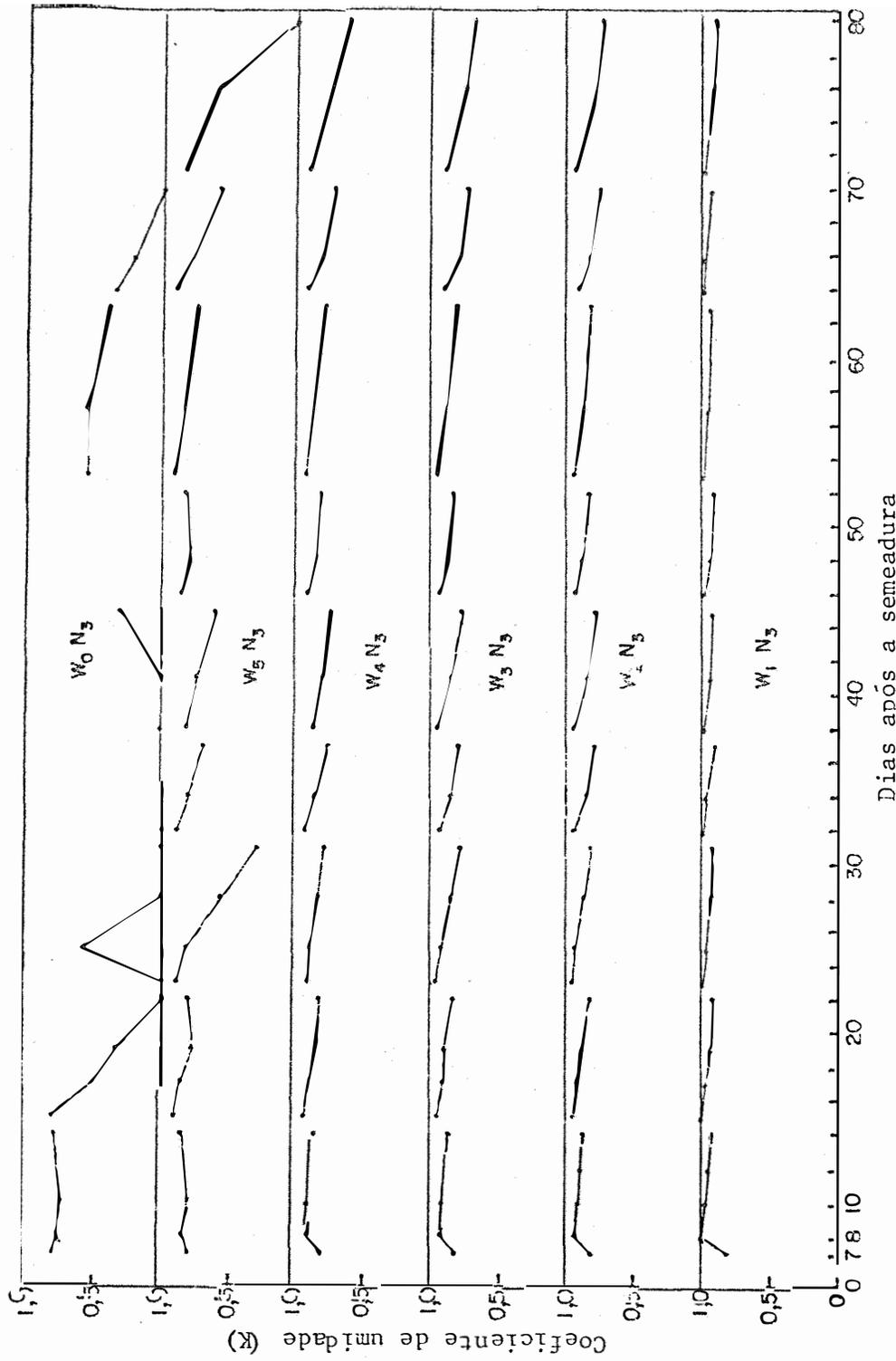


Figura 8 - Variação dos valores de K ao longo do ciclo da cultura, para as diversas lâminas totais de água dentro da dose de nitrogênio de  $90\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

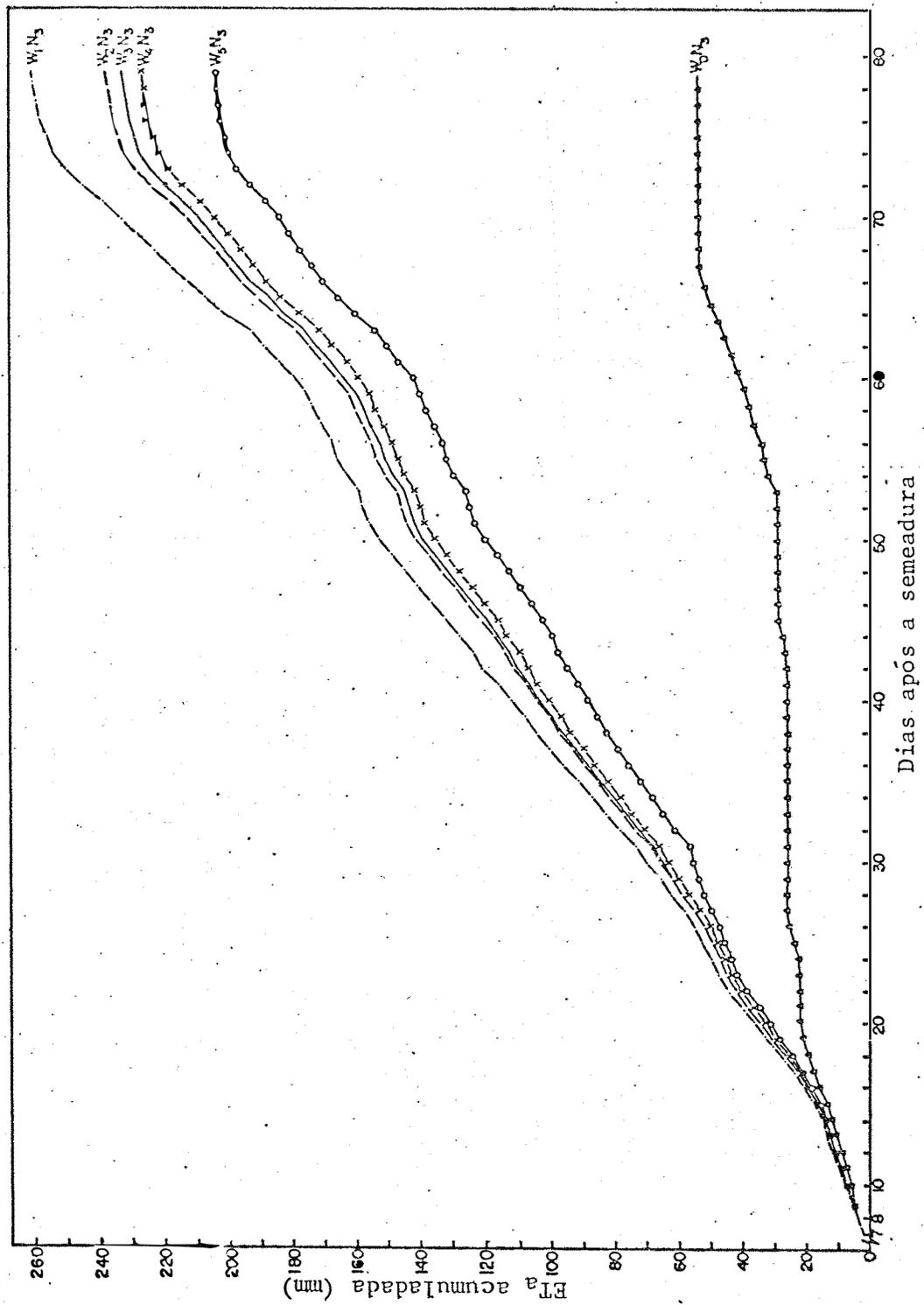


Figura 9 - Valores acumulados de ETa para o feijão, em mm, para as diversas lâminas totais de água, dentro da dose de nitrogênio de 90kg.ha<sup>-1</sup>.

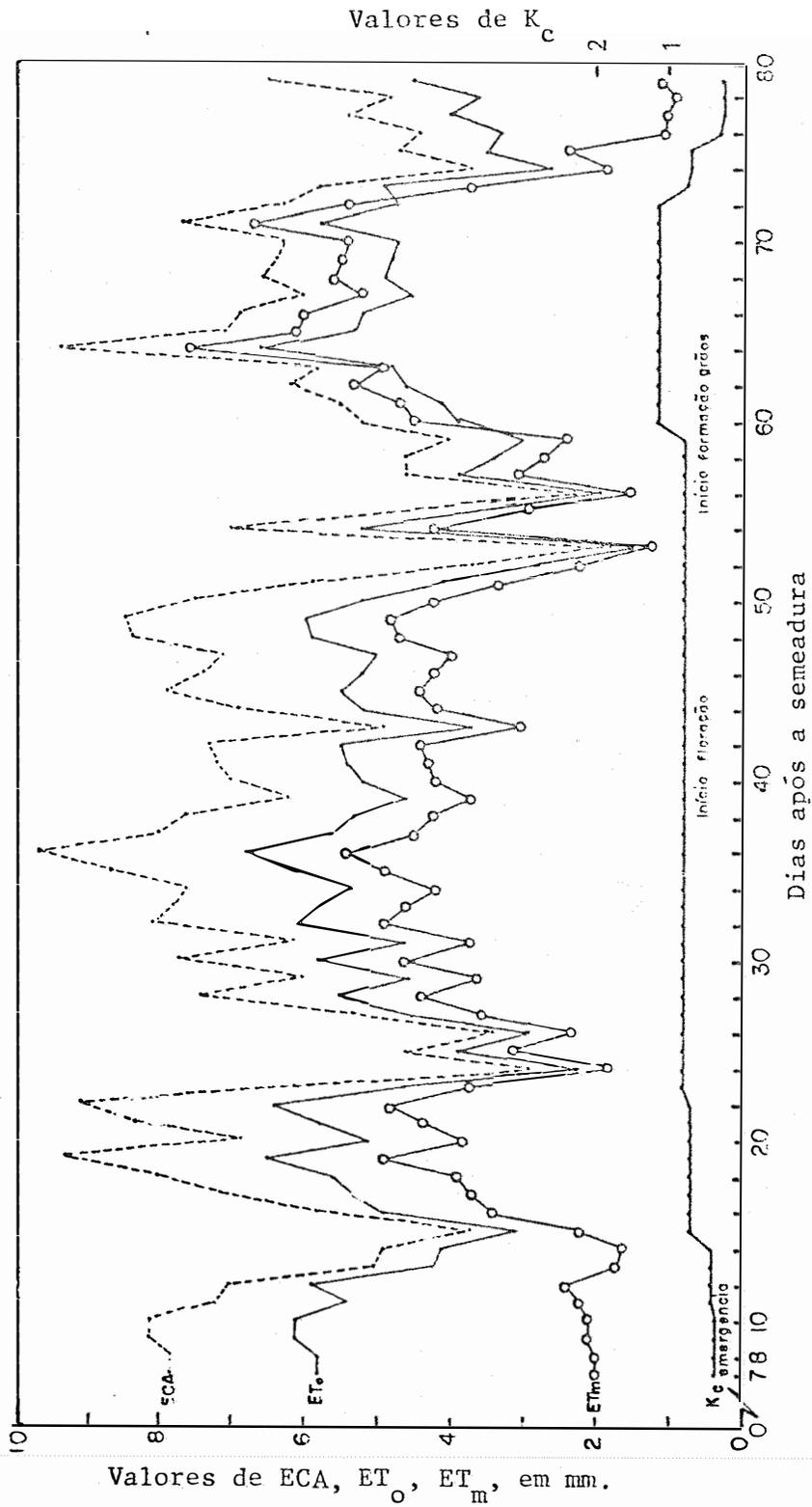


Figura 10 - Valores diários de ECA, ET<sub>o</sub>, ET<sub>m</sub> e K<sub>c</sub>, durante o ciclo da cultura.

te ,  $ET_a < ET_m$  . Para o trabalho em questão, os valores médios da relação  $ET_a/ET_m$  , denominada de evapotranspiração relativa , foram : 0,971 ; 0,889 ; 0,867 ; 0,846 ; 0,758 e 0,201 , respectivamente para  $W_1N_3$ ;  $W_2N_3$  ,  $W_3N_3$  ,  $W_4N_3$  ,  $W_5N_3$  , e  $W_0N_3$  .

A Figura 11 mostra a relação entre  $ET_a/ET_m$  e o rendimento relativo de grãos para as lâminas de água  $W_i$  dentro da dose de nitrogênio  $N_3$ . Observa-se que a relação entre rendimento relativo e evapotranspiração relativa não foi linear como muitas vezes é assumido nos modelos ( HILLEL e GURON, 1973 e HANKS , 1974). O máximo rendimento relativo não foi atingido para a máxima relação  $ET_a/ET_m$ , como proposto por HANKS (1974), embora não se verificou diferença significativa, com base no teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, entre os rendimentos médios de 2499,1 e 2341,2  $Kg.ha^{-1}$  obtidos com lâminas totais de água de 534,0 e 621,0 mm , respectivamente. Deve-se ressaltar que os valores de rendimento relativo foram expressos em relação ao rendimento máximo de 2499,1  $Kg.ha^{-1}$  do tratamento com lâmina total de água de 534,0 mm.

O tratamento  $W_1N_3$  apresentou o maior valor de  $ET_a$  acumulada (261,2mm), uma vez que, neste tratamento, o teor de água no solo foi sempre superior aos demais, proporcionando uma relação  $ET_a/ET_m$  de 0,971. Nestas condições, o consumo de água pela cultura foi máximo. Tal fato tem suporte em inúmeros trabalhos, entre os quais destacam-se os desenvolvidos por LEMON *et alii* (1957), FRITSCHEN e SHAW (1961), DENMEAD e SHAW (1962) , EAGLEMAN e DECKER (1965), BLACK *et alii* (1970) e YANG e De JONG (1972) . Entretanto, neste tratamento mais úmido, o rendimento de grãos não foi máximo, discordando, neste aspecto, das generalizações de HILLEL e GURON (1973) e HANKS (1974).

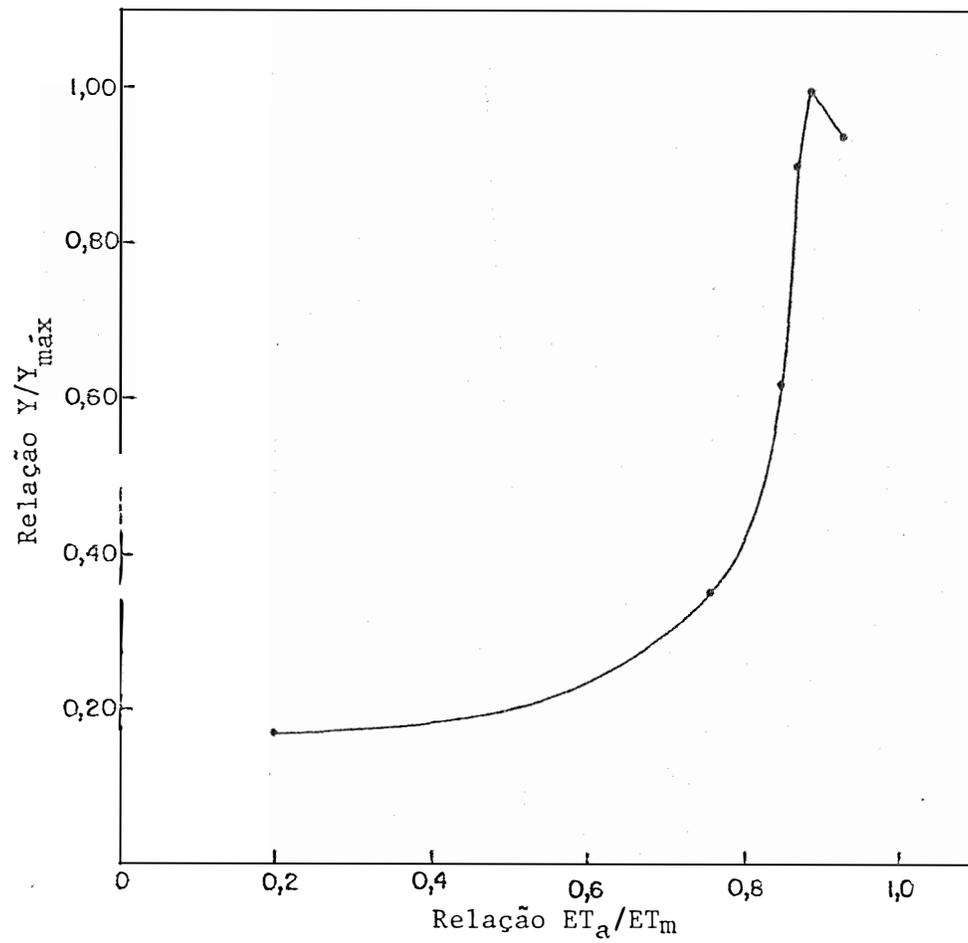


Figura 11 - Relação entre o rendimento relativo de grãos ( $Y/Y_{\max}$ ) e a evapotranspiração relativa ( $ET_a/ET_m$ ).

Estabeleceram-se três fases distintas durante o ciclo da cultura, sendo a primeira do 7º ao 38º dia após a semeadura (emergência ao início da floração), o segundo do 38º ao 55º dia (início da floração ao início da formação de grãos) e o terceiro do 55º ao 75º dia (início da formação de grãos até quando 90% das vagens sofreram mudança na coloração, de verde para amarelo-rosado). Nestas três fases foram observados diferentes consumos de água pela cultura (Tabela 5). Salienda-se, contudo, que se deve concordar com a assertiva de NIX e FITSPATRICK (1969) de que a divisão em estágios de uma cultura seja arbitrária.

Tabela 5 - Valores médios de  $ET_a$  ( $\text{mm.dia}^{-1}$ ), em três estágios do ciclo da cultura em função das lâminas totais de água dentro da dose de nitrogênio de  $90\text{kg.ha}^{-1}$  (Ilha Solteira, SP, 1982).

Dias após semeadura	Tratamentos					
	$W_1N_3$	$W_2N_3$	$W_3N_3$	$W_4N_3$	$W_5N_3$	$W_0N_3$
7 - 38	3,3	3,1	3,0	2,9	2,6	0,8
38 - 55	3,6	3,3	3,2	3,1	2,9	0,4
55 - 75	4,4	4,0	3,9	3,8	3,5	1,0
Média	3,8	3,5	3,4	3,3	3,0	0,7

O maior consumo de água, em todas as parcelas, foram verificados durante a formação de grãos. Consumos intermediários ocorreram no período compreendido entre o início da floração e o início da formação de grãos. Os valores médios de  $ET_a$ , do 7º ao 75º dia após a semeadura, foram

de 3,8; 3,5; 3,4; 3,3; 3,0 e 0,7 mm.dia<sup>-1</sup>, para as parcelas W<sub>1</sub>N<sub>3</sub>, W<sub>2</sub>N<sub>3</sub>, W<sub>3</sub>N<sub>3</sub>, W<sub>4</sub>N<sub>3</sub>, W<sub>5</sub>N<sub>3</sub> e W<sub>0</sub>N<sub>3</sub>, respectivamente. Os menores consumos de água ocorreram na fase compreendida entre a germinação e o início do florescimento e os maiores consumos do início da formação de grãos até o início da maturação. Estes resultados corroboram as generalizações de TOSELO (1963), que afirma ser o feijoeiro mais exigente em água no período compreendido entre o florescimento e o estado leitoso dos grãos. Entretanto, GUIMARÃES *et alii* (1982), utilizando microlisímetros na determinação da ET<sub>a</sub> do feijoeiro, em Goiânia, verificaram maiores gastos de água durante o florescimento. SILVEIRA e STONE (1979), em trabalho realizado em Goiânia, num Latossolo Vermelho-Amarelo, utilizando o método do balanço de água no solo, encontraram maiores valores de ET<sub>a</sub> para o feijão (3,2 mm.dia<sup>-1</sup>) na fase compreendida entre a germinação e o início da floração e durante a floração. REICHARDT *et alii* (1974), em experimento realizado em Piracicaba, encontrou um maior valor de ET<sub>a</sub> para o feijão durante a fase de pleno florescimento (5,3 mm.dia<sup>-1</sup>), seguido da fase de formação dos grãos (4,6 mm.dia<sup>-1</sup>). LUCHIARI Jr. (1978), em Piracicaba, encontrou para o feijão, uma ET<sub>a</sub> máxima (3,4 mm.dia<sup>-1</sup>) durante o florescimento. É importante observar que as variações nos resultados dos diferentes pesquisadores, justificam-se em função do método utilizado na determinação de ET<sub>a</sub>, do estado planta, do estado da água no sistema solo-planta-atmosfera e dos fatores meteorológicos.

Com o propósito de dar algumas informações úteis para o manejo da água na cultura do feijão, dada a carência de informações na região que se conduziu o experimento, mas respeitando-se as condições experimentais, apresentam-se na Figura 12 os valores de ET<sub>a</sub> em função do teor de água no solo, da água disponível e da evapotranspiração máxima. Por exem

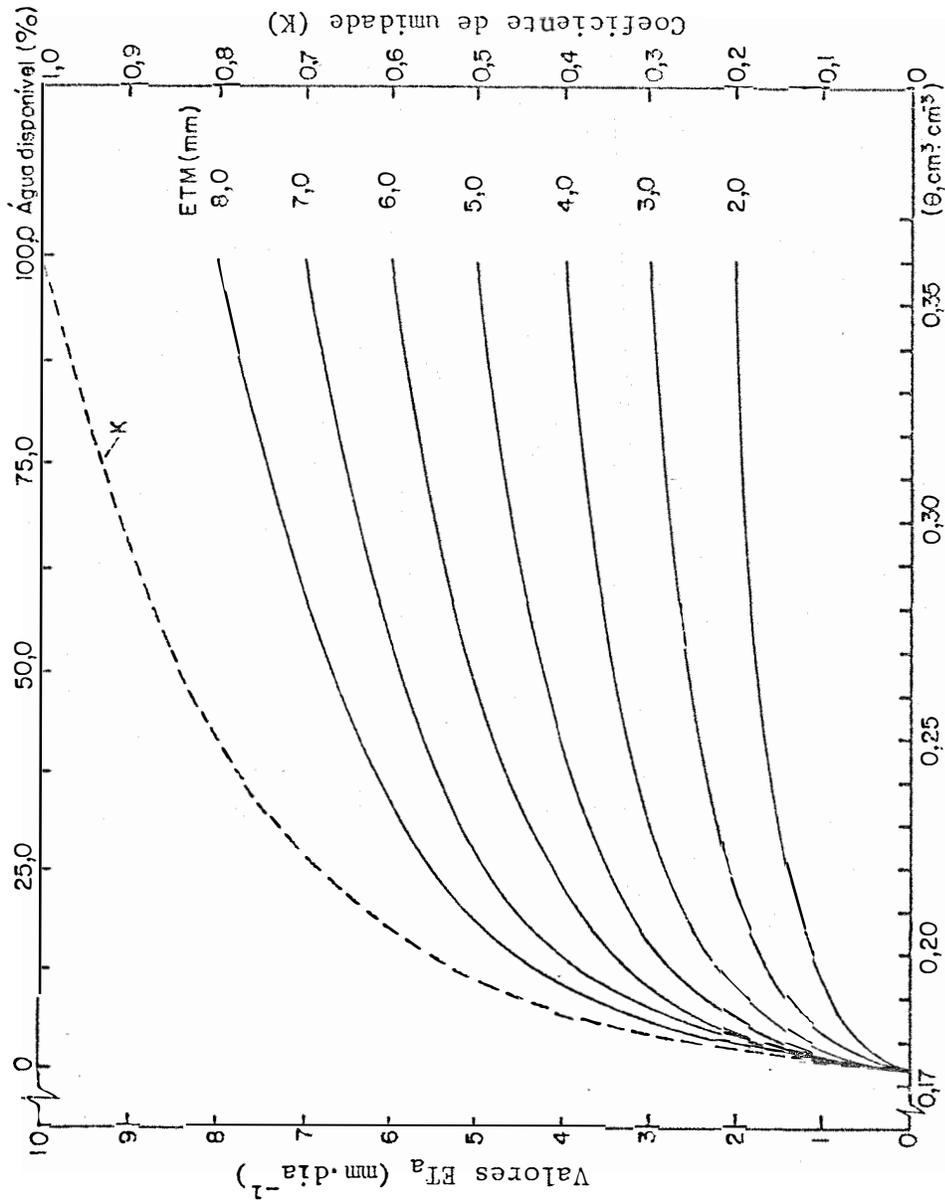


Figura 12 - Valores de  $ET_a$  (mm.dia<sup>-1</sup>) em função do teor de água no solo ( $cm^3 \cdot cm^{-3}$ ), da água disponível (%) e da  $ET_m$  (mm).

plo, quando o teor de água no solo atingir  $0,265 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  e  $ET_m$  for igual a  $5,0 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ , a  $ET_a$  será de  $4,2 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$  e tem-se no solo 50% de água disponível.

#### 4.4. RENDIMENTO DE GRÃOS

Os valores médios do rendimento de grãos, para os diferentes tratamentos, são apresentados na Tabela 6. Os resultados da análise de variância encontram-se resumidos na Tabela 7 e revelam efeito altamente significativo ( $\alpha=0,01$ ) para lâminas totais de água, doses de nitrogênio e interação destes fatores. A comparação entre as médias de rendimento foi realizada pelo teste de Tukey, a um nível de probabilidade de 5%.

AZEVEDO (1984), em experimento com feijão, cultivar carioca, no município de Piracicaba, utilizou quatro doses de nitrogênio (0; 30; 60 e  $90 \text{ Kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) e seis lâminas totais de água (320 ; 342; 364; 392 ; 417 e 431 mm) e não observou efeito significativo para interação destes fatores. Por outro lado, SILVA (1978), trabalhou com feijão-de-corda (*Vigna sinensis*, L. Savi), na região de Petrolina e encontrou efeito significativo para interação entre lâminas totais de água e doses de nitrogênio.

Os tratamentos  $W_2N_3$  e  $W_2N_4$  permitiram os maiores rendimentos, respectivamente  $2499,1$  e  $2397,7 \text{ Kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ , não diferindo estatisticamente entre si quando comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. Estes rendimentos podem ser considerados elevados quando comparados com aqueles obtidos por MAGALHÃES e MILLAR (1978), GARRIDO *et alii* (1979) e AZEVEDO (1984), revelando o alto potencial da região para a produção de feijão sob irrigação. Os menores rendimentos foram obtidos nos tratamentos não irrigados, dentro de todas as doses de nitrogênio, com uma média de  $391,5 \text{ Kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Este valor é inferior ao ren

Tabela 6 - Valores médios do rendimento de grãos de feijão ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), em função das lâminas totais de água e das doses de nitrogênio (Ilha Solteira, SP, 1982).

LÂMINAS TOTAIS DE ÁGUA (mm)	DOSES DE NITROGÊNIO ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ )				MÉDIAS		
	0	30	60	90		120	150
105	(C)341,2 a	(C) 352,8 a	(D) 425,5 a	(D) 432,6 a	(D) 441,1 a	(E) 352,8 a	(E) 391,5
181	(BC)494,1 b	(C) 637,1 ab	(C) 765,6 ab	(C) 865,2 a	(C) 834,4 a	(D) 729,4 ab	(D) 712,0
298	(A)843,3 c	(B)1233,7 b	(B)1421,5 ab	(B)1549,6 a	(B)1510,9 a	(C)1370,8 ab	(C)1321,6
420	(A)991,2 d	(A)1629,6 c	(A)1986,6 ab	(A)2242,8 a	(A)2175,6 ab	(AB)1944,6 b	(AB)1828,4
534	(A)983,7 d	(A)1538,3 c	(A)2269,5 ab	(A)2499,1 a	(A)2397,7 ab	(A)2146,7 b	(A)1972,5
621	(AB)882,5 e	(AB)1347,6 d	(A)1987,2 bc	(A)2341,2 a	(A)2117,6 ab	(B)1769,9 c	(B)1724,3
MÉDIAS	739,3 e	1123,2 d	1476,0 bc	1655,1 a	1580,0 ab	1295,7 c	1326,5

Obs. 1ª) Em cada série de médias na horizontal, os valores seguidos pela mesma letra minúscula, não diferem, significativamente, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

2ª) Em cada série de médias na vertical, os valores seguidos pela mesma letra maiúscula entre parêntesis, não diferem, significativamente, ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Tabela 7 - Resumo da análise de variância do rendimento de grãos.

CAUSAS DE VARIACÃO	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Blocos	3	2057,439	6856,813	0,212
Água (W)	5	49641723,788	9928344,758	306,755**
Resíduo A	15	485486,387	32365,759	
Parcelas	23	50147780,614		
Nitrogênio (N)	5	14020883,109	2804176,622	160,577**
Interação (WxN)	25	5543356,331	221814,253	12,702**
Resíduo B	90	1571686,003	17463,178	
Total	143	71285706,057		

C.V. para parcelas = 23,56%

C.V. para subparcelas = 13,96%

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade.

dimento médio ( $739,3 \text{ Kg.ha}^{-1}$ ) obtido dentro da dose 0(zero) de nitrogênio. Este fato, caracteriza a água como um fator altamente limitante na produção de grãos de feijão.

#### 4.4.1. EFEITO DAS LÂMINAS TOTAIS DE ÁGUA SOBRE O RENDIMENTO DE GRÃOS

Os valores médios dos rendimentos de grãos em função das lâminas totais de água, são apresentados na Figura 13, onde se verifica que

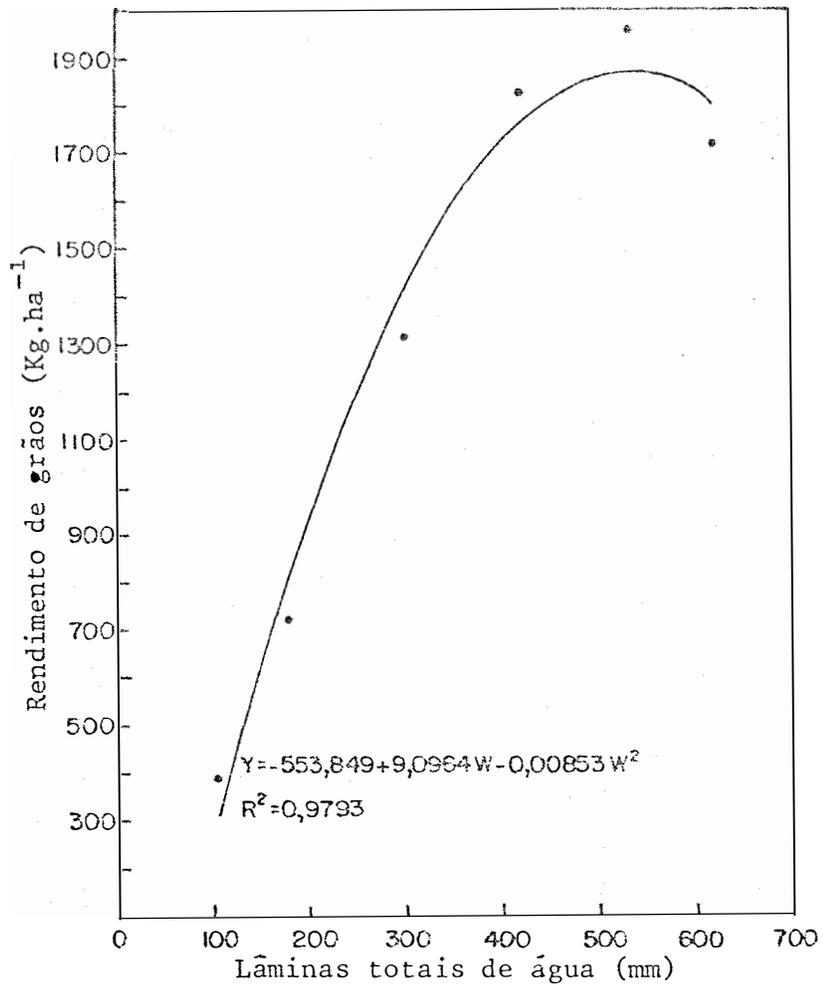


Figura 13 - Curva de rendimento médio de grãos em função das lâminas totais de água.

a aplicação de água promoveu aumento do rendimento. O efeito quadrático, observado para os totais de água aplicada, indica que o rendimento médio atingirá um máximo ( $1871,2 \text{ Kg.ha}^{-1}$ ) com  $533,2 \text{ mm}$  de água. AZEVEDO (1984), encontrou um rendimento máximo de  $905,6 \text{ Kg.ha}^{-1}$  com uma lâmina total de água igual a  $394,5 \text{ mm}$ . Com esta lâmina de água, a função de produção obtida no presente estudo estima um rendimento de grãos de  $1707,1 \text{ Kg.ha}^{-1}$ , sendo 1,88 vezes maior que o obtido por AZEVEDO (1984).

Os rendimentos sem irrigação foram os mais baixos, o que pode ser atribuído, principalmente, à escassez de chuvas durante a floração e enchimento das vagens, períodos estes em que o feijoeiro é mais sensível à deficiência de água no solo (KATTAN e FLEMING, 1956, SALTER e GOODE 1967 e MUIRHEAD e WHITE, 1981).

Fazendo-se a comparação entre os rendimentos médios pelo teste de Tukey, representado pelas letras maiúsculas entre parêntesis (Tabela 6), observa-se que o menor rendimento ( $391,5 \text{ Kg.ha}^{-1}$ ) verificado no tratamento  $W_0$  ( $105 \text{ mm}$  de água) diferiu estatisticamente dos demais tratamentos. Os maiores rendimentos médios ocorreram nos tratamentos  $W_2$  e  $W_3$  ( $1972,5$  e  $1828,4 \text{ Kg.ha}^{-1}$ , respectivamente), mas não diferiram estatisticamente entre si, apesar do tratamento  $W_2$  ter proporcionado maior rendimento.

A redução do rendimento observada no tratamento  $W_1$  ( $621 \text{ mm}$  de água) está de acordo com os resultados obtidos por VITTUM *et alii* (1963), MAGALHÃES *et alii* (1979) e AZEVEDO (1984), revelando a sensibilidade do feijoeiro à má aeração do solo.

A análise de variância do rendimento de grãos (Tabela 7) evidenciou ser altamente significativa ( $\alpha=0,01$ ) a interação entre lâminas totais de água e doses de nitrogênio. A análise de variância para o desdo

bramento das interações, considerando o efeito das lâminas totais de água dentro de cada dose de nitrogênio é apresentada na Tabela 8. Observou-se efeito altamente significativo em todas as interações. Os resultados da aplicação do teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, para comparação dos rendimentos, encontram-se na Tabela 6, representados por letras maiúsculas, entre parêntesis, na vertical.

Tabela 8 - Resumo da análise de variância para o efeito das lâminas de água dentro de cada dose de nitrogênio. (IV caso-SATTERTHWAITE:  $s = 141,234$  e  $n = 92,681$ ).

CAUSAS DE VARIACÃO	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
W/N <sub>0</sub>	5	1417895,346	283579,069	14,217**
W/N <sub>1</sub>	5	5284429,729	1056884,146	52,985**
W/N <sub>2</sub>	5	11051474,680	2210294,936	110,809**
W/N <sub>3</sub>	5	14632156,010	2926431,202	146,711**
W/N <sub>4</sub>	5	12653397,471	2530679,494	126,871**
W/N <sub>5</sub>	5	10147735,882	2029547,176	101,747**

\*\* Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Um resumo da análise de variância da regressão é apresentado na Tabela 9. Observou-se alta significância estatística ( $\alpha=0,01$ ), em todas as interações, para as componentes de 1ª e 2ª graus da regressão, indicando uma relação quadrática entre as variáveis.

Tabela 9 - Resumo da análise de variância da regressão, para lâmina total de água dentro das doses de nitrogênio.

Causas de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	R <sup>2</sup>
W/N <sub>0</sub>	5	1417895,346	283579,069	14,217 <sup>**</sup>	
Componente 1ª grau	1	853390,311	853390,311	26,210 <sup>**</sup>	0,6018
Componente 2ª grau	1	524651,621	524651,621	16,210 <sup>**</sup>	0,3700
Desvios da regressão	3	39853,414	13284,471	0,410 <sup>NS</sup>	
W/N <sub>1</sub>	5	5284420,729	1056884,146	52,985 <sup>**</sup>	
Componente 1ª grau	1	3782692,888	3782692,888	116,873 <sup>**</sup>	0,7158
Componente 2ª grau	1	1387122,515	1387122,515	42,858 <sup>**</sup>	0,2625
Desvios da regressão	3	114605,326	38201,775	1,180 <sup>NS</sup>	
W/N <sub>2</sub>	5	11051474,680	2210294,936	110,809 <sup>**</sup>	
Componente 1ª grau	1	9683808,506	9683808,506	299,199 <sup>**</sup>	0,8762
Componente 2ª grau	1	1098391,481	1098391,481	33,937 <sup>**</sup>	0,0994
Desvios da regressão	3	269274,693	89758,231	2,773 <sup>NS</sup>	
W/N <sub>3</sub>	5	14632156,010	2926431,202	146,711 <sup>**</sup>	
Componente 1ª grau	1	13292368,303	13292368,303	410,692 <sup>**</sup>	0,9084
Componente 2ª grau	1	1141606,576	1141606,576	35,272 <sup>**</sup>	0,0780
Desvios da regressão	3	198181,132	66060,377	2,041 <sup>NS</sup>	
W/N <sub>4</sub>	5	12653397,471	2530679,494	126,871 <sup>**</sup>	
Componente 1ª grau	1	10972818,419	10972818,419	339,026 <sup>**</sup>	0,8672
Componente 2ª grau	1	1386132,739	1386132,739	42,827 <sup>**</sup>	0,1095
Desvios da regressão	3	294446,314	98148,771	3,0325 <sup>NS</sup>	
W/N <sub>5</sub>	5	10147735,882	2029547,176	101,747 <sup>**</sup>	
Componente 1ª grau	1	8287465,098	8287465,098	256,057 <sup>**</sup>	0,8167
Componente 2ª grau	1	1552812,011	1552812,011	47,977 <sup>**</sup>	0,1530
Desvios da regressão	3	307458,772	102486,258	3,166 <sup>NS</sup>	

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade  
NS não significativo.

Como mostra a Figura 14, o rendimento de grãos, em todas as doses de nitrogênio, aumentou com o total de água aplicado, atingindo os máximos de 982,6 ; 1567,6 ; 2121,3 ; 2431,7 ; 2265,5 e 1974,9  $\text{Kg.ha}^{-1}$ , respectivamente com as lâminas totais de água de 451,1 ; 476,9 ; 568,8 ; 599,4 ; 558,4 e 553,8 mm e nas doses de nitrogênio de 0 (zero) ; 30 ; 60 ; 90 ; 120 e 150  $\text{Kg.ha}^{-1}$ . O máximo rendimento de grãos estimado foi de 2431,7  $\text{Kg.ha}^{-1}$ , para uma lâmina total de água de 599,4 mm e 90  $\text{Kg.ha}^{-1}$  de nitrogênio.

Os menores rendimentos de grãos verificaram-se para a lâmina total de água de 105 mm (sem irrigação), evidenciando a importância da irrigação para a cultura do feijoeiro nesta região. Dentro das doses de nitrogênio 60; 90; 120 e 150  $\text{Kg.ha}^{-1}$ , o teste de Tukey mostrou que, a um nível de probabilidade de 5%, os rendimentos de grãos obtidos sem irrigação foram estatisticamente diferentes daqueles obtidos com o uso das diferentes lâminas de irrigação, as quais proporcionaram aumento no rendimento até atingir um máximo, a partir do qual, com acréscimos na lâmina de água, houve tendência de redução do rendimento. Esta tendência também verificou-se dentro das doses 0 (zero) e 30  $\text{Kg.ha}^{-1}$  de nitrogênio, contudo não se observaram diferenças significativas, pelo teste de Tukey, nos rendimentos obtidos com lâminas totais de água de 105 mm (sem irrigação) e 181 mm.

As informações contidas na Figura 14 são importantes para o manejo da irrigação e delimitação de regiões com possibilidades de obtenção de rendimentos adequados em condições de agricultura de sequeiro, desde que ocorra boa distribuição das precipitações durante o ciclo da cultura.

As Figuras 15 e 16 apresentam o rendimento relativo de grãos de feijão em função das lâminas totais de água e do potencial mátrici

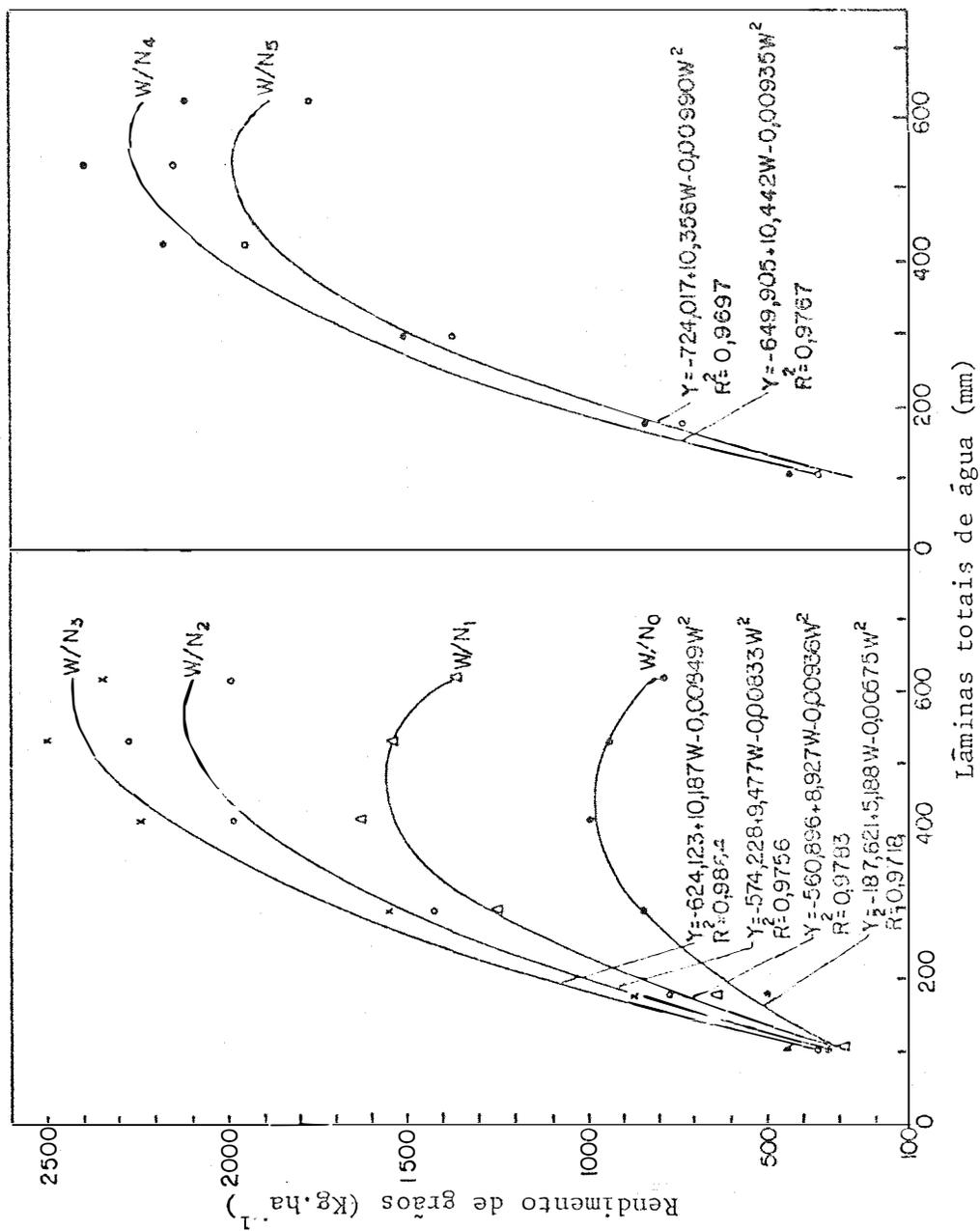


Figura 14 - Rendimento de grãos de feijão, em  $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , em função das lâminas totais de água, dentro das seis doses de nitrogênio.

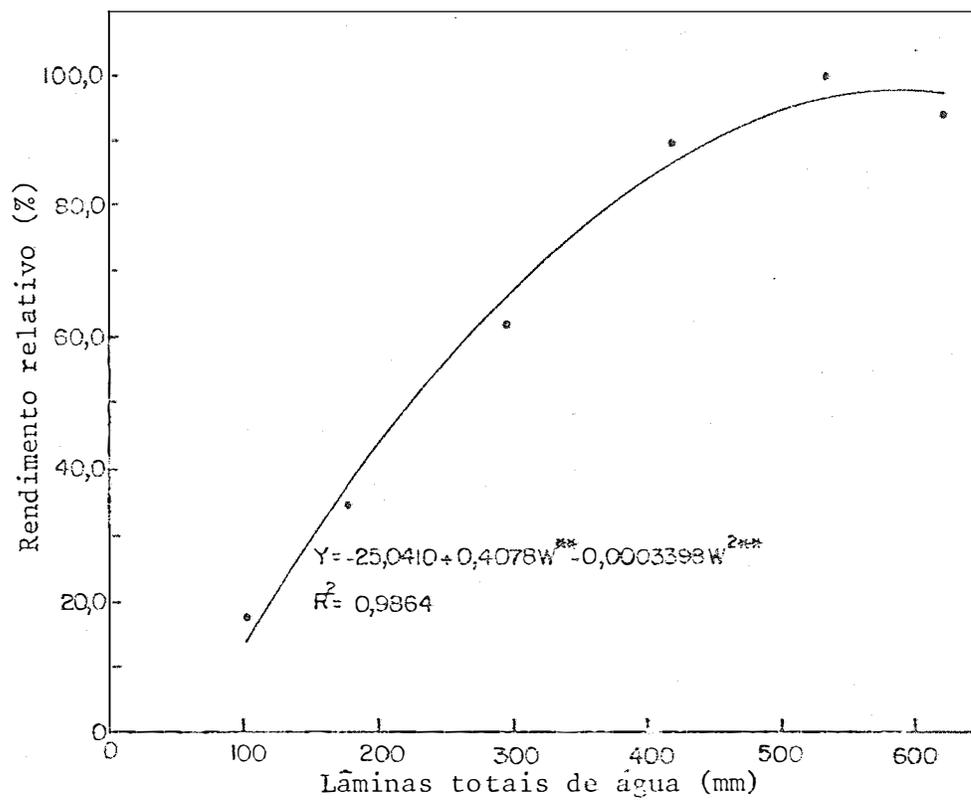


Figura 15 - Rendimento relativo de grãos em função das lâminas totais de água, na dose de nitrogênio  $N_3$ .

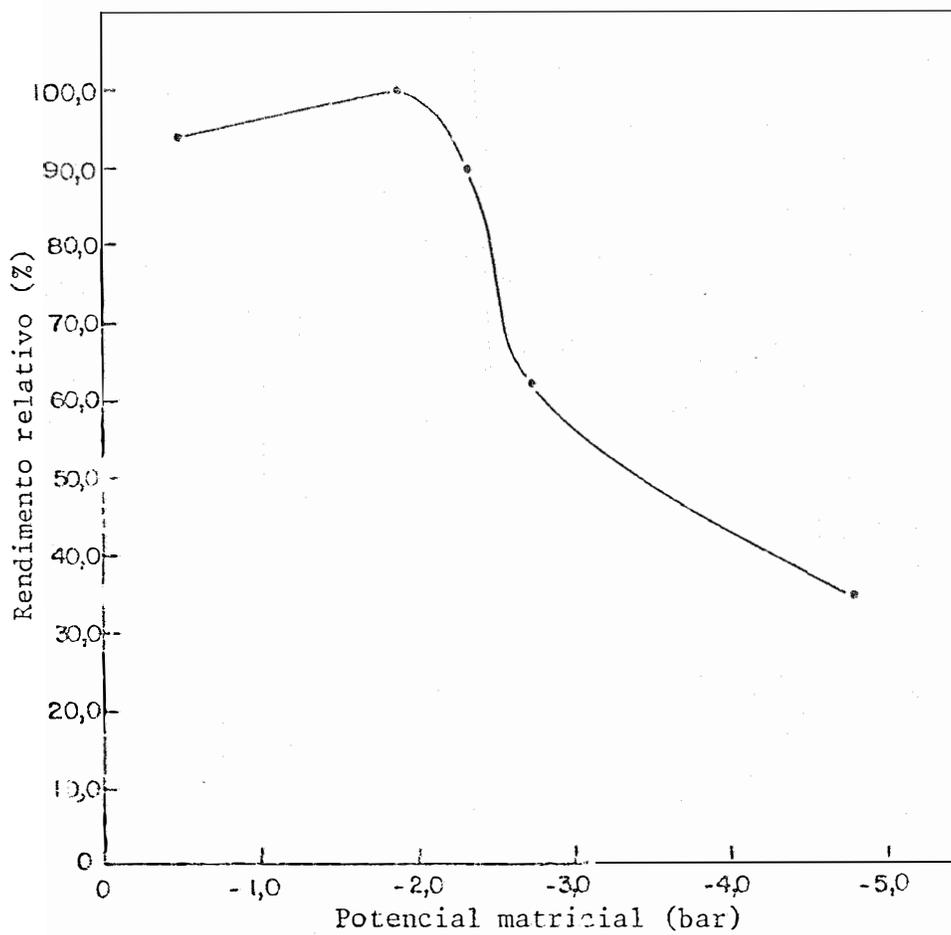


Figura 16 - Rendimento relativo de grãos de feijão em função do potencial matricial da água no solo, na dose de nitrogênio  $N_3$ .

al do solo antes da irrigação, respectivamente. Os dados de rendimento foram expressos em relação ao rendimento máximo de  $2499,1 \text{Kg.ha}^{-1}$  do tratamento  $W_2N_3$ . As curvas são apresentadas somente para a dose de nitrogênio de  $90 \text{Kg.ha}^{-1}$ , por se ter observado nela as melhores respostas da cultura às lâminas de água.

Verificaram-se valores de rendimentos relativos de 17,3 ; 34,6 ; 62,0 ; 89,7 ; 100,0 e 93,7% para as lâminas totais de água de 105; 181; 298; 420; 534 e 621 mm, respectivamente. O rendimento relativo máximo (97,3%), estimado pela função de produção ajustada, ocorreu com a aplicação de uma lâmina total de água de 600,1 mm. O rendimento relativo diminuiu acentuadamente a potenciais matriciais inferiores a -2,0 bares. Rendimentos relativos superiores a 90% foram obtidos para regimes de irrigação manejados entre -0,5 e -2,0 bares de potencial matricial. O rendimento máximo foi obtido no regime de irrigação manejado a -1,9 bar, corroborando a generalização de VITTUM *et alii* (1963), os quais recomendaram, para um máximo rendimento do feijão, irrigar quando o potencial matricial do solo atingir níveis entre -0,75 e -2,0 bares. Por outro lado, MAGALHÃES *et alii* (1979) encontraram uma redução superior a 20% no rendimento máximo, quando a irrigação foi manejada a -2,0 bares de potencial matricial.

As informações contidas nas Figuras 15 e 16 são básicas para manejo da irrigação, permitindo definir o nível operacional a que se pode adequar a irrigação para obter o rendimento máximo operacional menor que o rendimento potencial. A Figura 17 permite determinar o intervalo entre irrigações sucessivas, de acordo com o nível de manejo adotado. Por exemplo, no solo em que se desenvolveu o experimento, com um valor médio de  $ET_m$  de  $3,7 \text{mm.dia}^{-1}$ , para se obter um nível de rendimento de 90%, deve-se irrigar

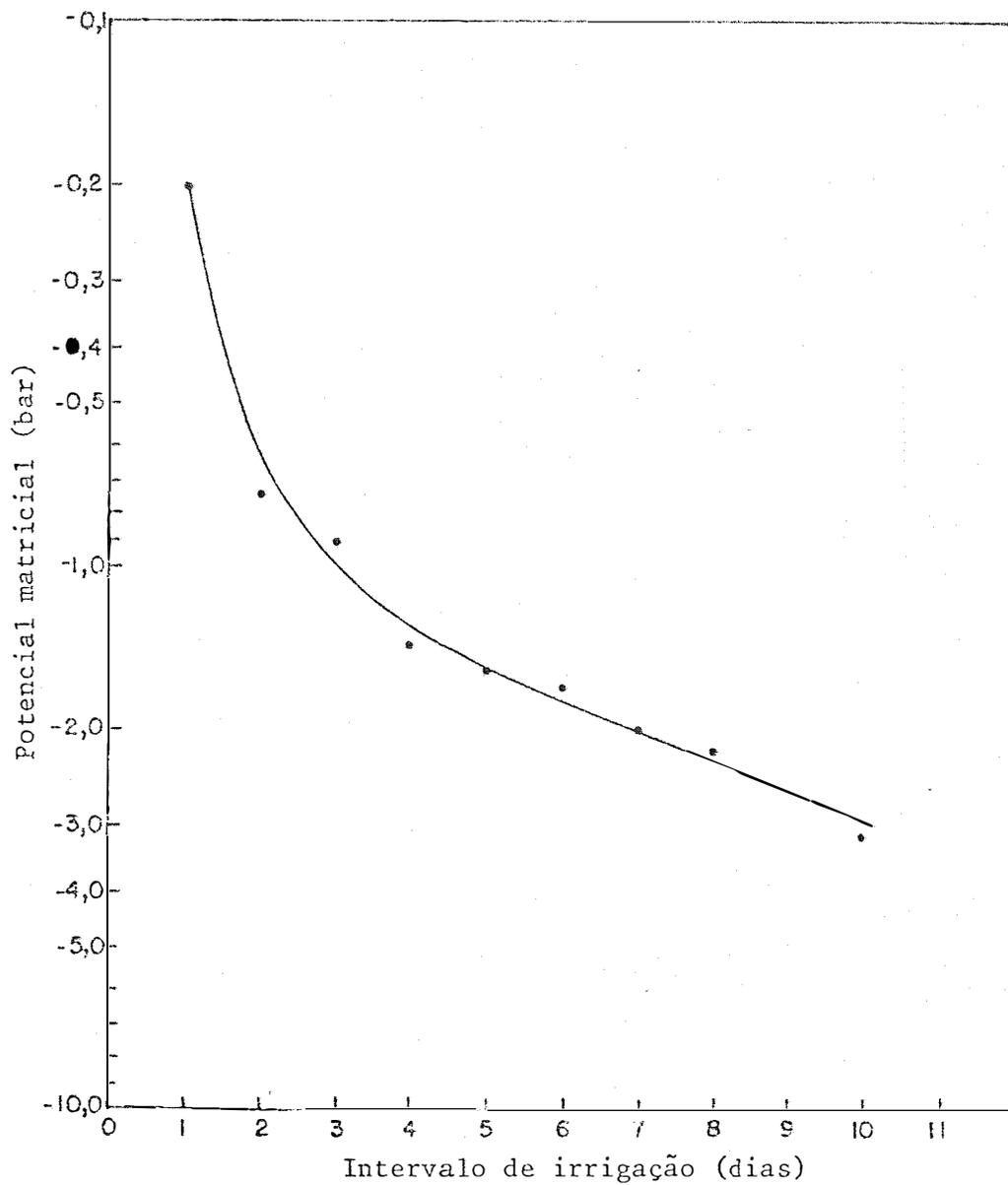


Figura 17 - Variação do potencial matricial da água no solo, em função do tempo após a irrigação, para um valor médio de  $ET_m$  igual a  $3,7 \text{ mm.dia}^{-1}$ .

sempre que o potencial matricial do solo atingir um valor médio de -2,3 bares na camada de solo de 0 a 40cm de profundidade, ou usar um intervalo entre irrigações de 8 dias. Observa-se que, rendimento próximo do máximo pode ser obtido com manejo da irrigação a -1,9 bar, que corresponde a um intervalo entre irrigações de 6 dias, aproximadamente.

É importante observar que os valores da Figura 17 foram obtidos para o tratamento que recebeu 621 mm de água e 90Kg.ha<sup>-1</sup> de nitrogênio, no período compreendido entre o 31º e 63º dias após a sementera.

#### 4.4.2. LÂMINA DE ÁGUA ECONÔMICAMENTE ÓTIMA

Considerou-se como lâmina de água economicamente ótima aquela que conduziu ao rendimento que proporcionou a máxima receita líquida.

Sob a hipótese de que L(W) possui um máximo e que a água é o único fator variável, foram obtidos os produtos físicos marginais da água para as doses (zero), 30, 60, 90, 120 e 150 Kg.ha<sup>-1</sup> de nitrogênio, respectivamente:

$$\frac{d\hat{Y}}{dW} = 5,188 - 0,0115W = \frac{P_W}{P_Y} \dots\dots\dots (30)$$

$$\frac{d\hat{Y}}{dW} = 8,927 - 0,0187W = \frac{P_W}{P_Y} \dots\dots\dots (31)$$

$$\frac{d\hat{Y}}{dW} = 9,477 - 0,0167W = \frac{P_W}{P_Y} \dots\dots\dots (32)$$

$$\frac{d\hat{Y}}{dW} = 10,187 - 0,0170W = \frac{P_W}{P_Y} \dots\dots\dots (33)$$

$$\frac{d\hat{Y}}{dW} = 10,442 - 0,0187W = \frac{P_W}{P_Y} \dots\dots\dots (34)$$

$$\frac{d\hat{Y}}{dW} = 10,356 - 0,0198W = \frac{P_W}{P_Y} \dots\dots\dots (35)$$

O produto físico marginal de um fator representa o acréscimo no rendimento resultante do uso de uma unidade a mais deste fator, permanecendo constante outros fatores. Graficamente, o produto físico marginal representa a declividade do produto total ou da função de produção, em um determinado nível do fator.

O produto físico marginal da água ( $PFM_a$ ) foi inicialmente positivo, diminuindo gradualmente com o aumento da lâmina de água aplicada até atingir o valor zero. A partir daí, a aplicação de maiores lâminas de água conduziu a valores de  $PFM_a$  negativos, indicando que é antieconômico o uso de grandes quantidades do fator W (Tabela 10). Por exemplo para  $N=90 \text{ kg.ha}^{-1}$  o rendimento atingiu um máximo para  $W=599,2 \text{ mm}$  e, neste ponto o valor do  $PFM_a$  é igual a zero. Os menores valores positivos do  $PFM_a$  ocorreram na dose 0 (zero) de nitrogênio, indicando uma menor resposta da cultura à aplicação de água.

Tabela 10 - Produtos físicos marginais da água, dentro de cada dose de nitrogênio, para diferentes lâminas totais de água (Ilha Solteira, SP, 1982).

Lâminas totais de água (mm)	Doses de nitrogênio ( $\text{Kg.ha}^{-1}$ )					
	0	30	60	90	120	150
105	3,98	6,96	7,72	8,40	8,48	8,28
181	3,11	5,54	6,45	7,11	7,06	6,77
298	1,76	3,35	4,50	5,12	4,87	4,46
420	0,358	1,07	2,46	3,05	2,59	2,04
534	-0,953	-1,06	0,56	1,11	0,46	-0,22
621	-1,95	-2,69	-0,89	-0,37	-1,17	-1,94

As equações de produtos físicos marginais, derivadas das equações quadráticas, são da forma linear. Em cada dose de nitrogênio, o PFM declina a uma taxa constante.

De maneira a atender diferentes relações  $P_w/P_y$  foram construídos gráficos de lâmina total de água economicamente ótima ( $W^*$ ) em função da relação de preços entre fator e produto ( $P_w/P_y$ ), nas diferentes doses de nitrogênio (Figura 18). Verifica-se que  $W^*$  diminuiu à medida que aumentou a relação  $P_w/P_y$ . Os menores valores de  $W^*$  ocorreram para a dose 0(zero) de nitrogênio, o que se justifica pelos baixos rendimentos obtidos nos tratamentos que não receberam adubação nitrogenada. Assim, não é econômico aplicar grandes lâminas de água quando o nitrogênio é o fator limitante da produção. Os maiores valores de  $W^*$  ocorreram para a dose de nitrogênio de  $90\text{Kg.ha}^{-1}$ , para a qual foram obtidos os maiores rendimentos de grãos.

O valor de  $W^*$  atinge zero para valores de  $P_w/P_y$  iguais ou superiores a 5,19; 8,93; 9,45; 10,19; 10,44 e 10,36, respectivamente nas doses 0(zero), 30, 60, 90, 120 e  $150\text{Kg.ha}^{-1}$ , denotando a inviabilidade econômica da aplicação de água por irrigação nestas condições. Observou-se ainda, que na dose 0(zero) de nitrogênio, a inviabilidade econômica da irrigação ocorrerá para menores valores de  $P_w/P_y$ , em relação às demais doses de nitrogênio.

Analisando as relações da Figura 18, pode-se deduzir que, para uma determinada relação  $P_w/P_y$ , a maior receita líquida será obtida com a aplicação da correspondente  $W^*$  e com uma dose de nitrogênio de  $90\text{Kg.ha}^{-1}$ .

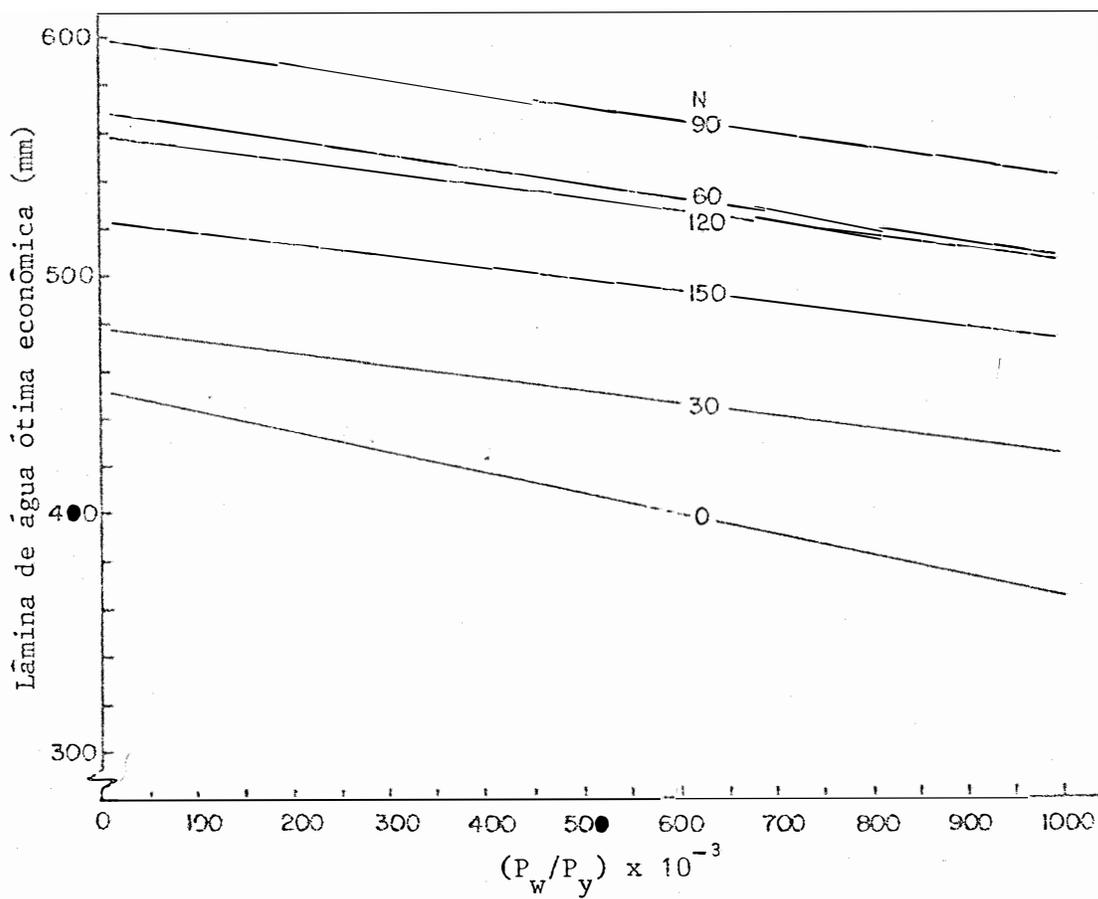


Figura 18 - Lâmina total de água economicamente ótima em função da relação entre o preço da água e o preço do produto.

#### 4.4.3. EFEITO DAS DOSES DE NITROGÊNIO SOBRE O RENDIMENTO DE GRÃOS

Os valores médios do rendimento de grãos, em função das doses de nitrogênio são apresentados na Figura 19. Observou-se acréscimos no rendimento de grãos com a aplicação de doses crescentes de nitrogênio, segundo uma relação quadrática. O rendimento máximo observado ( $1655,1 \text{ Kg.ha}^{-1}$ ) foi obtido com a dose de  $90 \text{ Kg.ha}^{-1}$  de nitrogênio. A partir daí, doses crescentes de N deprimiram o rendimento. A relação quadrática entre as variáveis indica que o rendimento máximo estimado ( $1623,1 \text{ Kg.ha}^{-1}$ ) foi alcançado para uma dose de  $100 \text{ Kg.ha}^{-1}$  de nitrogênio. Um efeito quadrático para as doses de nitrogênio também foi encontrado por AZEVEDO (1984). BERGER *et alii* (1982), encontrou um efeito quadrático do N sobre o rendimento de grãos de feijão na dose de  $120 \text{ Kg.ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ; mas com 60 e  $180 \text{ Kg.ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , a resposta à aplicação do N foi linear. Diversos trabalhos tem mostrado haver variação na resposta da cultura do feijoeiro à adubação nitrogenada (AZEVEDO, 1984; BERGER *et alii*, 1982; ALMEIDA *et alii*, 1982; BULISANI, 1982; MACHADO *et alii*, 1982; TANAKA e FUJITA, 1979 e SILVA, 1978).

Os resultados da aplicação do teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade são apresentados na Tabela 6. Verificou-se que os rendimentos médios de grãos, obtidos com as doses 0(zero), 30, 60 e  $90 \text{ Kg.ha}^{-1}$  de nitrogênio, diferiram estatisticamente entre si. Entretanto, com as doses de 90 e  $120 \text{ Kg.ha}^{-1}$  de nitrogênio não houve diferença estatística, o mesmo ocorrendo com as doses de 60 e  $150 \text{ Kg.ha}^{-1}$  de nitrogênio. A depressão do rendimento na maior dose de

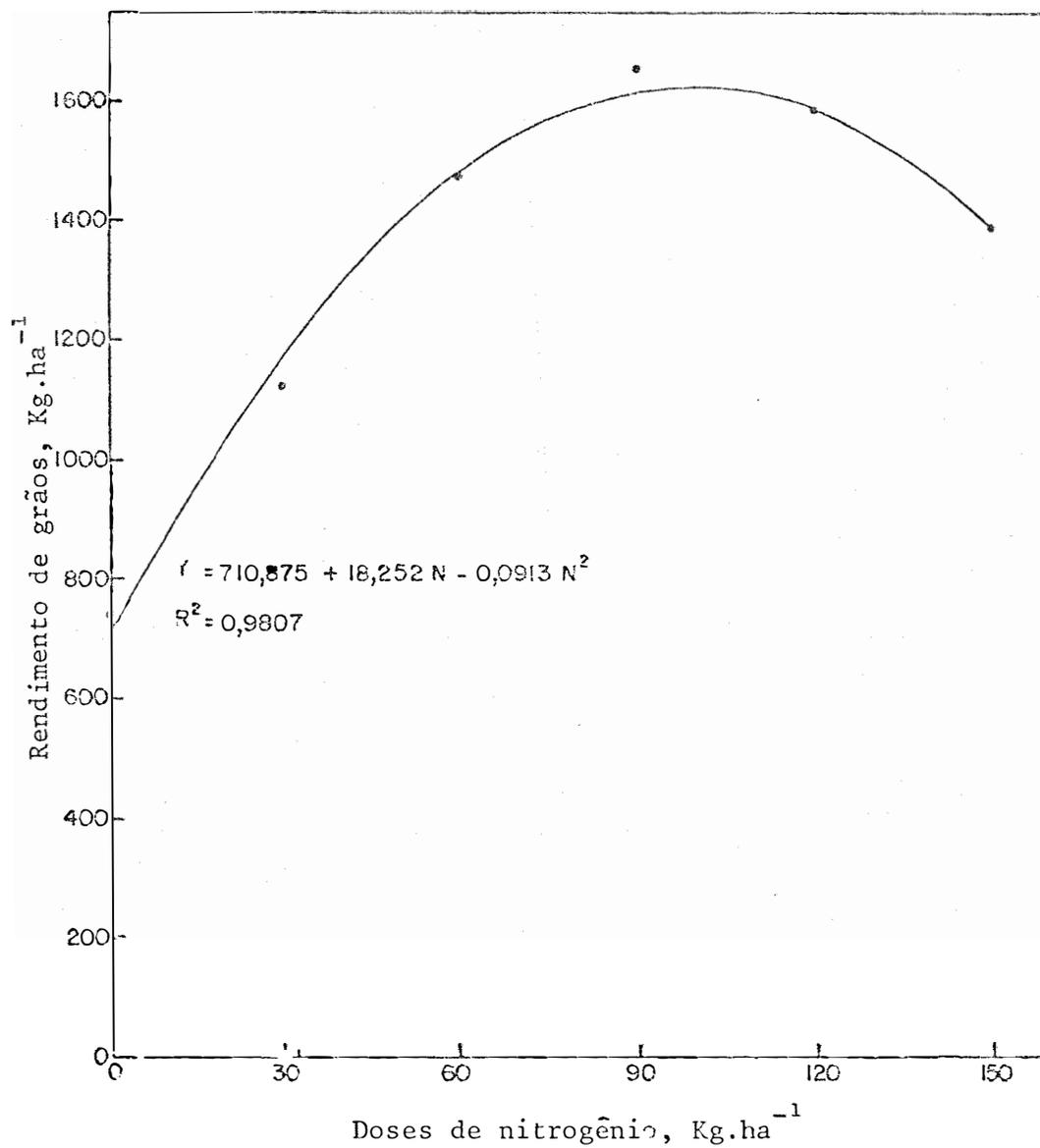


Figura 19 - Curva de rendimento médio de grãos em função das doses de ni trogênio.

nitrogênio está de acordo com os resultados apresentados por BERGER *et alii*, (1982), TANAKA e FUJITA (1979) e SILVA (1978).

A análise de variância do rendimento de grãos (Tabela 7), evidenciou ser altamente significativa a interação entre lâminas totais de água e doses de nitrogênio. A análise de variância para o desdobramento das interações, considerando o efeito das doses de nitrogênio dentro de cada lâmina de água, é apresentada na Tabela 11. Verificou-se que dentro da lâmina total de água de 105 mm, a interação não foi significativa, mostrando que, na ausência de irrigação, não houve resposta do feijoeiro à adubação nitrogenada. Este resultado está de acordo com as assertivas de BARLEY (1970): os nutrientes das plantas encontram-se na solução do solo, de onde a raiz os absorve em forma iônica; para que um nutriente seja absorvido, a primeira condição é o estabelecimento do contato entre o nutriente e o sistema radicular. No caso do nitrogênio, o mecanismo de contato predominante é o fluxo de massa, pelo qual o nutriente é conduzido para a raiz. Em condições de baixo teor de água no solo, o fluxo de massa é limitado. ARAGON e De DATTA (1982) e OSLSSEN e KEMPER (1968), utilizaram as mesmas justificativas para tais resultados.

Um resumo da análise de variância da regressão é apresentada na Tabela 12. Observou-se alta significância estatística para o nitrogênio dentro das lâminas totais de água de 181; 298; 420; 534 e 621 mm. A Figura 20 mostra as curvas de rendimento em função das doses de nitrogênio, ajustadas pelas equações de regressão. Observou-se que as doses de nitrogênio aumentaram o rendimento de

Tabela 11 - Resumo da análise de variância para efeito das doses de nitrogênio dentro de cada lâmina total de água.

CAUSAS DE VARIACÃO	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
N/W <sub>0</sub>	5	44549,785	8909,952	0,510 <sup>NS</sup>
N/W <sub>1</sub>	5	6541345,261	1308269,052	74,916 <sup>**</sup>
N/W <sub>2</sub>	5	6971649,444	1394329,889	79,844 <sup>**</sup>
N/W <sub>3</sub>	5	4284920,723	856984,145	49,074 <sup>**</sup>
N/W <sub>4</sub>	5	1346848,120	269369,624	15,425 <sup>**</sup>
N/W <sub>5</sub>	5	376926,133	75385,227	4,317 <sup>**</sup>

NS = não significativo.

\*\* = significativo ao nível de 5% de probabilidade.

grãos segundo uma relação quadrática, tendo, em cada lâmina total de água aplicada de 181 ; 298 ; 420 ; 534 e 621 mm, os rendimentos de grãos atingido máximos de 840,4 ; 1548,6 ; 2226,2; 2471,2 e 2223,9 Kg.ha<sup>-1</sup>, respectivamente com doses de nitrogênio de 99,0 ; 99,3 ; 101,4; 103,1 e 97,8 Kg.ha<sup>-1</sup>. O maior rendimento estimado ocorreu para a lâmina total de água de 534 mm na dose de 103,1 Kg.ha<sup>-1</sup> de nitrogênio.

O fornecimento de altas doses de nitrogênio provocou redução no rendimento, em todas as lâminas de água aplicadas. De acordo com TANAKA (1969), altas doses de nitrogênio frequentemente conduzem a um excesso de área foliar, resultando num sombreamento mútuo das folhas o que re

Tabela 12 - Resumo da análise de variância da regressão, para doses de nitrogênio dentro das lâminas totais de água.

Causas de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	R <sup>2</sup>
N/W <sub>1</sub>	5	6541345,261	1308269,052		
Componente 1ª grau	1	3301439,898	3301439,898	189,051**	0,5047
Componente 2ª grau	1	3060432,385	3060432,385	175,251**	0,4679
Desvios da regressão	3	179472,978	59824	3,426*	
N/W <sub>2</sub>	5	6971649,444	1394329,889		
Componente 1ª grau	1	4248724,625	4248724,625	243,296**	0,6094
Componente 2ª grau	1	25783883,452	25783883,452	147,647**	0,3698
Desvios da regressão	3	144541,367	48180,456	2,760*	
N/W <sub>3</sub>	5	4284920,723	856984,145		
Componente 1ª grau	1	2535519,293	2535519,293	145,192**	0,5917
Componente 2ª grau	1	1739405,598	1739405,598	99,604**	0,4059
Desvios da regressão	3	9995,832	3331,944	0,191 <sup>NS</sup>	
N/W <sub>4</sub>	5	13468448,120	269369,624		
Componente 1ª grau	1	739389,025	739389,025	42,340**	0,5449
Componente 2ª grau	1	603004,763	603004,763	34,530**	0,4477
Desvios da regressão	3	4454,333	1484,778	0,085 <sup>NS</sup>	
N/W <sub>5</sub>	5	376926,133	75385,227		
Componente 1ª grau	1	199379,617	199379,617	11,417**	0,5290
Componente 2ª grau	1	167808,275	167808,275	9,609**	0,4452
Desvios da regressão	3	9738,241	3246,080	0,185 <sup>NS</sup>	
Resíduo B	90	1571686,003	17463,178		

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade

NS não significativo

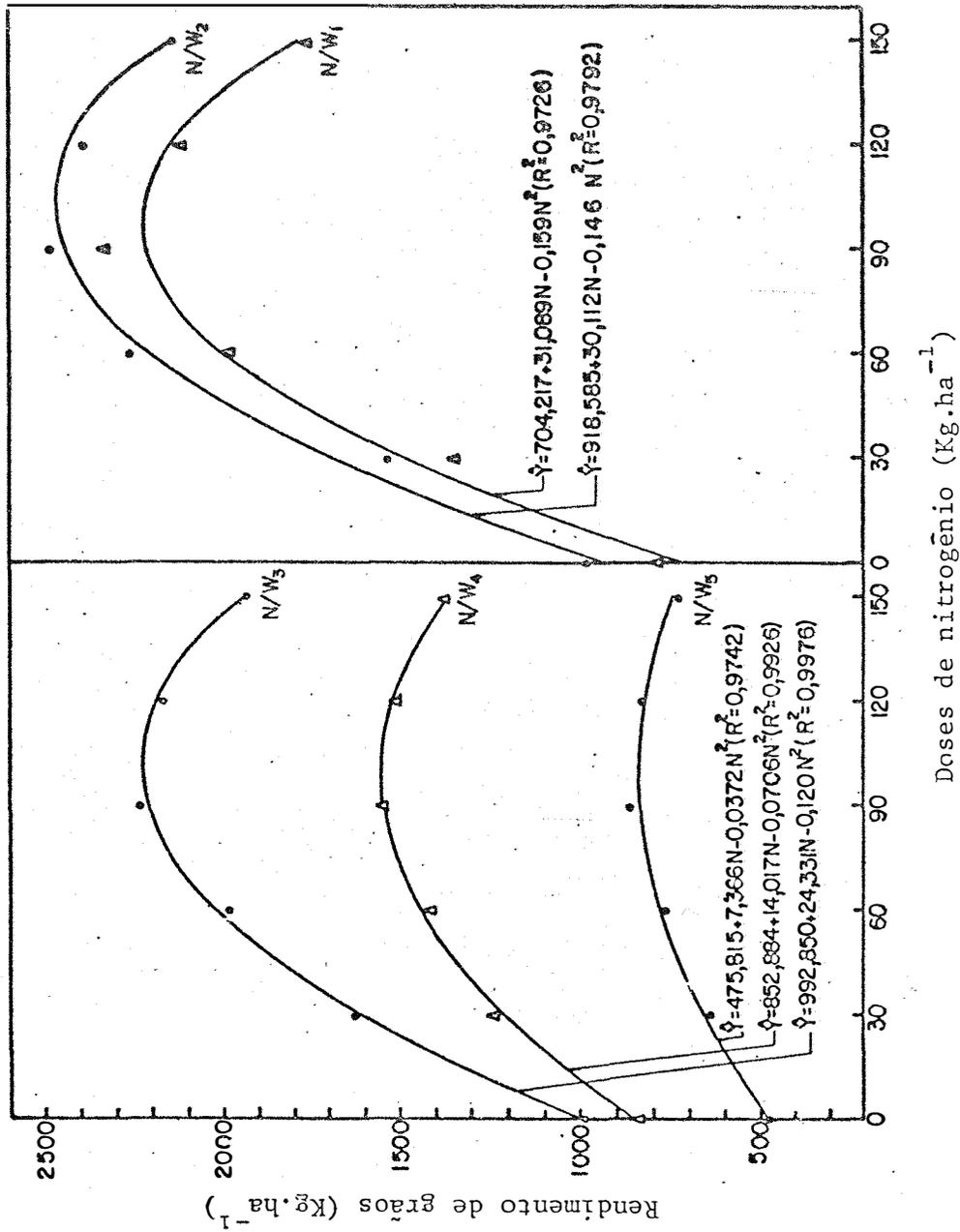


Figura 20 - Rendimento de grãos em função das doses de nitrogênio aplicadas, nas diferentes lâminas totais de água.

duz a taxa de fotossíntese média por unidade de área foliar e aumenta a taxa de respiração. Sob este aspecto, MURATA (1969) afirmou que a produção de matéria seca é o resultado do balanço entre fotossíntese e respiração e, uma vez acelerada a respiração, tem-se um efeito negativo no rendimento de grãos.

Além da expansão da área foliar, TANAKA (1969) comenta que o aumento do suprimento de nitrogênio no solo provoca um aumento na absorção deste nutriente pela cultura resultando num aumento do teor de nitrogênio nas folhas. MALAVOLTA (1980) apresenta uma figura onde relaciona produção e teores de nutrientes nas folhas. Distinguem-se três estágios : o primeiro é caracterizado por um aumento da produção; o segundo, estacionário, é chamado de absorção de luxo e o terceiro caracteriza-se pela redução da produção à medida que aumenta os teores de nutrientes nas folhas, denotando uma toxidez do elemento. TANAKA (1969), afirma que se for possível aumentar o teor de nitrogênio das folhas de forma a assegurar uma ótima área foliar, pode-se obter alto rendimento de grãos.

#### 4.4.4. DOSE DE NITROGÊNIO ECONOMICAMENTE ÓTIMA

A dose de nitrogênio economicamente ótima foi considerada como aquela que conduziu ao rendimento que proporcionou a máxima receita líquida.

Sob a hipótese de que  $L(N)$  tem um máximo e que o nitrogênio é o único fator variável, foram derivados os produtos físicos marginais do nitrogênio para as lâminas totais de água de 181 , 298 , 420 , 534 e 621 mm , respectivamente:

$$\frac{d\hat{Y}}{dN} = 7,366 - 0,0744N = \frac{P_N}{P_Y} \dots\dots\dots (36)$$

$$\frac{d\hat{Y}}{dN} = 14,017 - 0,1412N = \frac{P_N}{P_Y} \dots\dots\dots (37)$$

$$\frac{d\hat{Y}}{dN} = 24,331 - 0,240 N = \frac{P_N}{P_Y} \dots\dots\dots (38)$$

$$\frac{d\hat{Y}}{dN} = 30,112 - 0,292 N = \frac{P_N}{P_Y} \dots\dots\dots (39)$$

$$\frac{d\hat{Y}}{dN} = 31,089 - 0,318 N = \frac{P_N}{P_Y} \dots\dots\dots (40)$$

Os produtos físicos marginais do nitrogênio, nas diferentes lâminas totais de água, são apresentados na Tabela 13. Observou-se que , o produto físico marginal do nitrogênio foi maior na dose 0(zero) de nitrogênio, diminuindo à medida que aumentaram as doses de nitrogênio aplicadas.

Tabela 13 - Produtos físicos marginais do nitrogênio, dentro de cada lâmina total de água, para as diferentes doses de nitrogênio (Ilha Solteira, SP, 1982).

Doses de nitrogênio (Kg.ha <sup>-1</sup> )	Lâminas totais de água (mm)				
	181	298	420	534	621
0	7,39	14,02	24,33	30,11	31,09
30	5,13	9,78	17,13	21,35	21,55
60	2,90	5,54	9,93	12,59	12,51
90	0,67	1,31	1,73	3,83	2,47
120	-1,56	-2,93	-4,47	-4,93	-7,07
150	-3,79	-7,16	-11,67	-13,69	-16,61

Os maiores produtos físicos marginais positivos ocorreram para as lâminas totais de água de 534 e 621 mm, entretanto, nestas lâminas de água, a redução do rendimento com altas doses de nitrogênio foi, relativamente, mais pronunciado.

De forma a atender diferentes relações  $P_n/P_y$ , construíram-se gráficos de doses de nitrogênio economicamente ótimas ( $N^*$ ) em função da relação de preços entre fator e produto ( $P_n/P_y$ ), nas diferentes lâminas totais de água (Figura 21). Observou-se que  $N^*$  diminuiu à medida que aumentou a relação  $P_w/P_y$  e que menores valores de  $N^*$  verificaram-se para a menor lâmina total de água (181 mm). Logo, é possível dizer que a relação  $P_n/P_y$ , na qual não será econômico aplicar adubação nitrogenada, atingirá valores menores para a menor lâmina de água aplicada. Os maiores valores de  $N^*$  ocorreram para a lâmina total de água de 534 mm, coincidindo com os maiores rendimentos de grãos, podendo-se deduzir que, para uma determinada relação  $P_n/P_y$ , a maior receita líquida poderá ser obtida com a aplicação da dose economicamente ótima de nitrogênio (Figura 21) e com uma lâmina total de água de 534 mm.

#### 4.4.5. SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Foi obtida uma função de produção, para a estimativa do rendimento de grãos, em função de duas variáveis: lâmina total de água (W) e dose de nitrogênio (N). A superfície de resposta é apresentada pela equação (41), com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9460, indicando ótimo ajustamento. O  $R^2$  traduz a fração da variação total no rendimento de grãos que é explicada pela superfície de resposta. A representação gráfica desta fun

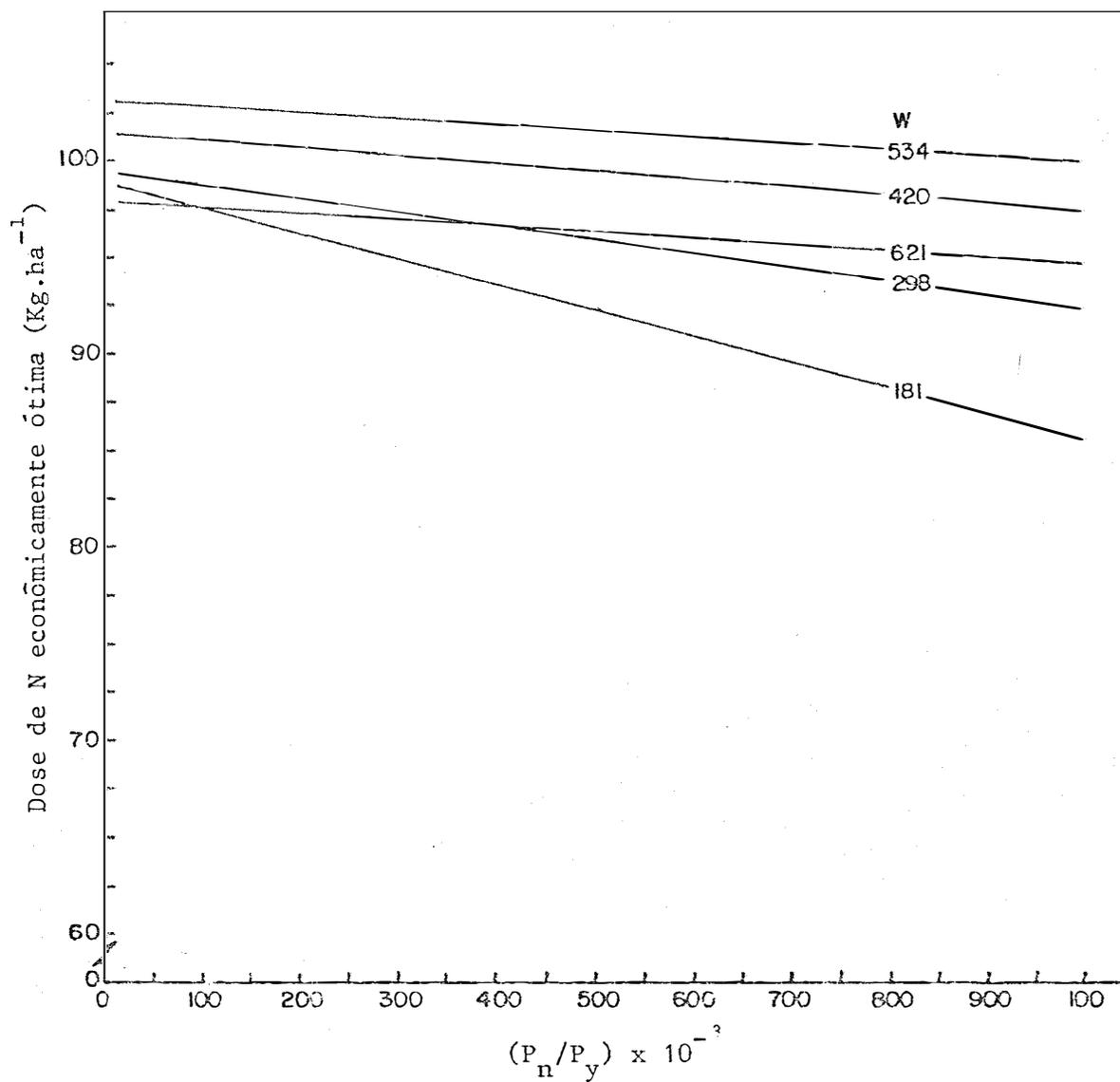


Figura 21 - Dose de nitrogênio, econômica<sup>o</sup>mente otima, em função da relação entre o preço do nitrogênio e o preço do produto.

ção dá uma superfície a três dimensões (Figura 22). Observou-se que nenhum fator por si só conduziu a um elevado rendimento.

$$Y = 759,290 + 12,771N + 7,960W - 0,0913N^2 - 0,00854W^2 + 0,0152NW \dots\dots\dots (41)$$

em que, Y = rendimento de grãos, em Kg.ha<sup>-1</sup> ;

N = dose de nitrogênio, em Kg.ha<sup>-1</sup> ;

W = lâmina total de água, em mm.

As linhas da superfície, paralelas ao longo dos eixos da água e do nitrogênio, possuem inicialmente uma maior inclinação positiva, a qual vai diminuindo progressivamente até atingir 0 (zero). A partir daí a inclinação torna-se negativa, indicando uma redução no rendimento de grãos quando os níveis dos fatores excedem certos limites. O máximo rendimento estimado (2261,8 Kg.ha<sup>-1</sup>) foi conseguido com uma lâmina total de água de 570,4 mm e uma dose de nitrogênio de 117,4 Kg.ha<sup>-1</sup>.

A Figura 22 mostra que, nas menores lâminas de água, as curvas de respostas do rendimento à água distanciaram mais entre si, enquanto que, nas maiores lâminas de água, aproximaram-se gradativamente. Por outro lado, considerando-se a resposta do rendimento às doses de nitrogênio, este comportamento, apesar de semelhante, foi menos pronunciado. Isto indica que a água foi um fator mais limitante do rendimento de grãos do que o nitrogênio. As curvas de resposta à água, considerando fixas as doses de nitrogênio, são apresentadas por um corte perpendicular ao eixo das doses de nitrogênio. As curvas para nitrogênio, para lâminas de água constantes, são representadas por cortes perpendiculares ao eixo das lâminas totais de

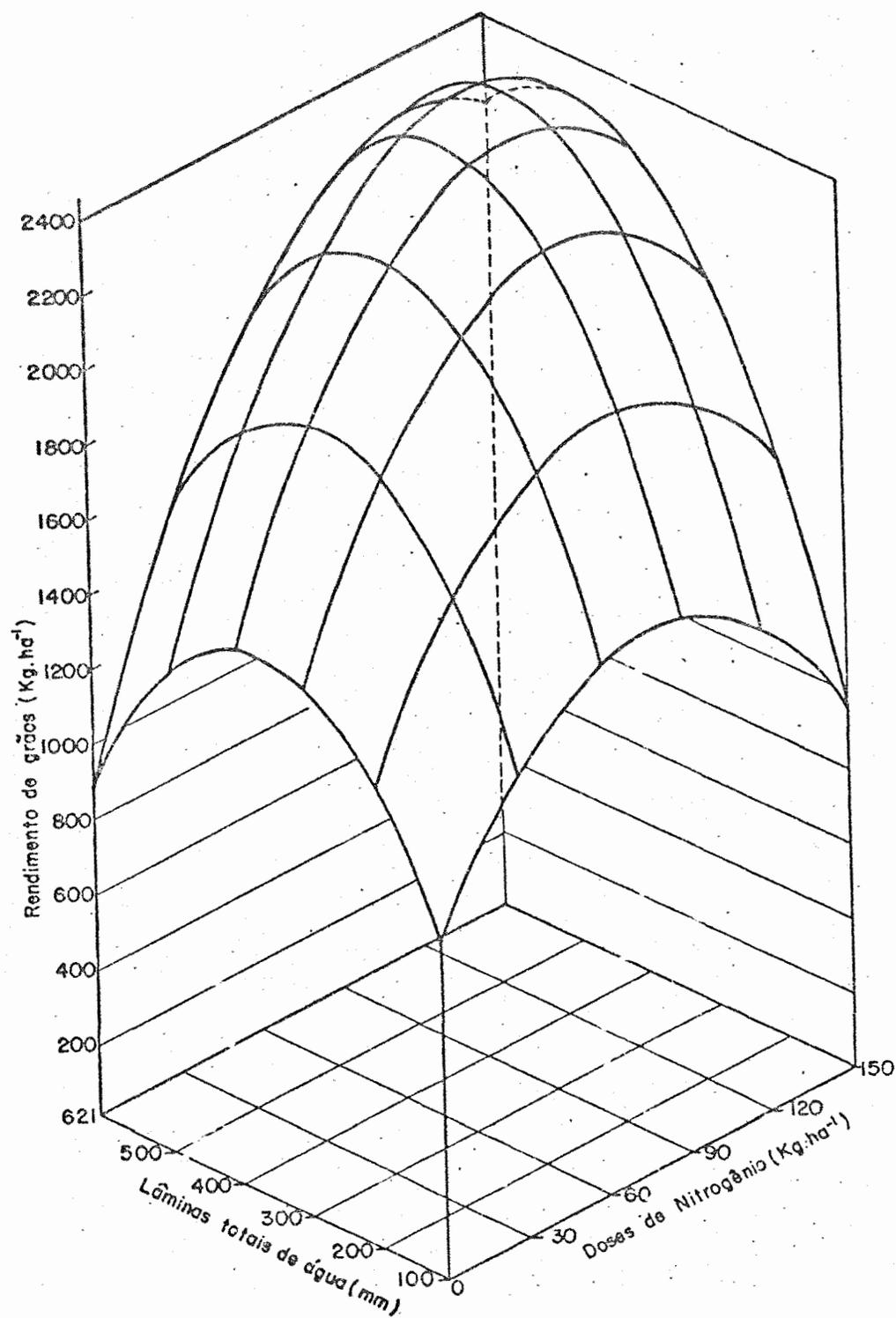


Figura 22 - Rendimento de grãos em função das lâminas totais de água e das doses de nitrogênio.

água. Para uma dose 0 (zero) de nitrogênio, a redução do rendimento foi encontrada a uma lâmina total de água relativamente inferior àquelas nas de mais doses de nitrogênio.

#### 4.4.5.1. CURVAS DE ISOPRODUTO

Na Figura 23 está representada a superfície de resposta num gráfico de duas dimensões, ao que se denomina de curvas de isoproduto (ou isoquantas). As linhas do isoproduto mostram as diversas combinações de lâminas totais de água e doses de nitrogênio que resultaram no mesmo rendimento. Por exemplo, o rendimento de grãos de  $1000 \text{ Kg.ha}^{-1}$  pode ser obtido com  $30 \text{ Kg.ha}^{-1}$  de nitrogênio e 225 mm de água ou com  $60 \text{ Kg.ha}^{-1}$  de nitrogênio e 180 mm de água. Portanto, cada linha de isoproduto representa as diferentes combinações de lâmina total de água e dose de nitrogênio necessárias para o rendimento fixado num dado nível. Isto introduz, claramente, o conceito de substituição de fatores, isto é, um fator pode ser substituído por outro na produção de determinado produto.

As isoquantas são convexas em relação à origem, isto é, doses iguais de nitrogênio substituem lâminas totais de água cada vez renores.

A variação na declividade das isoquantas, ao longo de uma mesma linha reta, traçada à partir da origem, sugere que a combinação dos dois fatores, para a qual obtem-se menor custo, varia com o nível de rendimento. Assim, a combinação ótima econômica de lâmina de água e dose de nitrogênio, para o rendimento de, por exemplo,  $1000 \text{ Kg.ha}^{-1}$  é diferente da aquela para um rendimento de  $2000 \text{ Kg.ha}^{-1}$

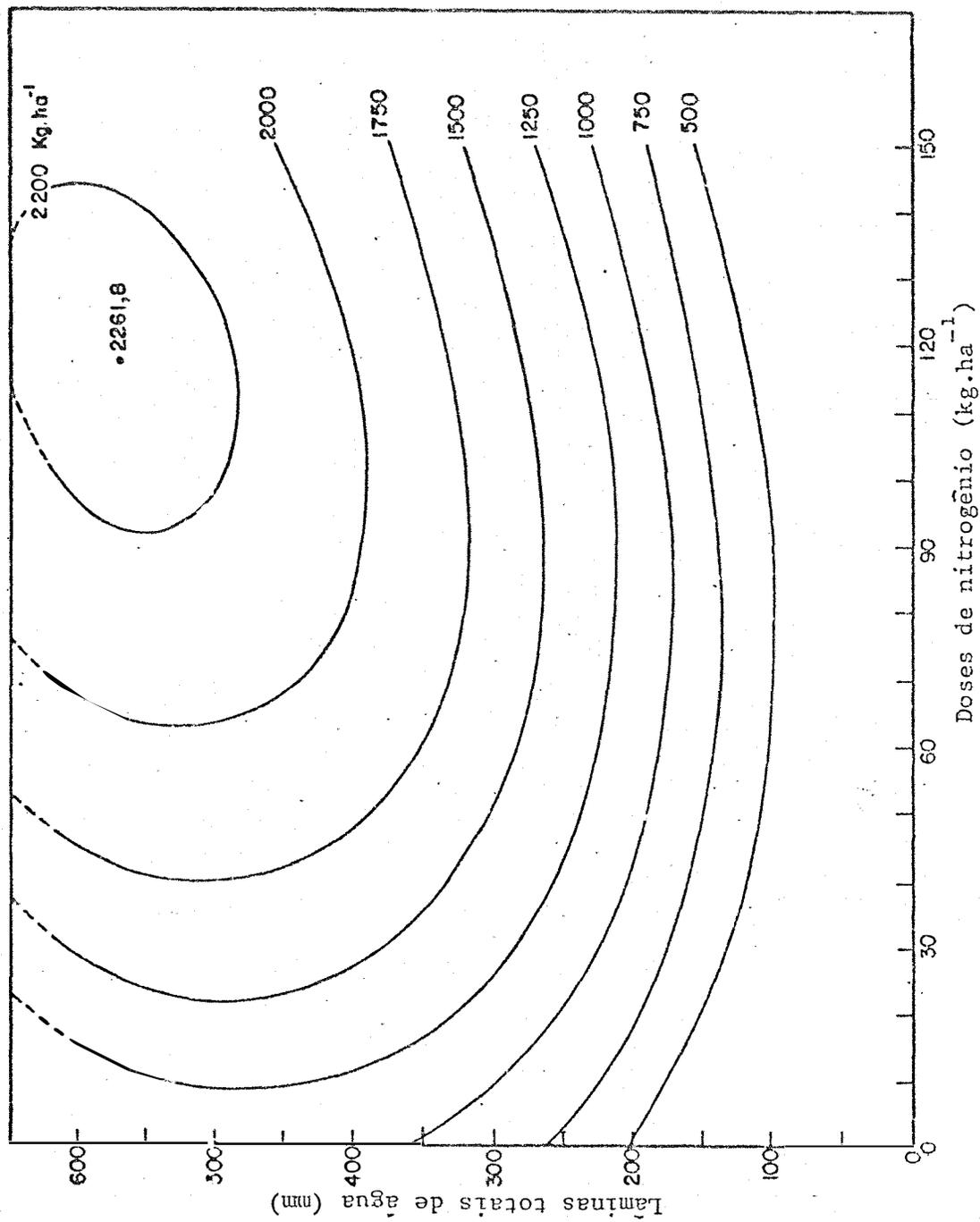


Figura 23 - Curvas de isoproduto.

## 4.4.5.2. PRODUTO FÍSICO MARGINAL

Os produtos físicos marginais da água ( $PFM_a$ ) e do nitrogênio ( $PFM_n$ ) são mostrados na Tabela 14. Eles foram obtidos derivando a equação (41), em relação à água e ao nitrogênio. Por exemplo, com 90  $Kg.ha^{-1}$  de nitrogênio e 420 mm de água, o  $PFM_a$  é 2,15 Kg de grãos por mm de água e o  $PFM_n$  é 2,72 Kg de grãos por Kg de nitrogênio.

Tabela 14 - Produtos físicos marginais da água (valor superior) e do nitrogênio (valor inferior entre parêntesis), para as diferentes lâminas totais de água e doses de nitrogênio (Ilha Solteira, SP, 1982).

$$PFM_a = \partial Y / \partial W \text{ e } PFM_n = \partial Y / \partial N.$$

Lâminas totais de água (mm)	Doses de nitrogênio ; $Kg.ha^{-1}$					
	0	30	60	90	120	150
105	6,19 (14,37)	6,62 ( 8,89)	7,08 ( 3,41)	7,53 (-2,07)	7,99 (-7,54)	8,45 (-13,02)
181	4,87 (15,52)	5,32 (10,04)	5,78 ( 4,57)	6,24 (-0,91)	6,69 (-6,39)	7,15 (-11,87)
298	2,87 (17,30)	3,33 (11,82)	3,78 ( 6,34)	4,24 ( 0,87)	4,69 (-4,61)	5,15 (-10,10)
420	0,79 (19,15)	1,24 (13,68)	1,70 ( 8,20)	2,15 ( 2,72)	2,61 (-2,76)	3,07 ( -8,23)
534	-1,16 (20,89)	-0,70 (15,41)	-0,25 ( 9,93)	0,21 ( 4,45)	0,66 (-1,02)	1,12 ( -6,50)
621	-2,65 (22,21)	-2,19 (16,73)	-1,73 (11,25)	-1,28 ( 5,78)	-0,82 ( 0,30)	-0,37 ( -5,18)

Observou-se que os menores produtos físicos marginais da água ocorreram na dose 0(zero) de nitrogênio e que, à medida que se utilizaram maiores doses de nitrogênio, aumentaram os produtos físicos marginais da água. Comportamento semelhante foi verificado para o produto físico marginal do nitrogênio, em relação às lâminas totais de água. Estes resultados vem confirmar o fato de que, nenhum fator por si só conduz a altos rendimentos e que existe uma combinação adequada dos dois fatores (água e nitrogênio) envolvidos no sistema produtivo.

#### 4,4,5,3. TAXA MARGINAL DE SUBSTITUIÇÃO

Determinou-se a taxa marginal de substituição de água por nitrogênio ( $TMS_{W/N}$ ) isto é, as proporções marginais de substituição de água por nitrogênio, correspondentes a cada nível de rendimento. Os valores das  $TMS_{W/N}$  são apresentados na Tabela 15 em diferentes níveis de rendimento. Observa-se que o valor absoluto da  $TMS_{W/N}$  decresce à medida que a quantidade de nitrogênio aumenta e a quantidade de água diminui, isto é, à medida que substituímos água por nitrogênio.

Tomando-se o rendimento de  $1000\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , para cada unidade de nitrogênio acrescentada, pode-se economizar 10,18; 3,95 ; ... ; 0,28 unidades de água, respectivamente nos limites dos pontos representados pelas doses de nitrogênio de 0 ; 15 ; 30 ; ... ;  $75\text{ Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

A  $TMS_{W/N}$  será sempre negativa quando a curvatura da linha de isoproducto também for negativa, uma vez que  $dW/dN$  representa a declividade da linha de isoproducto, no ponto. Na região de produção racional, a taxa marginal de substituição de fatores é negativa. Dentro desta região, o nitrogênio está substituindo a água em proporção decrescente.

Tabela 15 - Combinações de lâminas de água e doses de nitrogênio e correspondentes taxas marginais de substituição de água por nitrogênio, para níveis fixos de rendimento de grãos (Ilha Solteira, SP, 1982).  $TMS\ W/N = dW/dN = - \partial Y/\partial N/\partial W$ .

N (kg.ha <sup>-1</sup> )	Y = 500kg.ha <sup>-1</sup>		Y = 750kg.ha <sup>-1</sup>		Y = 1000kg.ha <sup>-1</sup>		Y = 1250kg.ha <sup>-1</sup>		Y = 1500kg.ha <sup>-1</sup>		Y = 1750kg.ha <sup>-1</sup>		Y = 2000kg.ha <sup>-1</sup>		Y = 2200kg.ha <sup>-1</sup>	
	W (mm)	TMS	W (mm)	TMS	W (mm)	TMS	W (mm)	TMS	W (mm)	TMS	W (mm)	TMS	W (mm)	TMS	W (mm)	TMS
0	202	-3,51	265	-4,89	261	-10,18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	160	-2,84	209	-2,86	270	-3,95	359	-7,53	-	-	-	-	-	-	-	-
30	132	-1,51	175	-1,83	225	-2,34	286	-3,30	378	-6,65	-	-	-	-	-	-
45	113	-0,93	153	-1,14	197	-1,43	249	-1,90	313	-2,82	418	-7,25	-	-	-	-
60	103	-0,47	140	-0,61	180	-0,78	227	-1,05	333	-1,50	355	-2,57	-	-	-	-
75	99	-0,08	134	-0,16	173	-0,28	216	-0,44	266	-0,68	328	-1,16	420	-2,83	-	-
90	100	+0,28	134	+0,23	172	+0,16	213	+0,07	260	-0,06	317	-0,29	394	-0,89	-	-
105	107	+0,62	141	+0,60	177	+0,57	218	+0,53	264	+0,47	318	+0,38	389	+0,17	485	-0,76
120	119	+0,95	152	+0,95	189	+0,96	229	+0,96	274	+0,97	328	+0,99	398	+1,03	489	+1,19
135	136	+1,27	169	+1,31	206	+1,35	247	+1,40	293	+1,48	348	+1,62	421	+1,94	522	+3,60
150	157	+1,62	192	+1,68	229	+1,76	271	+1,87	319	+2,04	378	+2,34	458	+3,17	-	-

## 4.4.5.4. REGIÃO DE PRODUÇÃO RACIONAL

De acordo com a lei dos retornos decrescentes, tem-se estágios de produção que são racionais e irracionais.

Definindo-se isóclina como a linha que une os pontos de cada isoquanta onde as inclinações das linhas tangentes são iguais ( pontos de mesma TMS ), em estudos econômicos, interessa limitar, em cada isoquanta, o segmento entre duas isóclinas em que  $TMS_{W/N}$  é decrescente. Ultrapassa das essas isóclinas, a declividade da isoquanta é positiva, isto é, quantidades crescentes de ambos os fatores são empregados mantendo-se o rendimento no mesmo nível.

As linhas que delimitam a região de produção racional são aquelas em que as  $TMS_{W/N}$  são infinito e zero (ou  $dW/dN=0$  e  $dN/dW=0$ ). Os valores de W e N para as isóclinas nas quais  $dW/dN=0$  e  $dN/dW=0$  são apresentados na Tabela 16. A Figura 24 apresenta a região de produção racional. Nesta região aplica-se o princípio de economizar.

Tabela 16 - Valores de W e N para as isóclinas nas quais  $dW/dN = 0$  e  $dN/dW = 0$  (Ilha Solteira, SP, 1982).

FATORES	Nível de rendimento (Kg.ha <sup>-1</sup> )							
	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2200
N	78	81	84	88	92	96	102	110
W	442	451	462	473	486	501	521	546

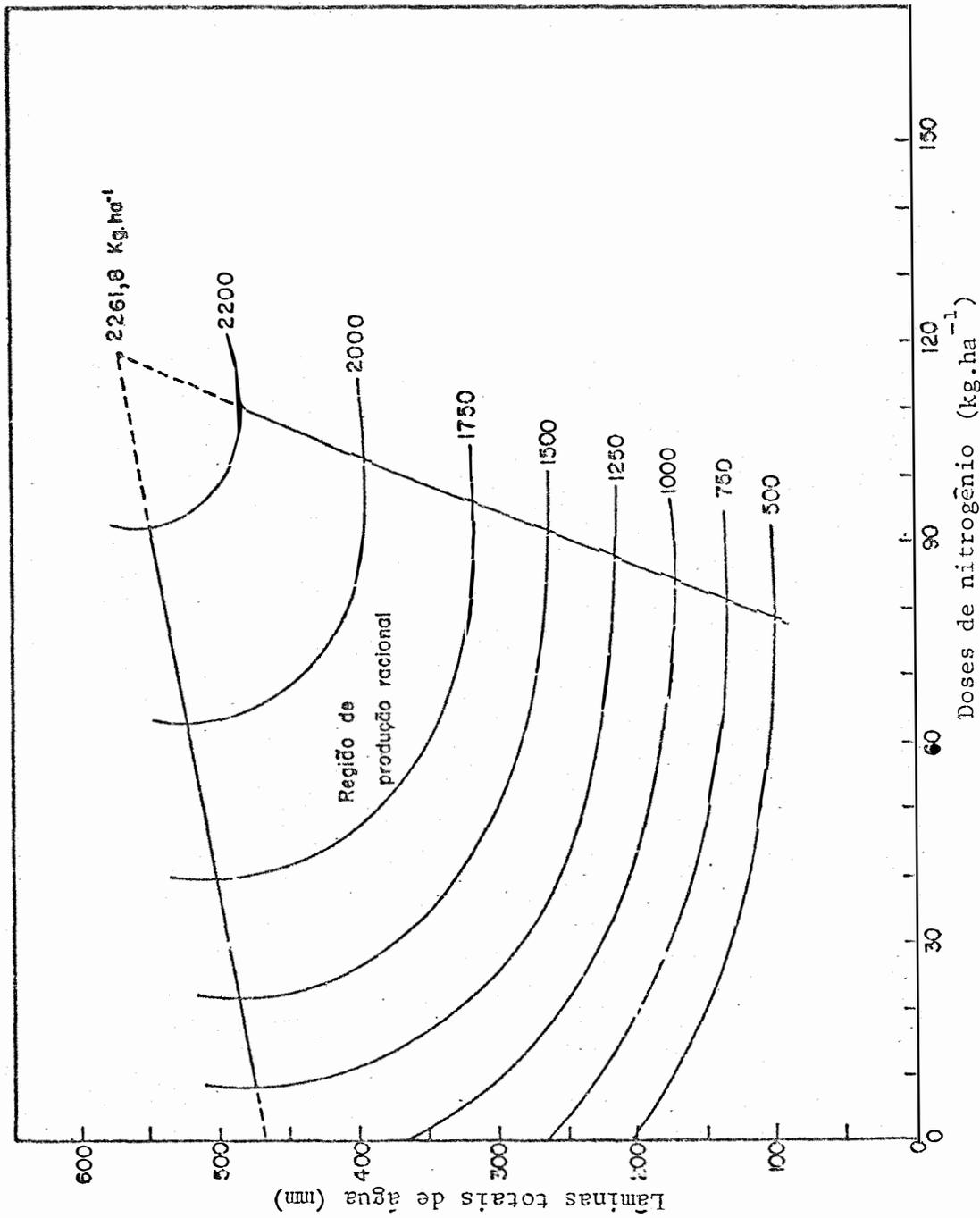


Figura 24 - Região de produção racional.

As isóclinas que passam pelos pontos onde  $dW/dN = 0$  e  $dN/dW = 0$ , definem as duas fronteiras da região de produção racional. Dentro desta, as taxas marginais de substituição são negativas o que implica dizer que, nesta região, W e N são substitutos.

Dentro da região de produção racional podem ser estudados dois aspectos: a) qual o emprego da combinação ótima de W e N; b) qual o nível de rendimento a ser atingido, ou qual a quantidade de W e N a ser usada, mantendo-se fixos os custos. O primeiro aspecto é um problema de substituição de recursos, representando a forma de combinar os fatores de modo que se possa minimizar os custos para conseguir determinado rendimento. O segundo aspecto é um problema da dimensão fator-produto. Esta análise diz respeito ao volume da produção a ser obtida. A quantidade econômica de determinados recursos só pode alcançar seu ponto máximo se cada unidade de produto for obtida ao mínimo custo ou mínima despesa de recursos.

#### 4.4.5.5. COMBINAÇÃO DE CUSTO MÍNIMO PARA W e N

Conhecendo-se as diferentes combinações dos dois fatores substituíveis, que produziram a mesma quantidade do produto, determinou-se a combinação de custo mínimo.

É vantajoso substituir W por N sempre que a quantidade do fator acrescentado (N) vezes o seu preço for menor do que a quantidade do recurso substituído (W) vezes o seu preço, isto é  $|P_W \cdot dW| > |P_N \cdot dN|$ , ou  $|dW/dN| > P_N/P_W$ , ou ainda  $-dW/dN > P_N/P_W$ . Isto significa que, sempre que o valor absoluto da taxa marginal de substituição entre os fatores for maior que a relação inversa entre os respectivos preços, é vantajoso substituir W por N.

Como se trata de substitutos imperfeitos, à medida que se vai substituindo W por N, o valor absoluto da  $TMS_{W/N}$  vai diminuindo (Tabela 15) e atinge um ponto em que  $|TMS_{W/N}| = |dW/dN| = P_N/P_W$  ou  $dW/dN = -P_N/P_W$ . Esse é o ponto em que o custo atingirá seu mínimo.

Considerando o preço da água ( $P_W$ ) igual a Cz\$1,50 ( 0,0141 OTN ) por milímetro distribuído em cada hectare, o preço do nitrogênio ( $P_N$ ) igual a Cz\$3,35 ( 0,0315 OTN ) por quilo e um nível de rendimento de 1000 Kg.há<sup>-1</sup>, quando se passa da primeira para a segunda combinação de fatores (Tabela 15), para cada unidade de nitrogênio acrescentada, pode-se economizar 3,95 unidades de água, isto é, para um acréscimo no gasto de Cz\$3,35, economiza-se Cz\$5,92. Quando se passa da segunda combinação para a terceira, para um acréscimo no gasto de Cz\$3,35, economiza-se 2,34. Cz\$0,50 = Cz\$3,51. Não se pode passar da terceira para a quarta combinação pois aí o custo sobe. Para um aumento no gasto de Cz\$3,35, economiza-se apenas 1,43. Cz\$1,50 = Cz\$2,14.

Dispondo-se de uma importância fixa para gastar em água e nitrogênio, e podendo-se transferir gastos de um para o outro fator, a produção será realizada de maneira que a relação  $PFM_N/P_N$  seja igual à relação  $PFM_W/P_W$ .

O custo mínimo para obter um dado rendimento Y, é o custo correspondente à reta de isocusto que tangencia a isoquanta para Y. A combinação dos fatores W e N correspondente ao ponto de tangência é a combinação de custo mínimo.

A equação geral das linhas de isocusto é  $W \cdot P_W + N \cdot P_N = C$ , onde C é a importância disponível para gastar em W e N. Sendo C constante,

$$W = \frac{C}{P_W} - \frac{P_N}{P_W} \cdot N, \text{ em que } - \frac{P_N}{P_W} \text{ é a declividade da reta.}$$

Na Figura 25 apresenta-se a combinação de W e N de custo mínimo, para os diversos níveis de rendimento e uma relação de preços  $P_N/P_W=2,23$  ( $P_N=Cz\$3,35.kg^{-1}$  e  $P_W=Cz\$1,50.mm^{-1}.ha^{-1}$ ). Se a relação de preços não variar, as declividades das retas de isocusto serão iguais e portanto elas serão paralelas. Tomando-se como exemplo o nível de rendimento  $Y=1250Kg.ha^{-1}$ , o custo mínimo para obter este nível de rendimento é o custo correspondente à reta de isocusto que tangencia a isoquanta para  $Y = 1250 Kg.ha^{-1}$ . A combinação dos fatores (água e nitrogênio) correspondente ao ponto de tangência é a combinação de custo mínimo (no caso,  $W^*=258mm$  e  $N^*=40 Kg.ha^{-1}$ ).

Os valores de  $N^*$  e  $W^*$  que proporcionam a combinação de custo mínimo para diferentes níveis de rendimento e uma relação  $P_N/P_W=2,23$ , são mostrados na Tabela 17. Os cálculos foram efetuados com base na função de produção (equação 41) e na condição que permite calcular a combinação ótima de fatores, isto é  $dW/dN=P_N/P_W$ . Para outras relações de preços, obtém-se, da mesma forma, os valores de  $W^*$  e  $N^*$  que conduzem ao custo mínimo.

Tabela 17 - Valores  $W^*$  e  $N^*$  que proporcionaram a combinação de custo mínimo, para uma relação  $P_N/P_W$  (Ilha Solteira, SP, 1982).

FATORES	Nível de rendimento ( $Kg.ha^{-1}$ )							
	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2200
$N^*(kg.ha^{-1})$	16	23	31	40	51	63	78	98
$W^*(mm)$	158	188	221	258	299	348	442	494

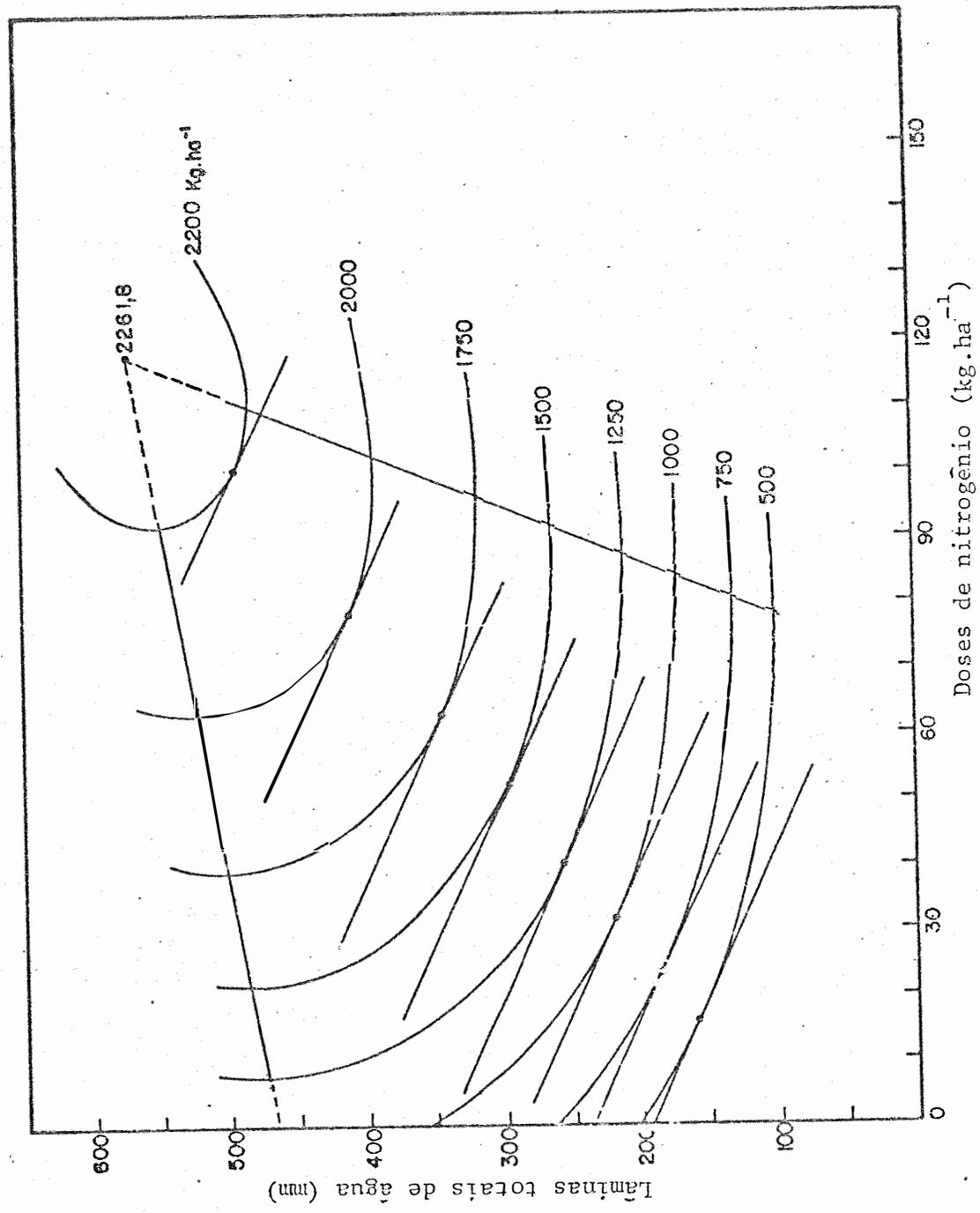


Figura 25 - Combinações de custo mínimo para água e nitrogênio, usando uma relação de

preços  $P_n/P_w = 2,23$ .

#### 4.4.5.6. COMBINAÇÕES DOS FATORES W e N QUE CONDUZEM A RENDIMENTO MÁXIMO

Para atender este aspecto da análise econômica, foram fixados os custos dos fatores variáveis em dado nível e determinaram-se as quantidades de W e N que levariam ao máximo rendimento, ou seja que atenderiam ao objetivo de maximizar  $Y=f(N,W)$ , sujeito à restrição  $W.P_W + N.P_N = C$ . Para tal resolveu-se o sistema de equações (42), utilizando-se, como exemplo, os preços indicados no item 4.4.5.5.

$$\begin{cases} W.P_W + N.P_N = C \\ \frac{dW}{dN} = \frac{P_N}{P_W} \end{cases} \dots\dots\dots (42)$$

Admitiu-se para este exemplo, que se dispunha de Cz\$1.300,00 (C), para gastar em água e nitrogênio, em cada hectare cultivado. Evidentemente, para cada situação particular de preços dos fatores e de capital disponível, o sistema terá soluções diferentes.

Considerando-se a situação proposta, a lâmina ótima de água ( $W^*$ ) foi de 592 mm e a dose ótima de nitrogênio ( $N^*$ ) foi de 123 Kg.ha<sup>-1</sup>. O rendimento estimado correspondente foi de 2256,4 Kg.ha<sup>-1</sup>.

Para um capital a empregar em água e nitrogênio de apenas Cz\$800,00, em cada hectare, foram obtidos  $W^* = 377$  mm e  $N^* = 70$  Kg.ha<sup>-1</sup>, propiciando um rendimento estimado de 1875,6 Kg.ha<sup>-1</sup>.

#### 4.4.5.7. MÁXIMA RECEITA LÍQUIDA A SER OBTIDA COM O EMPREGO DE W e N

Neste caso não se dispõe de limitações quanto ao capital

disponível para a compra de W e N. O objetivo foi de maximizar a receita líquida, sujeita à restrição dada pela função de produção  $Y = f(W,N)$ . A solução foi obtida utilizando-se o sistema de equações (29). O nível ótimo de nitrogênio ( $N^*$ ), em função das relações de preços  $P_N/P_Y$  e  $P_W/P_Y$ , foi obtido como:

$$N^* = -5,9142 \cdot \frac{P_N}{P_Y} - 5,2632 \cdot \frac{P_W}{P_Y} + 117,4242 \dots\dots\dots (43)$$

Para o cálculo da lâmina ótima de água ( $W^*$ ), obteve-se:

$$W^* = 65,7895 \cdot \frac{P_N}{P_Y} + 12,0132N^* - 840,1974 \dots\dots\dots (44)$$

Utilizando-se as equações (43) e (44), para determinadas relações de preços, determinam-se  $N^*$  e  $W^*$ . Por exemplo, para  $P_N/P_Y = 0,4$  e  $P_W/P_Y = 0,2$ , obteveram-se  $N^* = 114 \text{ Kg.ha}^{-1}$  e  $W^* = 556 \text{ mm}$ . Com estes valores, o rendimento estimado foi  $2.259,2 \text{ Kg.ha}^{-1}$ .

#### 4.5. PESO MÉDIO DE 100 GRÃOS

Na Tabela 18 estão apresentados os valores médios do peso de 100 grãos, em gramas, obtido em função das lâminas totais de água e das doses de nitrogênio.

O resumo da análise de variância do peso de 100 grãos, apresentado na Tabela 19, mostrou efeito significativo, ao nível de 1% de probabilidade, das doses de nitrogênio e das lâminas totais de água, não tendo sido detectado efeito significativo para a interação entre estes fatores.

As equações de regressão ajustadas para peso médio de 100

Tabela 18 - Peso médio de 100 grãos, em gramas, obtidos em função das lâminas totais de água e das doses de nitrogênio (Ilha Solteira, SP; 1982).

Lâminas totais de água (mm)	Doses de nitrogênio (Kg.ha <sup>-1</sup> )						Média
	0	30	60	90	120	150	
105	15,32	18,30	20,28	22,07	22,83	22,63	20,26
181	16,91	21,05	23,62	24,93	25,24	26,01	22,96
298	18,30	21,97	24,36	26,07	26,58	27,43	24,12
420	18,48	22,18	24,87	27,06	27,71	28,23	24,75
534	18,81	22,39	24,70	27,73	28,27	28,50	25,07
621	18,69	22,26	24,89	27,65	28,10	28,51	25,02
MÉDIA	17,75	21,38	23,79	25,92	26,46	26,89	23,70

grãos, em função das lâminas totais de água e das doses de nitrogênio, são mostradas nas Figuras 26 e 27. Observou-se que tanto a aplicação de água quanto a de nitrogênio proporcionaram um efeito quadrático no peso de 100 grãos. O peso de 100 grãos atingiu um máximo estimado de 25,25g para uma lâmina total de água 499,7mm e de 26,85g para uma dose de nitrogênio de 139,4Kg.ha<sup>-1</sup>.

Estes resultados não corroboram aqueles apresentados por AZEVEDO (1994), o qual encontrou efeito significativo para interações entre lâminas totais de água e doses de nitrogênio, no estudo do peso de 1000 grãos de feijão. Este autor observou uma redução linear no peso de 1000 grãos com o aumento da lâmina de água em todas as doses de nitrogênio aplicadas. Por outro lado, SILVA (1978), não verificou efeito significativo

Tabela 19 - Resumo da análise de variância do peso de 100 grãos, obtido em função das lâminas totais de água e das doses de nitrogênio.

CAUSAS DE VARIACÃO	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Blocos	3	7,203	2,401	7,436
Lâminas de água (W)	5	414,493	82,899	256,724 **
Resíduo a	15	4,844	0,323	
Parcelas	23	426,540		
Doses de Nitrogênio (N)	5	1522,266	304,453	426,774 **
Interação (WxN)	25	20,517	0,821	1,150 NS
Resíduo b	90	64,204	0,713	

C.V. para parcelas = 9,39%

C.V. para subparcelas = 6,56%

\*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade

NS = não significativo.

entre os diversos tratamentos de água e nitrogênio na cultura do feijoeiro (*Vigna sinensis* L. Savi).

#### 4.6. NÚMERO DE GRÃOS POR VAGEM

Os resultados de número médio de grãos por vagem, para diferentes lâminas totais de água aplicadas e doses de nitrogênio, são apresentados na Tabela 20.

O resumo da análise de variância dos dados é apresentado na Tabela 21. Observou-se diferença significativa, ao nível de 1% de probabi

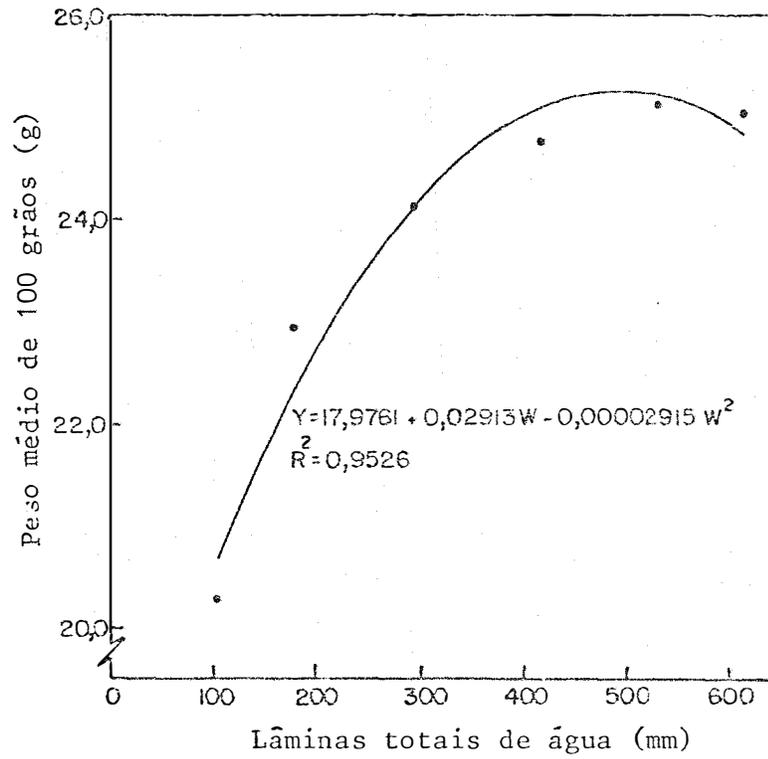


Figura 26 - Peso médio de 100 grãos em função das lâminas totais de água.

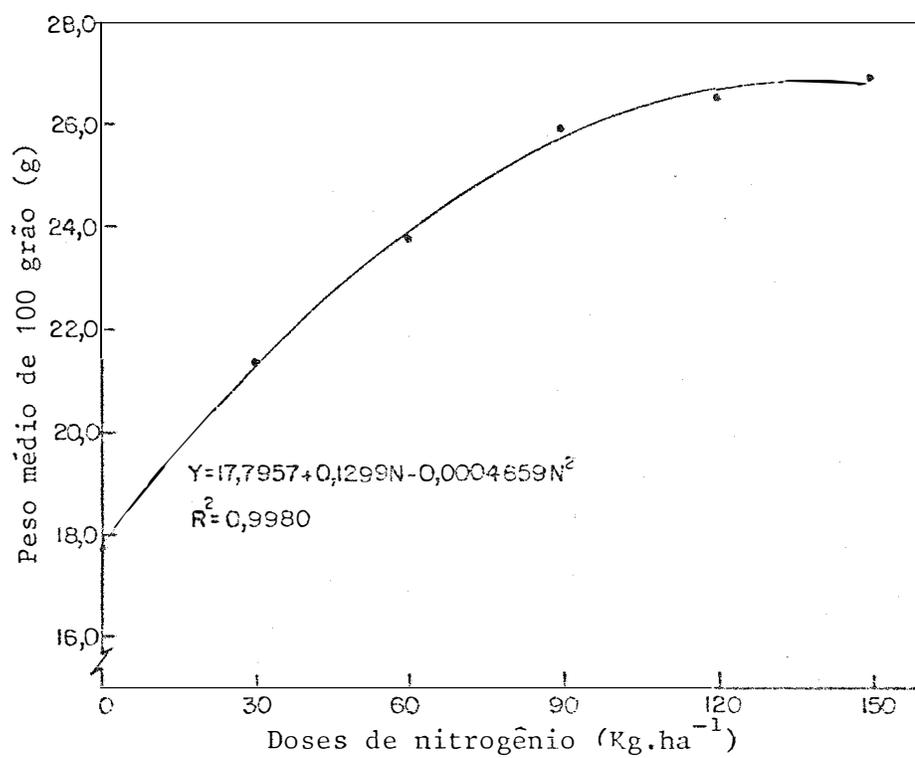


Figura 27 - Peso médio de 100 grãos em função das doses de nitrogênio.

Tabela 20 - Número médio de grãos por vagem, em função das lâminas totais de água e das doses de nitrogênio (Ilha Solteira, SP, 1982).

Lâminas totais de água (mm)	Doses de nitrogênio (Kg.ha <sup>-1</sup> )						Média
	0	30	60	90	120	150	
105	3,15	3,32	3,92	4,30	3,95	3,65	3,72
181	4,00	4,32	4,45	4,82	4,77	4,33	4,45
298	4,67	4,90	4,92	5,27	5,07	4,77	4,94
420	4,87	5,37	5,60	6,25	5,67	5,52	5,55
534	5,55	5,70	5,77	6,50	6,22	5,70	5,91
621	5,10	5,02	5,77	6,15	5,90	5,70	5,61
MÉDIA	4,56	4,78	5,08	5,55	5,27	4,94	5,03

lidade, para lâminas totais de água aplicadas e doses de nitrogênio, não havendo significância para interação entre estes fatores.

As equações de regressão ajustadas para o número médio de grãos por vagem, em função das lâminas de água e das doses de nitrogênio, são mostradas nas Figuras 28 e 29. Observou-se que o número médio de grãos por vagem aumentou com a aplicação de água e de nitrogênio, segundo uma relação quadrática. Segundo estas relações, o ponto de máximo para o número de grãos por vagem ocorreu para uma dose de nitrogênio estimada de 93,2 Kg.ha<sup>-1</sup> e ocorreria para uma lâmina total de água de 701,1mm, a qual situa-se fora dos limites estudados.

Tabela 21 - Resumo da análise de variância do número médio de grãos por va  
gem, em função das lâminas totais de água e das doses de nitrog  
gênio.

CAUSAS DE VARIACÃO	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Blocos	3	0,843	0,281	1,679
Lâminas de água (W)	5	82,823	16,565	99,003 **
Resíduo a	15	2,510	0,167	
Parcelas	23	86,176		
Doses de Nitrogênio (N)	5	14,969	2,994	18,117 **
Interação (WxN)	25	2,332	0,093	0,564 NS
Resíduo b	90	14,872	0,165	
TOTAL	143	118,349		

C.V. para parcelas = 8,13%

C.V. para subparcelas = 8,08%

\*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade

NS = não significativo.

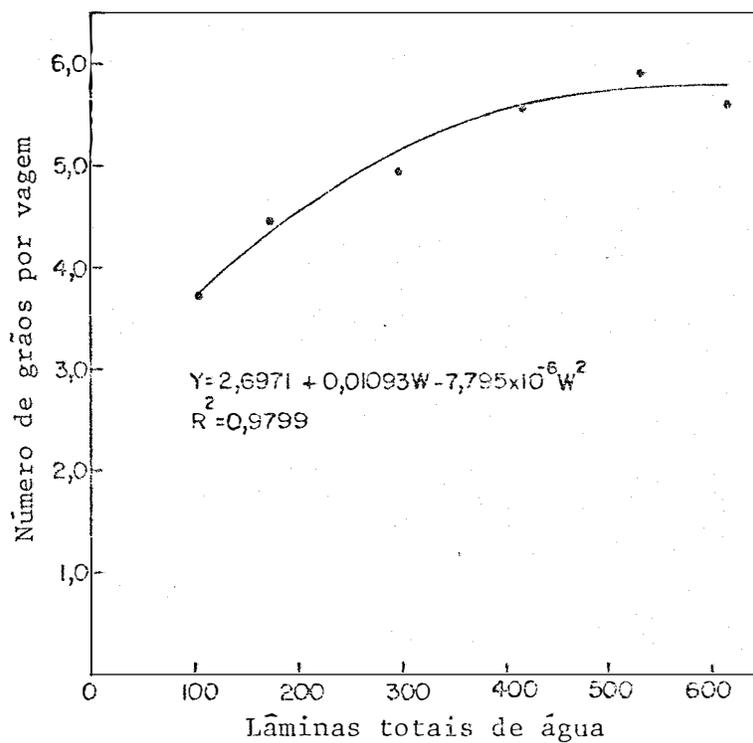


Figura 28 - Número médio de grãos por vagem em função das lâminas totais de água.

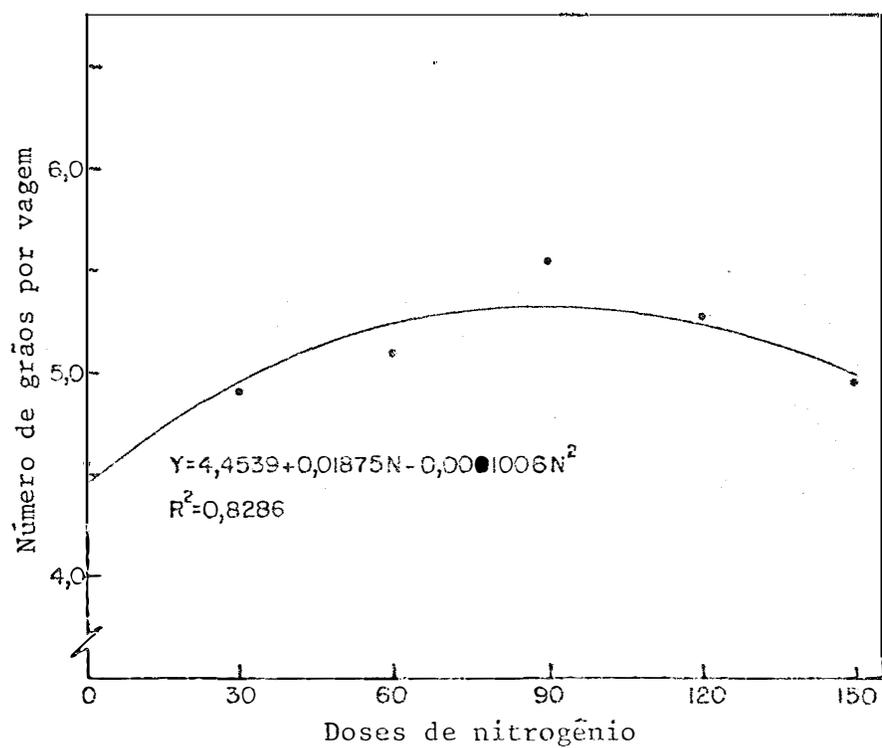


Figura 29 - Número médio de grãos por vagem em função das doses de nitrogênio.

## 4.7. NÚMERO DE VAGENS POR PLANTA

Na Tabela 22 estão apresentados os valores médios do número de vagens por planta, em função das lâminas de água e das doses de nitrogênio.

Tabela 22 - Número médio de vagens por planta, em função das lâminas totais de água e das doses de nitrogênio (Ilha Solteira, SP, 1982).

Lâminas totais de água (mm)	Doses de Nitrogênio (Kg.ha <sup>-1</sup> )					Média	
	0	30	60	90	120		150
105	3,97	5,90	8,80	9,40	10,32	10,00	8,07
181	4,55	7,02	9,50	10,60	11,30	10,80	8,96
298	5,10	7,95	10,37	11,62	11,95	11,50	9,75
420	5,72	8,52	11,10	13,45	13,12	12,25	10,70
534	5,87	8,70	12,52	12,92	12,87	12,75	10,94
621	5,60	7,75	11,30	11,82	12,65	12,50	10,27
MÉDIA	5,14	7,64	10,60	11,64	12,04	11,63	9,78

O resumo da análise de variância do número de vagens por planta, apresentado na Tabela 23, mostrou efeito significativo, ao nível de 1% de probabilidade, das doses de nitrogênio e das lâminas totais de água. Contudo não houve efeito significativo para a interação destes fatores.

As equações de regressão ajustadas para o número de vagens por planta, em função das lâminas totais de água e das doses de nitrogênio, são mostrados nas Figuras 30 e 31. Observou-se um acréscimo no número de

Tabela 23 -- Resumo da análise de variância do número de vagens por planta, obtido em função das lâminas totais de água e das doses de ni trogênio.

Causas de Variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Blocos	3	18,976	6,325	12,513
Lâminas de água (W)	5	144,812	28,962	57,295 **
Resíduo a	15	7,582	0,505	
-----				
Parcelas	23	171,371		
-----				
Doses de Nitrogênio (N)	5	930,699	186,140	204,004 **
Interação (WxN)	25	14,111	0,564	0,619 NS
Resíduo b	90	82,119	0,912	
-----				
TOTAL	143	1198,299		

C.V. para parcelas = 7,27%

C.V. para subparcelas = 9,76%

\*\* - significativo ao nível de 1% de probabilidade

NS = não significativo.

vagens por planta na presença da água e do nitrogênio. Este acréscimo foi segundo uma relação quadrática. Os valores máximos do número de vagens por planta foram estimados para uma lâmina total de água de 498,3 mm e para uma dose de nitrogênio de 126,1 Kg.ha<sup>-1</sup>.

Observando-se a variação do peso médio de 100 grãos, do número de grãos por vagem e do número de vagens por planta, em função das lâminas totais de água e das doses de nitrogênio, verifica-se que estes componentes da produção foram os responsáveis pelas variações no rendimento

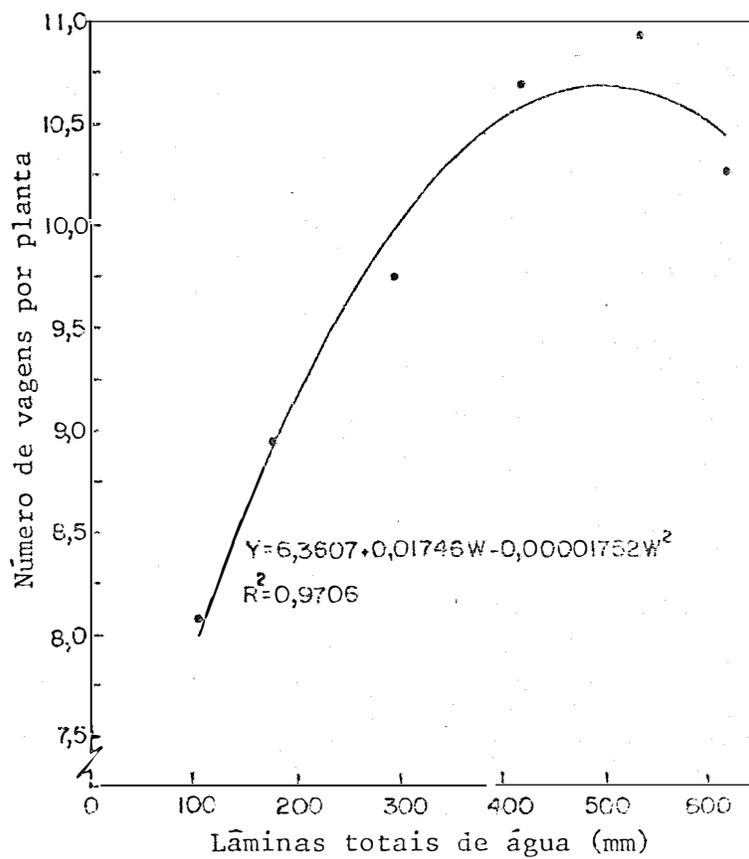


Figura 30 - Número médio de vagens por planta em função das lâminas de água.

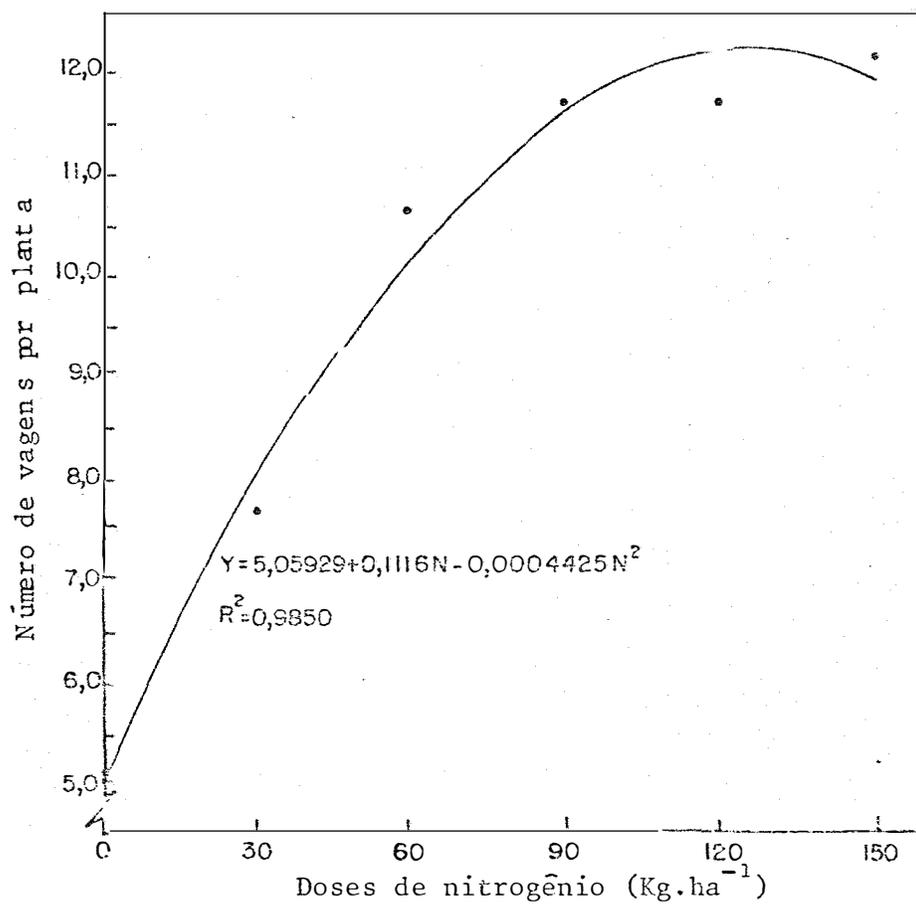


Figura 31 - Número médio de vagens por planta em função das doses de nitrogênio .

de grãos o qual apresentou comportamento semelhante. Os acréscimos no rendimento de grãos foram acompanhados pelos acréscimos nos seus componentes. Comportamentos similares foram relatados por TANAKA e FUJITA (1979).

#### 4.8. EFICIÊNCIA DE USO DE ÁGUA

Os valores médios da eficiência de uso de água, definida conforme a equação (13), estão apresentados na Tabela 24.

A comparação entre médias foi realizada pelo teste de Tukey, a um nível de probabilidade de 5%. Os resultados desta comparação de médias são mostrados na Tabela 24. Um resumo da análise de variância dos dados é apresentado na Tabela 25, revelando efeito altamente significativo para lâminas totais de água e para doses de nitrogênio. A interação entre estes fatores também foi significativa.

O Teste de F mostrou efeito altamente significativo ( $\alpha = 0,01$ ) para o desdobramento de todas as interações (Tabela 26).

Efetuarão-se todas as análises de regressão e o nível de significância das componentes das equações de regressão ajustadas estão representados nas próprias equações, através de asteriscos (Figuras 32 e 33).

Para uma dose de nitrogênio de  $90\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , onde foram observados os maiores valores da eficiência de uso de água, o valor máximo estimado desta variável ( $0,537\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) ocorreu para uma lâmina total de água de 349,7mm.

A Figura 32 mostra que a água foi usada mais eficientemente pelo feijoeiro à medida que se aumentou a dose de nitrogênio aplicada, até atingir um máximo a partir do qual decresceu a eficiência de uso da água. Este comportamento foi similar àquele encontrado para o rendimento de grãos, corroborando a assertiva de VIETS Jr. (1962) de que a eficiência de

Tabela 24 - Valores médios da eficiência de uso de água ( $\text{Kg.m}^{-3}$ ), em função das lâminas totais de água e das doses de nitrogênio (Ilha Solteira, SP, 1982).

LÂMINAS TOTAIS DE ÁGUA (mm)	DOSES DE NITROGÊNIO ( $\text{kg.ha}^{-1}$ )					MÉDIA
	0	30	60	90	120	
105	(A) 0,325 c	(AB) 0,336 b	(AB) 0,405 ab	(BC) 0,412 a	(AB) 0,423 a	(BC) 0,336 b (B) 0,370
181	(AB) 0,273 c	(AB) 0,352 b	(A) 0,423 ab	(AB) 0,478 a	(A) 0,461 a	(AB) 0,403 b (AB) 0,400
298	(AB) 0,283 c	(A) 0,414 b	(A) 0,477 ab	(A) 0,520 a	(A) 0,507 a	(A) 0,460 b (A) 0,440
420	(AB) 0,236 c	(A) 0,388 b	(A) 0,473 ab	(A) 0,534 a	(A) 0,518 a	(A) 0,463 b (A) 0,440
534	(BC) 0,185 c	(BC) 0,288 b	(A) 0,425 ab	(ABC) 0,468 a	(A) 0,449 a	(AB) 0,402 b (B) 0,370
621	(C) 0,126 c	(C) 0,217 b	(B) 0,320 ab	(C) 0,377 a	(B) 0,341 a	(C) 0,285 b (C) 0,280
MÉDIAS	0,240 c	0,330 b	0,420 ab	0,460 a	0,450 a	0,390 b 0,383

Obs. 1ª) Em cada série de médias na horizontal, os valores seguidos pela mesma letra minúscula, não diferem, significativamente, ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

2ª) Em cada série de médias na vertical, os valores seguidos pela mesma letra maiúscula entre parêntesis, não diferem, significativamente, ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Tabela 25 - Resumo da análise de variância para eficiência de uso de água, obtida em função das lâminas totais de água e doses de nitrogênio

CAUSAS DE VARIACÃO	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	
Blocos	3	0,002	0,001	0,185	**
Lâminas de água (W)	5	0,432	0,086	27,935	**
Resíduo a	15	0,046	0,003		
-----					
Parcelas	23	0,480			
-----					
Doses de Nitrogênio (N)	5	0,870	0,174	81,695	**
Interação (WxN)	25	0,094	0,004	1,757	*
Resíduo b	90	0,192	0,002		
TOTAL	143	1,635			

C.V. para parcelas = 14,53%

C.V. para subparcelas = 12,06%

\*\* = significativo ao nível de 1% de probabilidade

\* = significativo ao nível de 5% de probabilidade.

uso de água aumenta quando a aplicação de fertilizante produz um aumento no rendimento da cultura.

Observou-se também que, para as parcelas que não receberam adubação nitrogenada, a eficiência de uso de água decresceu linearmente com o aumento da lâmina total de água aplicada (Figura 33). Os menores incrementos na eficiência de uso de água, em função da aplicação de doses crescentes de nitrogênio, ocorreram para a menor lâmina total de água aplicada (Figura 32). Contudo, os menores valores da eficiência de uso de água ocor

Tabela 26 - Resumo da análise de variância para as interações entre lâmi  
nas totais de água e doses de nitrogênio.

CAUSAS DE VARIAÇÃO	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	
W/N <sub>0</sub>	5	0,105	0,021	9,156	**
W/N <sub>1</sub>	5	0,102	0,020	8,870	**
W/N <sub>2</sub>	5	0,065	0,013	5,680	**
W/N <sub>3</sub>	5	0,074	0,015	6,448	**
W/N <sub>4</sub>	5	0,082	0,016	7,197	**
W/N <sub>5</sub>	5	0,098	0,020	8,542	**
N/W <sub>0</sub>	5	0,041	0,008	3,819	**
N/W <sub>1</sub>	5	0,170	0,034	15,957	**
N/W <sub>2</sub>	5	0,244	0,049	22,873	**
N/W <sub>3</sub>	5	0,243	0,049	22,806	**
N/W <sub>4</sub>	5	0,151	0,030	14,218	**
N/W <sub>5</sub>	5	0,115	0,023	10,806	**

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade.

reram para a maior lâmina total de água aplicada; em todas as doses de ni  
trogênio. Valores intermediários de lâminas totais de água (420mm e 298mm),  
foram os que proporcionaram maiores eficiências de uso de água exceto para  
pequenas doses de nitrogênio.

Segundo BEGG e TURNER (1976), a cultura deve ser conduzida  
de forma a se conseguir uma máxima eficiência de uso de água. Entretanto  
este índice tem pouco significado como indicador econômico.

Em termos econômicos, pode-se propor uma eficiência de uso

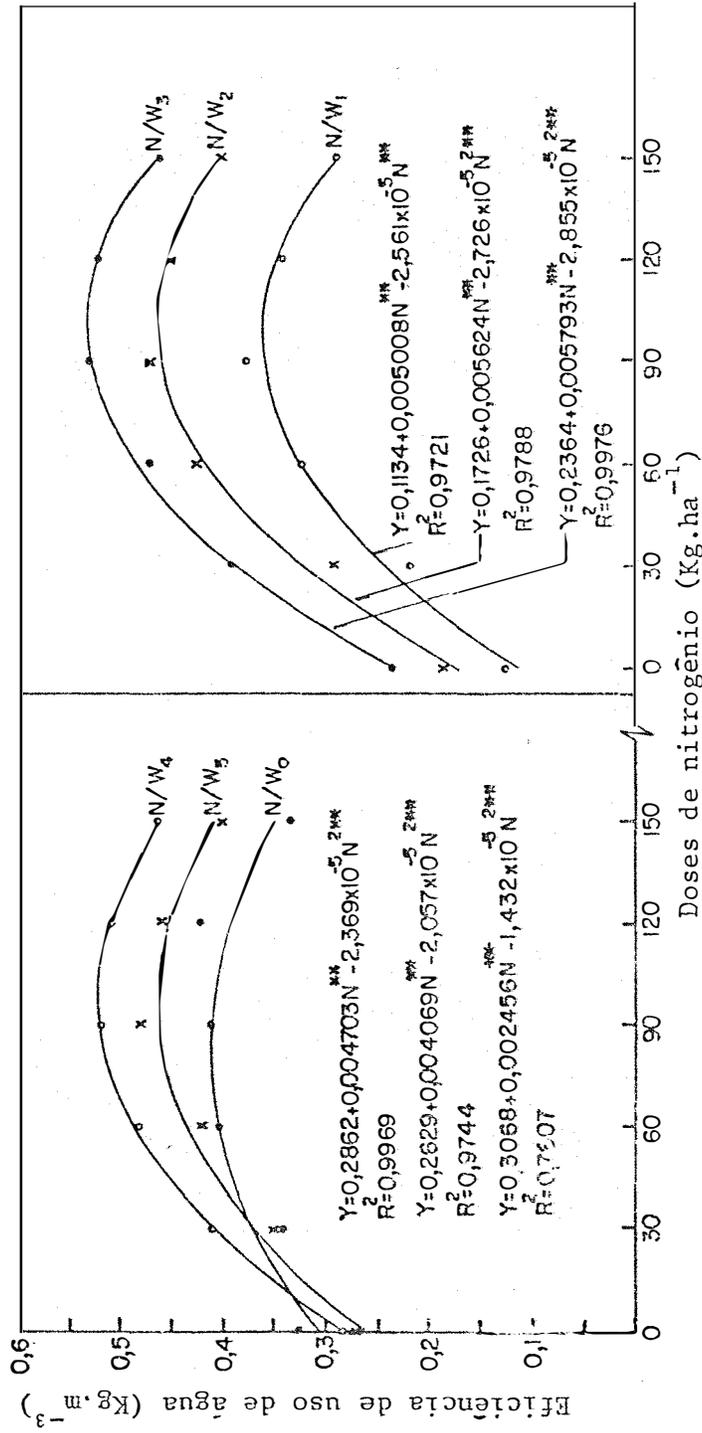


Figura 32 -- Eficiência de uso de água em função das doses de nitrogênio dentro das lâminas totais de água.

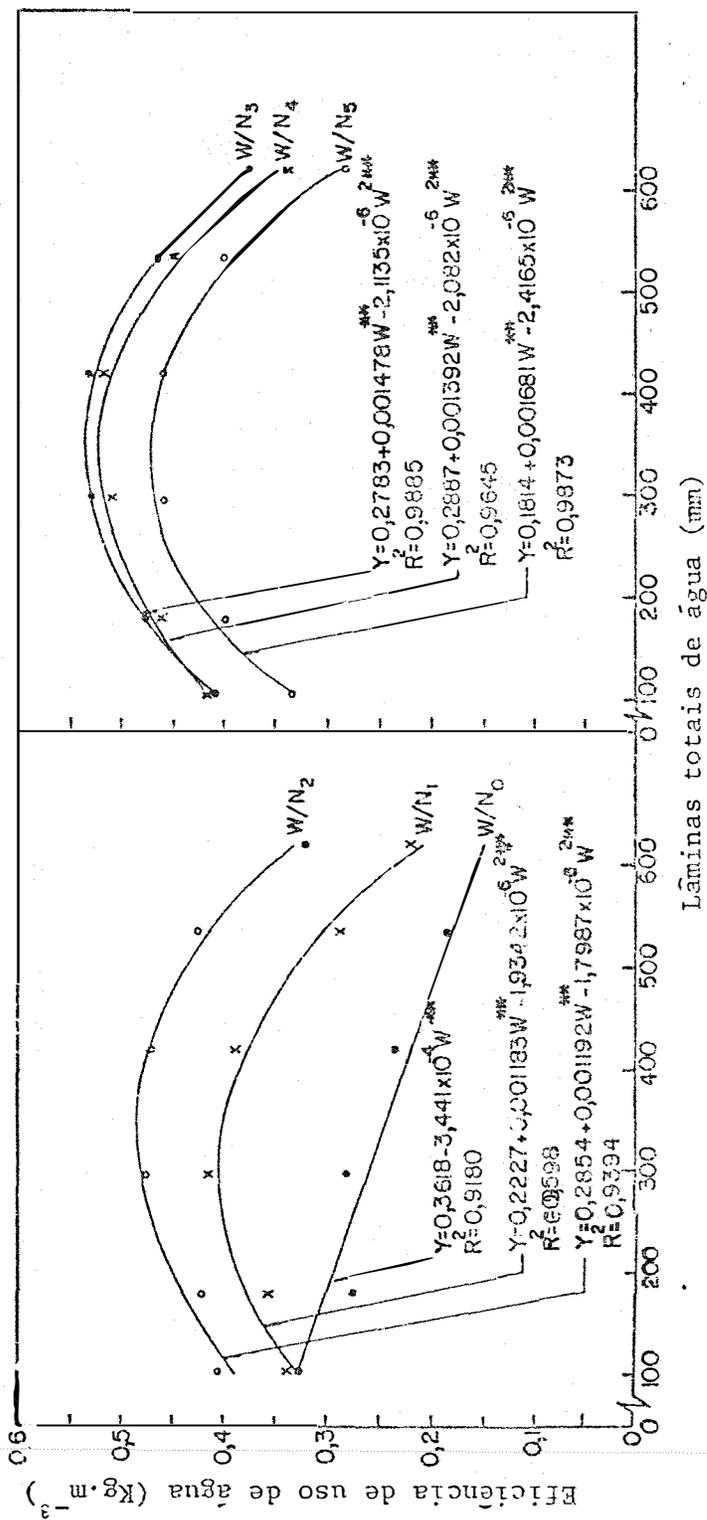


Figura 33 - Eficiência de uso de água, em função das lâminas totais de água dentro das doses de nitrogênio.

de água ( $EUA^*$ ), como sendo a relação entre o rendimento ótimo econômico ( $Y^*$ ) e a lâmina total de água ótima econômica ( $W^*$ ), ambos obtidos da função de produção (equação 41).

Como foi discutido anteriormente, os valores de  $W^*$ ,  $N^*$  e, conseqüentemente,  $Y^*$  dependem das relações  $P_w/P_y$  e  $P_n/P_y$ . Considerando os valores utilizados no item 4.4.5.7., isto é,  $P_w/P_y = 0,2$  e  $P_n/P_y = 0,4$ , foram obtidos  $N^* = 114\text{Kg.ha}^{-1}$ ,  $W^* = 556\text{mm} = 5560\text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$  e  $Y^* = 2.259,2\text{ Kg.ha}^{-1}$ . Desta forma, a eficiência ótima econômica de uso de água ( $EUA^*$ ) será de  $0,406\text{Kg.m}^{-3}$ , isto é, cada  $0,406\text{ Kg}$  de grãos deverá ser produzido com a aplicação de  $1\text{ m}^3$  de água, sendo a adubação nitrogenada aplicada a uma razão de  $11\text{Kg.ha}^{-1}$  de nitrogênio. Neste caso, os demais custos de produção foram admitidos como fixos. Observa-se que a máxima eficiência de uso de água nem sempre coincide com a eficiência ótima econômica de uso de água.

## 5. CONCLUSOES

Atendo-se às condições experimentais do presente trabalho e pela análise e discussão apresentadas, pode-se concluir:

- a) A aplicação de água aumentou o rendimento de grãos segundo uma relação quadrática, em todas as doses de nitrogênio aplicadas, sendo que o máximo rendimento estimado ( $2431,7\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) ocorreu para a dose de nitrogênio de  $90\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , com a aplicação de uma lâmina total de água estimada de 599,4 mm.
- b) A aplicação de doses crescentes de nitrogênio aumentou o rendimento de grãos segundo uma relação quadrática, exceto na menor lâmina total de água aplicada (105mm), onde não houve resposta do feijoeiro à adubação nitrogenada. O máximo rendimento de grãos estimado ( $2471,2\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) ocorreu

reu para a lâmina total de água aplicada de 534 mm e com uma dose de ni  
trogênio estimada de  $103,1 \text{ kg.ha}^{-1}$  .

- c) A análise conjunta dos fatores água e nitrogênio indicou que o máximo rendimento de grãos estimado ( $2261,8 \text{ kg.ha}^{-1}$ ) foi alcançado com a aplicação de 570,4 mm de água e  $117,4 \text{ kg.ha}^{-1}$  de nitrogênio.
- d) O máximo rendimento relativo de grãos foi obtido no regime de irrigação manejado a - 1,9 bar, correspondendo a uma frequência de irrigação de aproximadamente 6 dias.
- e) O peso médio de 100 grãos , o número médio de grãos por vagem e o número médio de vagens por planta aumentaram com a aplicação de água e nitrogênio, segundo uma relação quadrática, não sendo significativas as interações entre água e nitrogênio.
- f) A água foi usada mais eficientemente pelo feijoeiro à medida que se au  
mentou a dose de nitrogênio aplicada, tendo a eficiência de uso de água atingido um máximo ( $0,537 \text{ kg. m}^{-3}$ ) para uma dose de nitrogênio de  $90 \text{ kg.ha}^{-1}$  e uma lâmina total de água estimada de 349,7 mm.
- g) Para uma dada relação entre os preços da água e do produto, a maior lâ  
mina de água economicamente ótima ocorreu quando se aplicaram  $90 \text{ kg.ha}^{-1}$  de nitrogênio, demonstrando que neste nível de manejo da adubação nitro  
genada é possível obter a máxima receita líquida, desde que se utilize a correspondente lâmina de água economicamente ótima.
- h) Para uma dada relação entre os preços da água e do produto, a inviabili  
dade econômica da irrigação foi atingida mais rapidamente quando não se

usou a adubação nitrogenada, indicando que na ausência de nitrogênio, a água, unicamente, não viabiliza economicamente o sistema produtivo.

- i) Para uma dada relação entre os preços do nitrogênio e do produto, a máxima receita líquida pode ser atingida com a aplicação de uma lâmina total de água de 534 mm e com a correspondente dose de nitrogênio economicamente ótima.
- j) Para uma dada relação entre os preços do nitrogênio e do produto, a inviabilidade econômica da adubação nitrogenada foi atingida mais rapidamente na menor lâmina total de água aplicada, demonstrando que na ausência de quantidades adequadas de água, a adubação nitrogenada, unicamente, não viabiliza economicamente o sistema produtivo.
- k) Redução no capital disponível para aplicar em água e nitrogênio, implicou na redução dos valores ótimos econômicos da lâmina total de água e da dose de nitrogênio e, conseqüentemente, no nível ótimo de rendimento de grãos.
- l) Sem limitações quanto a capital disponível para aplicar em água e nitrogênio e para as relações  $P_n/P_y = 0,4$  e  $P_w/P_y = 0,2$ , a lâmina total de água ótima econômica foi de 556 mm, a dose de nitrogênio ótima econômica foi de  $114 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  e o correspondente rendimento de grãos foi de  $2259,2 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

## 6. LITERATURA CITADA

- ALMEIDA, L. D. de; E. A. BULISANI; P. B. GALLO e J. C. SABINO, 1982. Resposta de três cultivares de Feijoeiro à adubação nitrogenada. *In*: 1ª REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO, *Anais*, EMBRAPA-CNPAF, Goiânia . p. 184-187.
- ANÔNIMO, 1976. Revisão técnica. *Revista Brasileira de Armazenamento*, (0) : 25 -26.
- ARAGON, E. L. e S. K. De DATTA, 1982. Drought response of rice at different nitrogen levels using line source sprinkler system. *Irrigation Science*, 3: 63-73 .
- AZEVEDO, H. J. de, 1984. Efeito de diferentes lâminas de água e doses de adubação nitrogenada na cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* , L.).

Piracicaba, ESALQ/USP, 85p. (Dissertação de Mestrado).

BARLEY, K. P. , 1970. The configuration of the root system in relation to nutrient uptake. *Advances in Agronomy*, 22: 159 - 200.

BARRIOS, G. , 1966. Información preliminar sobre ensaios de rendimento de carota (*Phaseolus vulgaris*, L.), bajo condiciones de lluvia y riego. *Agronomia Tropical*, 16: 96 - 100.

BAUDER, J. W. ; R. J. HANKS e D. W. JAMES, 1975. Crop production function determinations as influenced by irrigation and nitrogen fertilization using a continuous variable design. *Soil Science Society of American Proceeding*, 39 : 1187 - 1191.

BEGG , J. E. e N. C. TURNER, 1976 Crop water deficits. *Advances in Agronomy*, 28: 161 - 217.

BERGER, P. G.; C. VIEIRA; J. M. CHAGAS e A. A. CARDOSO, 1982. Resposta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*, L.) à adubação nitrogenada e fosfatada. In: 1ª REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO, *Anais*, EMBRAPA - CNPAF, Goiânia. p. 178 - 181.

BERNARDO, S. , 1975. A computerized model to predict supplemental irrigation in tropical and subtropical climate. Logan, Utah, Department of irrigation Engineering, Utah State University, 155 p. ( Tese de Ph. D.).

BLACK, T. A. ; W. R. GARDNER e C. B. TANNER. 1970. Water storage and drainage under a row crop on a sandy soil. *Agronomy Journal* , 62 : 48 - 51.

BOX, G. E. P. , 1954. The exploration and exploitation of response surfaces: some general considerations and examples. *Biometrics*, 10 : 16 - 60.

- BULISANI, E. A. ; L. D. de ALMEIDA e S. ALVES, 1982. Resposta de cinco cultivares de feijão a níveis crescentes de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O em condições de campo. In: 1ª REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO, *Anais*, EMBRAPA - CNPAF, Goiânia. p. 187 - 189.
- CAMPOS, H. de, 1967. Aspectos da aplicação das superfícies de resposta à ensaios fatoriais 3<sup>3</sup> de adubação - Piracicaba, ESALQ/USP, 82 p. ( Tese de Livre-Docência ).
- CAROLUS, R. L. e P. E. SCHLEUSENER, 1970. Effect of irrigation on the yield of snap beans, sweet corn and tomatoes as influenced by certain cultural practices in 1949. *Michigan Quarterly*, 32: 465 - 478.
- CENTURION, J. F., 1982. Balanço hídrico da região de Ilha Solteira. *Científica*, 10: 57 - 61.
- CRANDALL, P. C. ; M. C. JENSEN ; J. D. CHAMBERLAIN e L. C. JAMES, 1967. Effect of row width and direction and mist irrigation on the microclimate of bush beans. *Horticultural Science*, 6: 345 - 347.
- DEMATÊ, J. L. I., 1980. Levantamento detalhado dos solos do "Campus" experimental de Ilha Solteira. Piracicaba, ESALQ/USP, 114 p.
- DENMEAD, O. T. e R. H. SHAW, 1959. Evapotranspiration in relation to the development of the corn crop. *Agronomy Journal*, 51: 725 - 726.
- DENMEAD, O. T. e R. H. SHAW, 1962. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. *Agronomy Journal*, 54: 385 - 390.
- DOOREMBOS, J. e A. H. KASSAN, 1979. *Crop response to water*. FAO, Irrigation and Drainage Paper, 33, Roma, 194 p.

- DOOREMBOS, J. e W. O. PRUITT , 1975. *Guidelines for predicting crop water requirements*. FAO , Irrigation and Drainage Paper , 24 , Roma, 179 p.
- DOSS, B. D. ; O. L. BENNET e D. A. ASHLEY , 1964. Moisture use by forage species as related to pan evaporation and net radiation. *Soil Science*, 98: 322 - 327.
- EAGLEMAN, J. R. e W. L. DECKER , 1965. The role of soil moisture in evapotranspiration. *Agronomy Journal*, 57: 626 - 629.
- ECKERT, J. B. ; N. M. CHAUDHRY e S. A. QURESHI , 1978. Water and nutrient response of semi-dwarf wheat under improved management in Paskistan: Agronomic and economic implications. *Agronomy Journal*, 70: 77 - 80.
- ENCARNAÇÃO, C. R. F. , 1979. Estudo da demanda de água do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*, L.) var. Goiano Precoce. Piracicaba , ESALQ/USP , 62 p. (Dissertação de Mestrado).
- FARIA, R. T. , 1981. Estudo da lâmina de irrigação na cultura do trigo (*Triticum aestivum* , L. ), utilizando o sistema de "aspersão em linha". Piracicaba, ESALQ/USP , 71 p. (Dissertação de Mestrado).
- FISCHER, V. J. e C. K. WEAVER , 1974. Flowering, pod set, and pod retention of Lima Bean in response to night temperature, humidity and soil moisture. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* , 99: 448 - 450.
- FRITSCHEN, L. J. e R. H. SHAW, 1961. Evapotranspiration for corn as related to pan evaporation. *Agronomy Journal*, 53: 149 - 150.
- FRIZZONE, J. A. ; CASSIANO SOBRINHO; M. E. de SÁ e S. BUZETTI , 1982. Efeito da irrigação e da adubação fosfatada sobre a produção de feijão (*Phaseolus vulgaris*, L.). In: 1ª REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO,

*Anais*, EMBRAPA/CNPAF, Goiânia. p. 169 - 172.

FUCHS, M. e G. STANHILL , 1963. The use of classe A evaporation pan data to estimate irrigation water requeriment of the cotton crop. *Israel Journal Agricultural Research*, 13 : 63 - 78 .

GALLO, J. R. e S. MIYASAKA, 1961. Composição química do feijoeiro e absorção de elementos nutritivos do florescimento à maturação. *Bragantia*, 20: 867 - 884.

GARRIDO, M. A. T. e A. H. TEIXEIRA , 1977. Efeito de diferentes níveis de umidade do solo sobre o rendimento do feijoeiro comum, na região sul de Minas Gerais. EPAMIG - BELO HORIZONTE. (Mimeografado).

GARRIDO, M. A. T. ; J. R. C. PURCINO e C. A. S. LIMA , 1979. Efeito do déficit de água em alguns períodos do ciclo de crescimento sobre o rendimento do feijoeiro comum. EPAMIG , Projeto Feijão, relatório 77/78 , Belo Horizonte. p. 25 - 27.

GUIMARÃES, C. M. ; S. STEINMETZ e T. A. P. e CASTRO, 1982. Uso de microlisímetros na determinação da evapotranspiração do feijoeiro da seca. In: 1ª REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO, *Anais*, EMBRAPA-CNPAF, Goiânia. p. 133 - 137.

HANKS, R. J. , 1974. Model for predicting plant yield as influenced by water use. *Agronomy Journal*, 66: 660 - 663.

HANKS, R. J. ; J. KELLER; V. P. RASMUSSEN e G. D. WILSON, 1976. Line source sprinkler for continuous variable irrigation - crop production studies. *Soil Science Society of American Journal*, 40: 426 - 429.

HAXEM, R. W. e E. O. HEADY , 1978. Water production function for irrigated

- agriculture. The Iowa State University Press. Ames, Iowa. 215p.
- HEADY, E. O. e J. PESEK, 1954. A fertilizer production surface with specification of economic optima for corn grown on calcareous ida silt loam. *Journal Farm Economics*, 36: 466 - 482.
- HILLEL, D. , 1972. The field water balance and water use efficiency. In : HILLEL, D. , ed. *Optimizing the soil physical environment toward greater crop yields*. Academic Press, New York and London, p. 79 -100.
- HILLEL, D. e Y. GURON , 1973. Relation between evapotranspiration rate and maize yield. *Water Resource Research* , 9: 743 - 748.
- HORNER, G. M. e M. MOJTEHEDI, 1970. Yield of grain legumes as affected by irrigation and fertilizer regimes. *Agronomy Journal*, 62: 449 - 450.
- HOWELL , T. A. e E. A. HILER , 1975. Optimization of water use efficiency under high frequency irrigation - I. Evapotranspiration and yield relationship. *Transactions of the ASAE*, 18: 873 - 878.
- INFORZATO , R. e S. MIYASAKA , 1963. Sistema radicular do feijoeiro em dois tipos de solo do Estado de São Paulo. *Bragantia*, 22: 477 -481.
- JANES, E. B. , 1948. The effect of varying amount of irrigation on the composition of two varieties of snap beans. *Proceeding of American Society for Horticultural Science*, 51: 457 - 462.
- JENSEN , D. e J. PESEK , 1959. Generalization of yield of equation in two or more variables. I. Theoretical considerations. *Agronomy Journal*, 51: 225 - 259.
- KALMA , J. O. e G. STANHILL , 1970. Meteorological indices, evapotranspiration and drainage losses in citrus plantation. Division Agricultural

Meteorology, Bet Dagan. 3p.

KATTAN , A. A. e J. M. FLEMING , 1956. Effect of irrigation at specific stages of development on yield , quality, growth and composition of snap beans. *Proceeding of the American Society for Horticultural Science*, 68: 329 - 342.

LIMA , C. A. S. ; R. MARINATO ; T. J. CAIXETA e M. S. FRANÇA DANTAS, 1978. Campo de observação de feijão irrigado II. EPAMIG, Projeto Feijão, relatório anual 75/6, Belo Horizonte.

LEMOMON , E. R. ; A. H. GLASER e L. E. SATTERWHITE , 1957. Some aspects of the relationship of soil plant, and meteorological factors to evapotranspiration. *Soil Science Society Proceedings*, 21: 464 - 468.

LUCHIARI Jr. , A. , 1978. Determinação do coeficiente de cultura ( $K_c$ ) para feijão (*Phaseolus vulgaris*, L.) pelo método do balanço hídrico . Piracicaba , ESALQ/USP, 59 p. (Dissertação de Mestrado).

MACHADO , J. R. ; C. A. ROSOLEM e J. NAKAGAWA , 1982. Adubação foliar do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* , L.): V - Estudo de doses e épocas de aplicação de adubo nitrogenado (URAM). In: 1ª REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO, *Anais*, EMBRAPA- CNPAF , Goiânia. p. 196-198.

MACK , H. J. e A. R. BONANNO , 1981. Water stress reduces bush beans and sweet corn yields. *Oregon Vegetable Digest*, 30: 1 - 2.

MAGALHÃES , A. A. de e A. A. MILLAR, 1978. Efeito do déficit de água no período reprodutivo sobre a produção do feijão. *Pesquisa Agropecuária brasileira*, 13: 55 - 60.

MAGALHÃES, A. A. ; A. A. MILLAR ; E. N. CHOUDHURY e M. M. CHOUDHURY, 1979.

Efeito do déficit fenológico de água sobre a produção do feijão  
*Turrialba*, 29: 269 - 273.

MALAVOLTA , E. , 1980. Elementos de nutrição de plantas. Editora Agronômica  
Ceres Ltda, São Paulo , 251 p.

MAURER , A. R. ; D. P. ORMROD e N. J. SCOTT , 1969. Effect of five soil  
water regimes on growth and composition of snap beans. *Canadian Journal  
of Plant Science*, 49: 271 - 278.

McMASTER , LE BARON, COREY, HAWTHORN e TOOLE , 1965. The influence of soil  
moisture on snap beans seed production. Idaho. *Agricultural Experiments  
Station. Bul.* 435. 15p.

MEIRELLES , N. M. F. ; P. L. LIBARDI e K. REICHARDT , 1980. Absorção e li-  
xiviação de nitrogênio em cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* , L. ).  
*Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 4: 83 - 88.

MILLER , D. F. e AN N. HANG , 1980. Déficit, high - frequency irrigation  
of sugar beets with the line source technique. *Soil Science Society of  
America Journal*, 44: 1295 - 1298.

MIRANDA , O. e C. BELMAR , 1977. Déficit hídrico y frecuencia de riego en  
frejol (*Phaseolus vulgaris* , L.). *Agricultura Técnica*, 37: 111 - 117.

MUIRHEAD , W. A. e J. G. WHITE , 1981. The influence of soil water poten-  
tial on the flowering pattern, pod set and yield of snap beans  
(*Phaseolus vulgaris* , L.). *Irrigation Science*, 3: 45 - 56.

MURATA , Y. , 1969. Physiological response to nitrogen in plants .In:  
EASTIN , J. D. ; F. A. HASKINS ; C. Y. SULLIVAN e C. H. M. VAN BAVEL ,  
ed. *Physiological Aspects of Crop Yield*. Madison , American Society of

- Agronomy , p. 235 - 259.
- NETTLES, F. V. , 1948. Two years results of the effect of several irrigation treatments on the yield of cabbage and snap beans. *American Society for Horticultural Science*, 51: 463 - 467.
- NIX , H. A. e E. A. FITZPATRICK , 1969. An index of crop water stress related to wheat and grain sorghum yields. *Agriculture Meteorology*, 6: 321 - 337.
- OLSEN , S. R. e W. D. KEMPER , 1968. Movement of nutrients to plant roots. *Advances in Agronomy*, 20: 91 - 151.
- PERI , G. ; W. E. HART e D. I. NORUM , 1979. Optimal irrigation depths a method of analysis. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 105 (IR4): 341 - 355.
- PORTES, T. de A. , 1981. Manual de métodos de pesquisa em feijão : Parâmetros fisiológicos e agrônômicos empregados na pesquisa com feijão (*Phaseolus vulgaris* , L.). Suplemento I, EMBRAPA , Centro Nacional de Pesquisa de arroz e feijão. 22p.
- REICHARDT , K. ; P. L. LIBARDI e J. M. SANTOS , 1974. An Analysis of soil-water movement in the field. II. Water balance in a snap bean crop. Piracicaba , CENA (Boletim Científico, nº 22).
- RICHARDS , L. A. , 1949. Methods of measuring soil tension. *Soil Science*, 68: 95 -112.
- RITCHIE , J. T. , 1973. Influence of soil water status and meteorological conditions on evaporation from a corn canopy. *Agronomy Journal*, 65:893-897.

- ROBINS , J. S. e C. E. DOMINGO , 1956. Moisture déficits in relation to the growth and development of dry beans. *Agronomy Journal*, 48: 67 - 70.
- SALTER , P. J. e J. E. GOCDE , 1967. *Crop responses to water at different stages of growth*. Bucks, England, Commonwealth Agricultural Bureaux - Farnham Royal. 24p.
- SCARDUA , R. , 1970. Evapotranspiração real da cultura do milho como base aos projetos de irrigação. Piracicaba, ESALQ/USP , 160p. (Tese de Doutorado).
- SILVA , M. A. da , 1978. Efeito da lâmina de água e da adubação nitrogenada sobre a produção de Feijão-de-Corda (*Vigna sinensis* , L. Savi) , utilizando o sistema de irrigação por "aspersão em linha". Viçosa , UFV . 49p. (Dissertação de Mestrado).
- SILVA , H. T. da , 1981. *Caracterização morfológica, agrônômica e fenológica de cultivares de feijão (Phaseolus vulgaris , L.) comumente plantadas em diversas regiões do Brasil*. EMBRAPA - CNPAF, Goiânia, 51p. (Circular Técnica nº 15).
- SILVEIRA , P. M. e L. F. STONE , 1979. Balanço de água na cultura do feijão em Latossolo Vermelho-Amarelo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 14: 111 - 115.
- SOUZA , J. A. D. , 1976. Estudo do consumo de água pela cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*). Piracicaba, ESALQ/USP (Dissertação de Mestrado).
- STANHILL , G. , 1961. A comparison of methods of calculating potential evapotranspiration from climatic data. *Israel Journal Agricultural*

*Research*, 11: 159 - 171.

STANSEL , J. R. e D. A. SMITTLE , 1980. Effects of irrigation regimes on yield and water use of snap bean (*Phaseolus vulgaris* , L.). *Journal American Society for Horticultural Science*, 105: 869 - 873.

STEWART , J. I. , 1972. Prediction of water production function and associated irrigation programs to minimize crop and profit losses due to limited water. Davis, California , University of California , 182p. (Tese de Ph. D.).

TANAKA , A. , 1969. Physiological response to nitrogen in plants : Discussion. In: EASTIN , J. D. ; F. A. HASKINS ; C. Y. SULLIVAN e C.H. M. VAN BAVEL , ed. *Physiological Aspects of Crops Yield* . Madison , American Society of Agronomy , p. 262 - 263.

TANAKA , A. e FUJITA , K. , 1979. Growth, Photosynthesis and yield components in relation to grain yield of the field bean. *Journal of the Faculty of Agriculture* , Hokkaido University, 59: 145 - 238.

TOSELO , R. N. , 1963. Irrigação do Feijão. *O agrônomo*, 15: 4 - 5.

VEIHMEYER , V. J. e A. H. HENDRICKSON , 1949. Methods of measuring field capacity and wilting percentage of soil. *Soil Science*, 68: 75 - 94.

VELEZ , E. P. e A. M. GARZA , 1978. *Respuesta en el rendimiento de los cultivos a diferentes niveles de humedad del suelo: Un enfoque metodológico de investigación*. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Colegio de Postgraduados. Chapingo , Mexico. 149p.

VIEIRA , C. , 1978. *Cultura do Feijão*. Imprensa Universitária, Universidade Federal de Viçosa , Viçosa (MG), 146p.

- VIEIRA , H. J. , 1984. Parâmetros hídricos e de crescimento de duas variedades de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* , L.) sob diferentes condições de disponibilidade de água no solo. Piracicaba, ESALQ/USP. 153p.(Dissertação de Mestrado).
- VIETS Jr. , F. G. , 1962. Fertilizers and the efficient use of water . *Advances in Agronomy* , 14: 223 - 265.
- VILLA NOVA , N. ; O. S. BACCHI e R. SCARDUA , 1978. Utilização do tanque Classe A na determinação da evapotranspiração real em cultura de cana-de-açúcar. 13p. (mimeografado).
- VITTUM , M. T. ; R. B. ALDERFER ; B. E. JANES ; C. W. REYNOLDS e R. A. STRUCHTEMEYER , 1963. *Crop response to irrigation in the Northeast*. New York State, Agriculture Experimental Station. Bulletin nº 800, 34p.
- YANG , S. J. e E. De JONG , 1972. Effect of aerial environment and soil water potential on the transpiration and energy status of water in wheat plants. *Agronomy Journal* , 64: 574 - 578.
- WRIGHT , J. L. , 1982. New evapotranspiration crop coefficients . *Journal of the Irrigation and Drainage Division* , 108: (IR 1): 57 - 74.