

MINISTERIO DA EDUCACAO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRAULICAS - IPH

VARIABILIDADE TEMPORAL DO SALDO POTENCIAL DE AGUA NO
SOLO, NA REGIAO DA BACIA DO RIO VACACAI

Vitor Emanuel G. TAVARES

Dissertação submetida ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia de
Recursos Hídricos e Saneamento
Ambiental, como requisito parcial
para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Nelson O. Luna CAICEDO

Dezembro / 1991

Porto Alegre - Rio Grande do Sul

BRASIL

RESUMO

O conhecimento do comportamento estatístico da água armazenada no solo é um dos fatores de maior importância na determinação das necessidades de irrigação e drenagem, em qualquer região.

Foi concebida, neste estudo, uma variável representativa do saldo potencial de armazenamento de água no solo, a nível mensal. O comportamento estatístico desta variável foi caracterizado pela análise de frequência de séries sintetizadas, a partir de modelos estocásticos.

As séries históricas empregadas no ajuste dos modelos estocásticos, foram obtidas através da aplicação de um balanço hídrico mensal, considerando diversas combinações de capacidades de armazenamento de água no solo e métodos de estimativa da evapotranspiração.

A metodologia foi aplicada a séries de dados coletados em postos climatológicos, situados na região da bacia do rio Vacacaí, na região central do estado do Rio Grande do Sul. Esta região foi escolhida em função da grande quantidade de dados disponíveis, distribuídos em séries que variam de 13 a 32 anos.

Os resultados obtidos podem ser utilizados para determinar as probabilidades de ocorrência de déficits e excessos hídricos, para combinações variadas de solo e cultura, na região estudada.

ABSTRACT

The knowledge of the statistical comportment of water stored in the soil is one of the most important factor to determine the necessities of irrigation and drainaige, in any region.

Therefore, in this work, a representative variable of the potential net water storage in the soil was developed, in a monthly period. The statistical comportment of this variable was characterized by the frequency analysis of generated series by stocastic models.

The historic data samples used to fit the stocastic models were obtained by application of a monthly water balance, considering several combinations of soil water storage capacity and evapo-transpiration estmative methods.

The metodology was applied to the data samples from climatological stations, located in the region of the Vacacaí river basin, at central region of Rio Grande do Sul State - Brasil. This region was chosen due to the large quantity of avaiable data records, distributed on series which vary from 13 to 32 years.

The obtained results can be used to estimate the probabilities of droughts and water excesses occurrence in multiple combinations of soil and plant, in the region analysed.

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

A Deus, pelo amparo constante e por tornar difícil a tarefa de agradecer a tantos que me auxiliaram.

Ao professor Nelson O.L. Caicedo, pela orientação, entusiasmo e confiança incondicionais.

Aos professores Lawson F.S. Beltrame e Raul Dorfman, pelos ensinamentos, mas principalmente pela amizade.

Aos demais professores do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), pela formação acadêmica e pelo apoio jamais negado.

Aos funcionários do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), pelo apoio e a amizade, que me possibilitou ter a sensação de estar sempre em casa.

Aos meus pais, pelos caminhos que me indicaram.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa - CNPq e à Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelas bolsas de estudo concedidas.

Ao Instituto de Pesquisas Agropecuárias - IPAGRO, ao Instituto Nacional de Meteorologia - INEMET e ao Departamento de Portos, Rios e Canais - DEPREC, pelo fornecimento dos dados.

A todas as pessoas que, das formas mais diversas, me auxiliaram na realização deste trabalho. Graças a Deus, foram muitas.

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 GENERALIDADES	1
1.2 OBJETIVOS DO ESTUDO REALIZADO	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 O CICLO HIDROLÓGICO	3
2.2 BALANÇO HÍDRICO DO SOLO	3
2.3 ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO	5
2.4 DEFICIT HÍDRICO	7
2.5 EXCESSO HÍDRICO	9
2.6 ANÁLISES DA VARIACÃO DA DISPONIBILIDADE DE ÁGUA	10
2.7 VARIABILIDADE TEMPORAL DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO	12
2.8 MODELO ESTOCASTICO	15
2.8.1 Generalidades	15
2.8.2 Tipos De Modelos	18
3. MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	27
3.2 INFORMAÇÃO DISPONÍVEL	29
3.3 ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA E PREENCHIMENTO DE FALHAS	30
3.3.1 Análise de Consistência	31
3.3.2 Substituição de Valores	38
3.4 SELEÇÃO FINAL	43
3.5 BALANÇO HÍDRICO	44
3.5.1 Armazenamento Mensal De Água	45
3.5.2 Saldo Potencial Mensal De Água	46
3.5.3 Capacidade De Armazenamento	47
3.5.4 Precipitação Efetiva	48
3.5.5 Evapotranspiração	48
3.6 AJUSTE DOS MODELOS	61
3.6.1 Generalidades	61
3.6.2 Identificação Do Modelo	61
3.6.3 Estimacão Dos Parâmetros	70
3.6.4 Checagem Diagnóstica	76
3.6.4 Geração De Séries Sintéticas	84

4. ANALISE DE FREQUÊNCIA	90
4.1 GRAFICOS DE AFTXCAXFREQUÊNCIA E DEFICIT HIDRICO.	93
4.2 GRAFICOS DE AFTXCAXFREQUÊNCIA E EXCESSO HIDRICO.	95
4.3 APRESENTAÇÃO PARCIAL DOS GRAFICOS DE AFTXCAXFREQUÊNCIA	96
Gráficos para o posto 1, com evapotranspiração estimada pelo método de thornthwaite.	97
Gráficos para o posto 2, com evapotranspiração estimada pelo método de blaney-criddle.	101
Gráficos para o posto 6, com evapotranspiração estimada pelo método de thornthwaite.	105
Gráficos para o posto 7, com evapotranspiração estimada pelo método de blaney-criddle.	109
Gráficos para o posto 12, com evapotranspiração estimada pelo método de makkink.	113
Gráficos para o posto 13, com evapotranspiração estimada pelo método de thornthwaite.	117
Gráficos para o posto 14, com evapotranspiração estimada pelo método de penman.	121
Gráficos para o posto 15, com evapotranspiração estimada pelo método de turc.	125
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.	129
6. BIBLIOGRAFIA	131
7. INDICE REMISSIVO DA BIBLIOGRAFIA.	137
ANEXO	A1

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Componentes de uma série temporal.	13
FIGURA 2 - Principais sub-bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul.	28
FIGURA 3 - Bacia do rio Vacacaí.	29
FIGURA 4 - Série mensal de precipitação, para o posto 12.	32
FIGURA 5 - Valores de insolação total mensal (IR), no posto 12, agrupados mês a mês, tendo a média mensal como referência.	34
FIGURA 6 - Valores padronizados de precipitação, para o posto 14, com linhas de referência em 2 e -2.	34
FIGURA 7 - Série mensal de Armazenamento Final Totalizado obtida pelo balanço hídrico, no posto 14, para as capacidades de armazenamento de 50, 100, 150 e 200mm, com evapotranspiração estimada pelo método de Thornthwaite.	53
FIGURA 8 - Série mensal de Armazenamento Final Totalizado obtida pelo balanço hídrico, no posto 14, para as capacidades de armazenamento de 50, 100, 150 e 200mm, com evapotranspiração estimada pelo método de Blaney-Criddle.	54
FIGURA 9 - Série mensal de Armazenamento Final Totalizado obtida pelo balanço hídrico, no posto 14, para as capacidades de armazenamento de 50, 100, 150 e 200mm, com evapotranspiração estimada pelo método de Penman.	55
FIGURA 10 - Série mensal de Armazenamento Final Totalizado obtida pelo balanço hídrico, no posto 14, para as capacidades de armazenamento de 50, 100, 150 e 200mm, com evapotranspiração estimada pelo método de Hargreaves.	58
FIGURA 11 - Série mensal de Armazenamento Final Totalizado obtida pelo balanço hídrico, no posto 14, para as capacidades de armazenamento de 50, 100, 150 e 200mm, com evapotranspiração estimada pelo método de Makkink.	59

FIGURA 12 - Série mensal de Armazenamento Final Totalizado obtida pelo balanço hídrico, no posto 14, para as capacidades de armazenamento de 50, 100, 150 e 200mm, com evapotranspiração estimada pelo método de Turc.	60
FIGURA 13 - Série mensal de Armazenamento Final Totalizado, no posto 14, para a capacidade de armazenamento de 100mm, com evapotranspiração estimada pelo método de Penman.	61
FIGURA 14 - Série mensal de Armazenamento Final Totalizado (Posto 14, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 100mm, Penman), relacionada à média.	62
FIGURA 15 - Valores mensais de Armazenamento Final Totalizado (posto 14, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 100mm, Penman), e estimativa de tendência.	63
FIGURA 16 - Valores mensais de Armazenamento Final Totalizado (posto 14, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 100mm, Penman), sem os 18 últimos valores, e estimativa de tendência.	63
FIGURA 17 - Valores de Armazenamento Final Totalizado (posto 14, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 100mm, Penman), agrupados mês a mês, em relação à média mensal.	64
FIGURA 18 - Gráfico de probabilidade normal para série de Armazenamento Final Totalizado (posto 14, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 100mm, Penman).	65
FIGURA 19 - Série mensal de Armazenamento Final Totalizado padronizada, no posto 14 (Capacidade de Armazenamento de 100mm)	66
FIGURA 20 - Valores de Armazenamento Final Totalizado padronizados (posto 14, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 100mm, Penman), agrupados mês a mês, em relação à média mensal.	67
FIGURA 21 - a) correlograma da série original de Armazenamento Final Totalizado (posto 14, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 100mm, Penman)	67

FIGURA 22 - a) correlograma da série padronizada de Armazenamento Final Totalizado (posto 14, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 100mm, Penman)	68
FIGURA 23 - Sucessivas etapas do processo de pesquisa do valor mínimo do Somatório dos Quadrados dos Resíduos, para um modelo ARMA(1,1) (posto 12, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 200mm, método de Makkink).	75
FIGURA 24 - Correlogramas estimados dos resíduos dos modelos AR(1), MA(1) e ARMAX(0,0)(0,1) (posto 15, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 150mm, Turc).	78
FIGURA 25 - Periodograma cumulativo dos resíduos do modelo AR(1) (posto 15, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 150mm, Turc).	79
FIGURA 26 - Periodogramas cumulativos dos resíduos dos modelos MA(1) e ARMAX(0,0)(0,1) (posto 15, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 150mm, Turc).	80
FIGURA 27 - Gráficos de probabilidade normal dos resíduos dos modelos AR(1), MA(1) e ARMAX(0,0)(0,1) (posto 15, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 150mm, Turc).	82
FIGURA 28 - Gráficos das funções de autocorrelação (FAC) e de autocorrelação parcial (FACP), para as séries histórica e gerada de Armazenamento Final Totalizado - posto 15	88
FIGURA 29 - Gráficos das séries histórica e gerada de Armazenamento Final Totalizado, com valores agrupados mês a mês - posto 15	89
FIGURA 30 - Gráfico de Armazenamento Final Totalizado x CAx Freqüência para o posto 15, com evapotranspiração estimada pelo método de Turc, no mês de dezembro.	93

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Postos incluídos na primeira seleção.	30
QUADRO 2 - Postos efetivamente empregados no estudo.	44
QUADRO 3 - Métodos aplicados em cada posto, para estimativa da evapotranspiração.	50

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Valores de X^2 para a série de Armazenamento Final Totalizado (posto 14, Capacidade de Ar- mazemamento de água no solo de 100mm, Penman).	64
TABELA 2 - Comportamento das funções de autocorrelação e autocorrelação parcial para um processo ARMA de ordem (p,q).	69
TABELA 3 - Características estatísticas das séries his- tórica e gerada de Armazenamento Final Tota- lizado - posto 15	87
TABELA 4 - Freqüência acumulada de Armazenamento Final Totalizado, no mês de dezembro, para a série gerada para o posto 15, com Capacidade de Ar- mazemamento de água no solo de 50mm e evapo- transpiração estimada pelo método de Turc.	91
TABELA 5 - Freqüência acumulada de Armazenamento Final Totalizado, no mês de dezembro, para a série gerada para o posto 15, com Capacidade de Ar- mazemamento de água no solo de 100mm e evapo- transpiração estimada pelo método de Turc.	91
TABELA 6 - Freqüência acumulada de Armazenamento Final Totalizado, no mês de dezembro, para a série gerada para o posto 15, com Capacidade de Ar- mazemamento de água no solo de 150mm e evapo- transpiração estimada pelo método de Turc.	92
TABELA 7 - Freqüência acumulada de Armazenamento Final Totalizado, no mês de dezembro, para a série gerada para o posto 15, com Capacidade de Ar- mazemamento de água no solo de 200mm e evapo- transpiração estimada pelo método de Turc.	92

1. INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

A premente necessidade de aumentar a produção de alimentos, confrontada com as limitações físicas existentes para a expansão da área cultivada, aponta para a necessidade de implementar técnicas, tais como a irrigação e a drenagem, que possibilitem a minimização das limitações climáticas que impedem a expansão e o melhor aproveitamento da área agrícola. Tais técnicas, entretanto, não devem ser utilizadas indiscriminadamente, mas sim levando em consideração aspectos como a viabilidade econômica, a existência dos recursos naturais indispensáveis e a comprovação técnica de que tais práticas são realmente necessárias e eficientes, para cada caso específico.

A prática da irrigação como forma de garantir e/ou incrementar a produtividade das lavouras é reconhecida desde há muito tempo, sendo que no Rio Grande do Sul sua utilização teve início no começo do século, com a implantação das primeiras lavouras de arroz irrigado. Desde então o Estado tem acumulado uma larga experiência na irrigação da lavoura orizícola. Tal experiência, no entanto, se manteve restrita à orizicultura até o final da década de setenta, quando a ocorrência de estiagens prolongadas e o agravamento da crise de combustíveis vieram demonstrar a conveniência de estender os benefícios da irrigação a outros cultivos, usualmente considerados de sequeiro, como feijão, soja, milho, sorgo, pastagens e hortaliças.

Atualmente evidencia-se um grande interesse no sentido de, cada vez mais, tornar a irrigação uma prática econômica e tecnicamente viável. Para tanto se faz necessário a realização de estudos específicos, para as diferentes regiões do Estado, que permitam estabelecer as reais necessidades de irrigação e/ou drenagem, a partir da determinação do comportamento temporal do armazenamento de água no solo. Neste sentido foram realizados alguns estudos, entre os quais destacam-se o "Balanço Hídrico do Rio Grande do Sul", realizado por MOTA et al. (1970); "Balanço Hídrico Seriado do Rio Grande do Sul", de BURIOL et al. (1977) e "Probabilidade de Ocorrência de Déficits e Excessos Hídricos em Solos do Rio Grande do Sul", de BELTRAME et al. (1979).

Nos estudos acima citados verifica-se a utilização de metodologias semelhantes para o cálculo do balanço hídrico, sendo que no terceiro estudo são avaliadas as probabilidades de ocorrência de

déficits e excessos hídricos, bem como suas intensidades, a partir de um ponto de vista edáfico.

As necessidades hídricas de cada região do Estado estão diretamente ligadas às características climáticas e de solo, bem como à sua variabilidade espacial, sendo, portanto, o solo e o clima fatores preponderantes em qualquer estudo que vise determinar necessidades de irrigação e/ou drenagem.

1.2 OBJETIVOS DO ESTUDO REALIZADO

Os trabalhos desenvolvidos neste estudo tiveram por objetivo:

- a- definir um balanço hídrico do solo para uma determinada área, para diferentes níveis de capacidade de armazenamento de água no solo e diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração;
- b- estabelecer uma variável representativa da variação da quantidade de água no solo, relacionável com eventos específicos, do tipo ocorrência de déficits e excessos de água no solo;
- c- determinar seqüências históricas de ocorrência da variável estabelecida, a partir do balanço hídrico definido e de dados climáticos da área considerada;
- d- ajustar modelos estocásticos que permitam gerar diversas séries sintéticas da variável estabelecida;
- e- estimar as probabilidades de ocorrência da variável estabelecida, considerando os valores contidos nas séries sintéticas, para cada combinação específica de capacidade de armazenamento e método de estimativa da evapotranspiração.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O CICLO HIDROLÓGICO

O ciclo hidrológico consiste na seqüência fechada de fenômenos naturais em que o globo terrestre cede água à atmosfera sob a forma de vapor e a recebe posteriormente sob a forma de precipitação, da qual parte escoar, parte infiltra e parte se acumula, sendo devolvida à atmosfera pela evapotranspiração.

Parte da água que chega à superfície terrestre sob a forma de precipitação é retida por interceptação nos vegetais, construções e outras superfícies impermeáveis. O restante vai atingir a superfície do solo, preenchendo suas depressões. A parcela que atinge o solo permeável ou semipermeável está sujeita à infiltração. A medida em que vai se esgotando a capacidade de retenção superficial do solo, cria-se um fluxo superficial que se desenvolve segundo os sentidos preferenciais de declividade, formando pequenos canais de drenagem (córregos, arroios, riachos, etc.). A água que infiltra vai preenchendo os espaços vazios entre as partículas do solo, aumentando o teor de umidade e diminuindo a capacidade de infiltração do solo, que no decorrer do tempo, atinge um valor mínimo constante. Após a saturação da camada superficial do solo, a água segue um movimento descendente até atingir o aquífero. O aumento do volume de líquido do aquífero gera o fluxo subterrâneo. A água que escoar é propagada até o canal principal, gerando vazão.

A incidência de energia solar radiante e as diferenças de potencial da água no solo, nas plantas e no ar, causam a retirada de água da superfície terrestre, pelo processo de evapotranspiração, fechando desta maneira o processo.

2.2 BALANÇO HÍDRICO DO SOLO

As técnicas de balanço hídrico constituem um meio de resolver importantes problemas hidrológicos teóricos e práticos. Através do balanço hídrico do solo é possível fazer a avaliação da quantidade de água existente no solo e de suas variações devido à ação dos agentes naturais ou do homem e, a partir daí, planejar as ações necessárias para o controle e redistribuição dos recursos hídricos no tempo e no espaço, a fim de contemplar as necessidades específicas da agricultura.

O estudo do balanço hídrico é a aplicação, em hidrologia, do princípio da conservação da massa, muitas vezes referido como a equação de continuidade. Esta afirma que, para qualquer volume arbitrário e durante qualquer período de tempo, a diferença entre a quantidade que entra e a quantidade que sai, será equilibrada pela variação da água armazenada no volume de controle.

Em geral, a parte do fluxo de entrada da equação do balanço hídrico compreende a precipitação (P), sob a forma de chuva recebida sobre a superfície do solo e o fluxo de entrada de água na superfície e no subsolo da bacia ou corpos d'água vindos de fora (Q_x e G_x). A parte do fluxo de saída da equação inclui a evaporação (E) e o fluxo de saída da superfície e do subsolo da bacia ou corpos d'água (Q_o e G_o). Quando o fluxo de entrada excede o de saída, o total de água armazenada (S) aumenta. Um fluxo de entrada menor que o de saída resulta em armazenamento decrescente. Todos os componentes do balanço hídrico estão sujeitos a erros de medição ou de estimativa e, portanto, a equação do balanço hídrico poderá incluir um termo divergente (n). Conseqüentemente, o balanço hídrico para qualquer corpo d'água e qualquer intervalo de tempo, em sua forma geral, poderá ser representado pela seguinte equação (ELETROBRAS, 1978):

$$P + Q_x + G_x - E - Q_o - G_o \pm DS \pm n = 0 \quad (1)$$

SEDIYAMA (1987) considera o balanço hídrico como um processo de contabilidade de água no solo. A precipitação e a irrigação representam as receitas, enquanto as perdas de umidade representam o débito a ser contabilizado. Qualquer quantidade de água acima da capacidade de campo representa um excesso e poderá ser, no caso, a percolação profunda ou o escoamento superficial. Assim, a representação do balanço hídrico do solo pode ser feita pela seguinte equação:

$$P + I - Q = ET + R \pm DS \quad (2)$$

onde:

P = precipitação (mm);

I = irrigação (mm);

Q = escoamento superficial (mm);

ET = evapotranspiração (mm);

R = percolação profunda (mm);

DS = variação do armazenamento d'água no perfil do solo (mm).

As leis que regem o balanço hídrico estão baseadas no princípio da conservação da matéria, ou seja, a água não pode ser criada nem destruída, somente mudar de um estado para outro, ou de uma posição para outra, através de processos naturais, ou artificiais. Dessa forma, a equação de balanço hídrico é composta por uma diversidade de termos, cuja significação varia de acordo com a situação em que será empregado o balanço. Cada termo do balanço terá

maior ou menor relevância de acordo com a situação para a qual será aplicada a equação. Por exemplo, no caso de um solo raso, com camada impermeável próxima à superfície, o termo referente à percolação (R) poderá ser negligenciado.

2.3 ARMAZENAMENTO DE AGUA NO SOLO

Parte da água que chega a uma determinada área, na forma de precipitação, infiltra-se no solo, que funciona como um reservatório de umidade. A retenção permanente ou temporária de umidade no solo fixa a fração da chuva que as culturas poderão utilizar.

Segundo um trabalho desenvolvido pelo INCRA (1973), a capacidade de retenção de água pelo solo é determinada por dois fatores: a) as características da superfície do solo e b) as características do perfil do solo.

As características da superfície do solo como declividade, cobertura vegetal, dispersão da estrutura e microrrelevo, influenciam a velocidade de infiltração. O perfil do solo, ou seja, a sucessão de camadas e suas características físicas vão determinar o volume de água que pode ser armazenado no solo e que poderá ser empregado na evapotranspiração. As propriedades físicas do solo (textura, estrutura, etc) afetam a capacidade de retenção. Solos de textura mais fina retêm água em maior quantidade que os de textura grosseira. Isto se deve à maior área superficial daqueles.

KLAR (1987) afirma que o conceito de água disponível é usualmente definido como sendo os conteúdos de água no solo compreendidos entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PM). A capacidade de campo corresponde a teores de umidade para os quais o potencial matricial da água no solo varia de -0,5 a -0,1 bar e o ponto de murcha permanente, a valores que giram em torno de -15 bar. Evidentemente tais limites têm significado para soluções práticas, porém, não o têm fisicamente, pois a capacidade de campo varia de acordo com a textura do solo, enquanto que o ponto de murcha varia muito com a espécie vegetal.

No trabalho realizado pelo INCRA (1973) a capacidade de armazenamento de água no solo é considerada uma característica típica de cada unidade de mapeamento de solo, sendo obtida pela seguinte relação:

$$CA = \frac{CC - PM}{100} \cdot da \cdot p \quad (3)$$

onde:

CA = capacidade de armazenamento (cm);

CC = porcentagem de água no solo correspondente à capacidade de campo;

PM = porcentagem de água no solo correspondente ao ponto de murcha;

da = densidade do solo;

p = profundidade efetiva do solo (cm).

No trabalho citado foi estimado um valor de 100mm para a capacidade de armazenamento de água nos solos da bacia do Vacacaí.

CAMPOS (1983) definiu a capacidade de campo como sendo equivalente ao conteúdo de água mantido no solo, após praticamente cessar o movimento gravitacional descendente da água, caracterizando, portanto, o final do processo de drenagem natural.

A capacidade de campo é uma característica particular de cada solo, sendo afetada por fatores como:

- textura do solo;
- estrutura do solo;
- conteúdo de matéria orgânica;
- profundidade da camada de solo acessível ao sistema radicular das plantas.

A capacidade de campo dificilmente se repete, inclusive ao mesmo determinador, embora no mesmo solo. Após a saturação do solo à uma profundidade apreciável, a drenagem se tornando negligenciável e a evaporação superficial evitada, tem-se o teor de umidade do solo correspondente à capacidade de campo (KLAR, 1987).

Observações feitas por LAUTER et al., *apud* CAMPOS (1983) mostraram que os limites do potencial matricial de água no solo, correspondentes à capacidade de campo, nunca são menores que -0,35 a -0,10 bar, isto é, o mínimo alcançado em solos saturados em cultivo. Por outro lado, há que considerar as propriedades de retenção e condutibilidade, que são específicas para cada combinação de solo e planta, tornando perigosas as generalizações com relação à disponibilidade de água. As variáveis envolvidas numa dada área devem ser cuidadosamente levantadas e detalhadas, para minimizar os efeitos da variabilidade espacial e alterações do estado natural do solo.

A água retida pelo solo é consumida pelas plantas através de forças derivadas das diferenças de potencial da água no solo, planta e atmosfera. A medida em que a umidade do solo diminui, aumenta a força com que a água é retida pelo solo.

Com a evolução do processo, é atingido um ponto onde o potencial de água no solo se iguala à tensão exercida pelas raízes. Nesse ponto cessa a absorção de água pela planta, sendo o teor de umidade remanescente no solo denominado ponto de murchamento, ou ponto de murcha.

A medida em que a água vai sendo absorvida pelas plantas e evaporada do solo, este a retém cada vez mais intensamente, fazendo com que mais energia seja despendida para retirá-la. Assim, há um intervalo menor do que aquele compreendido entre a CC e o PM, que

pode-se chamar de Intervalo de Água Facilmente Disponível, variável de acordo com a demanda evaporativa da atmosfera, com a curva característica de umidade no solo e com o vegetal envolvido (KLAR, 1987).

Em termos de balanço hídrico, o solo entra com a função de reservatório e para o cálculo da capacidade de armazenamento deste reservatório existe uma grande variedade de solos e diversas profundidades do sistema radicular possíveis de entrar no balanço. Levando em consideração que um grande número de valores de água disponível implicaria em um gasto excessivo de tempo para o cálculo dos balanços hídricos, o procedimento geralmente adotado é o de trabalhar apenas com alguns valores representativos das situações possíveis.

2.4 DEFICIT HIDRICO

A interpretação da expressão déficit hídrico pode basear-se em diferentes enfoques e, em conseqüência, possui diversos sinônimos que diferem entre si quanto ao seu significado. Assim, tem-se os termos seca, estiagem, seca hidrológica, seca agrícola, deficiência de umidade, etc.

HAVENS (1954) define seca de uma maneira bastante geral, como sendo uma falta de chuva suficientemente intensa e longa para prejudicar a vida animal e vegetal de um local e restringir o suprimento de água, tanto para fins domésticos como para subsistência das plantas, especialmente naquelas regiões onde as chuvas são, normalmente, suficientes para o suprimento de cada fim.

Diferentes conceitos de seca, variáveis de acordo com o observador, foram apresentados por YEVJEVICH (1967). Para um engenheiro, por exemplo, a seca será vista como um conjunto de variáveis que afetam as grandezas hidrológicas, como a precipitação, o escoamento superficial e o armazenamento de água em muitas formas. Já um economista vê a seca como uma variável que afeta as atividades humanas sob o ponto de vista econômico. O agrônomo, em contrapartida, relaciona a seca com as necessidades hídricas de cada cultivo, o que lhe permite avaliar que a ocorrência de uma seca para um cultivo como o tomate não signifique, obrigatoriamente, uma seca para um cultivo como a cana. Nesta filosofia diferenciam-se seca agrícola, seca no suprimento de água, para os peixes, vida silvestre, etc.

Alguns autores fazem distinção entre seca climatológica, seca agrícola e seca hidrológica. A primeira é definida, algumas vezes, como uma deficiência de umidade anormal e prolongada, enquanto que a segunda é dita ocorrer quando a umidade do solo é reduzida a um ponto capaz de reduzir consideravelmente o rendimento das culturas. A seca hidrológica é vista como um período durante o qual o suprimento de água é menor do que o mínimo necessário para a operação dos recursos hídricos de determinada região.

Para BURNASH & FERRAL (1973) a seca pode ser definida como uma deficiência anormal de umidade em relação às necessidades hídricas dos cultivos. Segundo estes autores, a seca, como definida, pode se verificar na zona superficial do solo ocupada pelas raízes, nas zonas mais profundas e no próprio suprimento de água.

Foi proposto por HERSHFIELD et al. (1973) que, como parâmetro de investigação de secas, fosse utilizada a frequência de dias sem precipitação, com suas propriedades estatísticas. Em sua definição é considerado dia seco aquele em que o total de precipitação é inferior a 0,25 polegada. Tal concepção possui propriedades estatísticas bem definidas, porém é muito deficiente, pois ignora fatores de grande importância, como a capacidade de armazenamento de água no solo e a evapotranspiração.

GUPTA & DUCKSTEIN (1975) definem secas extremas como sendo o máximo intervalo sem chuvas dentro de um espaço arbitrário de tempo.

O déficit máximo de umidade do solo foi considerado, por BELTRAME et al. (1979), como sendo igual à diferença entre os conteúdos de umidade na capacidade de campo e em um ponto onde a relação entre evapotranspiração real e evapotranspiração potencial é igual a zero, sendo este valor efetivamente igual à capacidade de armazenamento de água no solo.

Em um estudo sobre definições de seca DRACUP et al. (1980a) estabelecem um conjunto de considerações que devem ser feitas quanto à definição de secas. São elas:

- seleção da natureza do déficit hídrico a ser estudado (hidrológica, meteorológica ou agrícola);
- seleção do período normal usado para discretização das séries temporais contínuas (dia, semana, mês, ano);
- seleção do nível de distinção entre uma seca e outras ocorrências na série temporal;
- aspectos regionais da seca a ser considerada no estudo.

Para analisar o processo de recarga do lençol freático, ANDO et al. (1983) utilizaram um conceito de déficit de umidade do solo. O déficit de umidade do solo foi considerado como sendo a diferença entre a capacidade de campo e a umidade inicial.

SMART (1983) considera que o déficit hídrico inicia quando a evapotranspiração atual, que varia com o conteúdo de umidade do solo, começa a decrescer rapidamente em relação à evapotranspiração de referência.

Em sua definição objetiva de seca hidrológica YEVJEVICH (1967) cita que os principais fenômenos que devem ser considerados na análise de secas hidrológicas são:

- precipitação ao nível do solo;
- evaporação do solo, corpos d'água, plantas, etc;
- precipitação efetiva, na forma de precipitação menos evaporação;
- escoamento superficial;
- retenção de água em vários espaços de armazenamento, naturais ou artificiais.

Neste estudo não será empregada uma definição de seca ou de déficit hídrico, pois será empregada uma variável mais geral, cujo comportamento temporal poderá ser facilmente associado a qualquer conceito de déficit mensal geralmente empregado, para fins agrícolas.

2.5 EXCESSO HIDRICO

Cada espécie vegetal exige uma quantidade mínima de ar no solo, para que possa se desenvolver plenamente. Quando a fração do espaço poroso do solo que deveria ser ocupado pelo ar, para atender as necessidades de uma determinada cultura, é parcialmente ou totalmente ocupado pela água, tem-se a ocorrência de excesso hídrico.

O excesso de água no solo afeta a produção agrícola, atingindo não só o rendimento das culturas em si, mas também dificultando os trabalhos de preparo do solo, semeadura e colheita, além de causar problemas de sanidade para os animais (MATTOS, 1980).

A ocorrência de excesso hídrico pode se dar de duas formas distintas. Uma quando a taxa de precipitação ou irrigação excede a capacidade de absorção do solo, ocasionando acúmulo de água na superfície e/ou escoamento superficial. Outra, quando o volume de água que infiltra no solo excede a capacidade de armazenamento do mesmo, ocasionando percolação e, em alguns casos, acúmulo de água na superfície e/ou escoamento superficial.

MILLAR (1978) afirma que a magnitude dos danos provocados pelo encharcamento do solo sobre os rendimentos das culturas está diretamente relacionada com a duração do excesso hídrico, e que as culturas apresentam diferentes graus de tolerância ao excesso de umidade, sendo específico para cada planta.

O excesso de água no solo reduz as trocas gasosas entre o solo e a atmosfera. Assim, condições de excesso de umidade estão geralmente acompanhadas de deficiência em O_2 , o que causa uma redução da respiração e do volume total das raízes, um aumento da resistência no transporte de água e nutrientes na planta, e a formação de compostos tóxicos no solo e na planta. Isto causa a morte das células e até a morte das raízes. Os danos sofridos pela planta dependem de sua susceptibilidade às condições adversas do meio (CRUCIANI, 1983).

Outro problema relacionado com a ocorrência de excessos hídricos é o risco de salinização dos solos em função da proximidade

do nível freático e da superfície do solo, que é de pouca relevância para os solos do Rio Grande do Sul, devido às características climáticas do estado, que possui taxas de evaporação relativamente baixas, quando comparadas com as encontradas na região Nordeste.

Para MOTA et al. (1970) os excessos de água outonais, inverniais e primaverais são comuns em todo estado do Rio Grande do Sul, tornando-se um sério problema às culturas de inverno e primavera e àquelas cujo amadurecimento e colheita se dão no outono, mormente nas zonas de topografia plana.

BELTRAME et al. (1979) afirmam que os excessos hídricos máximos são uma função do volume de precipitação e não dependem da capacidade de retenção de água no solo.

De uma forma rigorosa, o conteúdo de umidade do solo a partir do qual inicia a ocorrência de excesso hídrico é função da espécie vegetal. Para fins práticos, no entanto, pode-se considerar que começa a ocorrer excesso hídrico quando o conteúdo de umidade do solo ultrapassa a capacidade de campo. Entretanto, deve-se notar que o arroz, por exemplo, se desenvolve plenamente em condições de total encharcamento do solo.

SMART (1983) trata como excesso hídrico o excesso de água nos poros do solo e acúmulo de água na superfície, definindo uma função de sobre-saturação "OS", como sendo o logarítimo de uma função do excesso de chuva: $OS = \log(1,0 + \text{excesso de chuva em milímetros})$.

2.6 ANÁLISES DA VARIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE ÁGUA

Vários trabalhos já foram realizados com a finalidade de determinar a variação da disponibilidade de água, geralmente relacionando-a com a ocorrência de déficits e excessos hídricos. Tais trabalhos variam entre si quanto à região de estudo, dados utilizados, metodologia empregada e precisão dos resultados.

VAN BAVEL (1953) realizou um estudo estatístico para avaliar riscos de secas em uma plantação de fumo. O autor procurou estimar qual a capacidade máxima de água que o solo pode armazenar, desde a capacidade de campo até o ponto no qual o crescimento da planta é apreciavelmente afetado. Estimou também a quantidade de água retirada do solo por evapotranspiração, partindo de dados climatológicos. Com estas estimativas e os dados diários de precipitação ele estimou o conteúdo de umidade do solo e sua variação. O estudo foi desenvolvido no sentido de determinar a frequência com que ocorrem dias secos, na concepção do autor, na plantação de fumo, para diferentes capacidades de armazenamento de água no solo.

MOTA et al. (1970) efetuaram um zoneamento agroclimático do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, utilizando o balanço hídrico de THORNTHWAITE & MATHER (1955), considerando um único valor de capacidade de armazenamento de água no solo, para todas as regiões meteorológicas consideradas. Todos os parâmetros envolvidos são parâmetros climáticos, sendo que a probabilidade de ocorrência dos eventos não é analisada estatisticamente.

HARGREAVES (1973) analisou as precipitações mensais de 234 locais do Ceará. O autor utilizou uma relação entre a precipitação com nível de probabilidade de ocorrência de 75% e a evapotranspiração potencial, como um índice de disponibilidade de umidade, para avaliar o potencial de produção da região.

BURIOL et al. (1977) realizaram um balanço hídrico seriado do Rio Grande do Sul. Todos os parâmetros envolvidos foram climáticos, sendo adotado um valor único de capacidade de armazenamento de água no solo para todos os postos meteorológicos. Nesse trabalho é feita uma contagem de déficits e excessos para intervalos pré-determinados. As deficiências são consideradas como secas meteorológicas, visto que as deficiências podem ser superiores à capacidade de armazenamento de água no solo.

SAINT-FOULC (1968) descreve um método gráfico para a realização de um estudo freqüencial de necessidade de irrigação, idealizado pelo Serviço Central de Hidráulica Agrícola de Engenharia Rural da França. Nesse estudo foram analisados os dados de um grande número de estações climatológicas da França metropolitana. Os resultados obtidos foram apresentados na forma de mapas de freqüência dos valores de necessidade de água. Através de um balanço hídrico foram calculados os déficits de umidade e para os valores de déficits encontrados foi realizada a análise de freqüência. Para este balanço o solo foi considerado como um reservatório, as precipitações como entrada e a evapotranspiração como saída.

BELTRAME et al. (1979) realizaram um trabalho com o objetivo de avaliar a probabilidade de ocorrência de déficits e excessos hídricos, bem como sua intensidade, em solos do Rio Grande do Sul. O trabalho foi realizado para onze unidades de mapeamento de solo, representativas das diferentes regiões climáticas do estado. Os autores utilizaram o balanço hídrico de THORNTHWAITE & MATHER (1955), considerando um valor de capacidade de armazenamento de água para cada unidade de mapeamento de solo. Foi considerado que o máximo déficit de umidade que poderia ocorrer seria igual à água armazenada no solo, entre os limites inferior e superior de umidade do solo.

AUDRY *apud* CAMPOS (1983) realizou um estudo para avaliação das conseqüências agrícolas da seca, através de um modelo baseado numa esquematização simplificada do balanço hídrico. Neste trabalho foram utilizados os dados diários de precipitação do posto pluviométrico de Quixeramobim. O modelo realiza um teste simples de sucesso ou fracasso, sendo o "sucesso" definido como um suprimento de água sem qualquer tipo de deficiência, cuja ocorrência é considerada como "fracasso".

KNETSCH et al. *apud* CAMPOS (1983) procuraram determinar a influência de dias secos na produção de milho para uma região do vale do Tennessee, utilizando um critério definido por Van Bavel. Para tanto, os autores coletaram os dados de 54 observações de produção, cobrindo um período de 8 anos em 6 locais diferentes. Como a influência da ocorrência de dias secos têm diferentes efeitos para as diferentes etapas de desenvolvimento do milho, os autores não consideraram como parâmetro o total de dias secos ocorridos durante o ciclo da cultura, mas dividiram o ciclo em quatro etapas.

CAMPOS (1983) propôs um estimador para períodos de recorrência de secas agrícolas, no estado do Ceará, pela aplicação do balanço hídrico a nível de solo. O estimador proposto é o número máximo de dias consecutivos, para cada ano, em que o solo mantém a umidade à disposição dos cultivos. As propriedades estatísticas do estimador foram estudadas em função do ciclo de umidade necessário. Foram calculados os períodos de retorno de ocorrências de secas para ciclos úmidos de 60, 90, 100 e 110 dias, para solos com reserva útil de 40, 80 e 120 mm. Em função da periodicidade de ocorrência de seca foi executado o zoneamento do estado para 41 localidades.

SMART (1983) idealizou um modelo conceitual de previsão de níveis de umidade do solo, onde as chuvas diárias e a evaporação representavam as entradas. As saídas do modelo foram utilizadas para determinação de frequência, duração e intensidade de déficits hídricos. A frequência foi definida pela probabilidade de uma estiagem iniciar em dado mês, a duração foi determinada por uma análise de extensão e a intensidade foi dada em termos de nível de umidade no solo. Os conteúdos de umidade foram previstos para uma camada superficial do solo, de 100 mm de espessura. O modelo foi aplicado em Canterbury, Nova Zelândia, utilizando os dados de 766 observações, num período de 5 anos. Os resultados do modelo não diferiram, estatisticamente, dos dados observados a um nível de significância de 5%. O modelo foi aplicado para duas profundidades de solo.

2.7 VARIABILIDADE TEMPORAL DO CONTEUDO DE AGUA NO SOLO

Condições específicas do conteúdo de água no solo são funções de parâmetros agroclimáticos e do solo. Os parâmetros de solo, ao contrário dos parâmetros agroclimáticos, não apresentam considerável variação com o tempo. Assim sendo, para caracterizar a variação temporal de déficits e excessos hídricos, basta caracterizar a variação dos parâmetros agroclimáticos e realizar a composição dos mesmos. Esta caracterização é feita, normalmente, de maneira estatística.

Para desenvolver um estudo estatístico a respeito de variáveis agroclimatológicas é necessário conhecer a natureza e o comportamento destas variáveis, bem como as características, peculiaridades e aplicabilidade dos métodos estatísticos disponíveis.

Geralmente os dados hidrológicos não são nem puramente determinísticos, nem puramente estocásticos. Muitos registros possuem tanto componentes determinísticos como componentes estocásticos.

A consideração mais empregada é a de que uma variável hidrológica X pode ser separada em componentes que representem a periodicidade x_1 , eventos extremos x_2 , a tendenciosidade x_3 , e um componente randômico x_4 , como segue:

$$X = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \quad (4)$$

KISIEL (1969) ilustrou esta consideração da maneira apresentada na Figura 1.

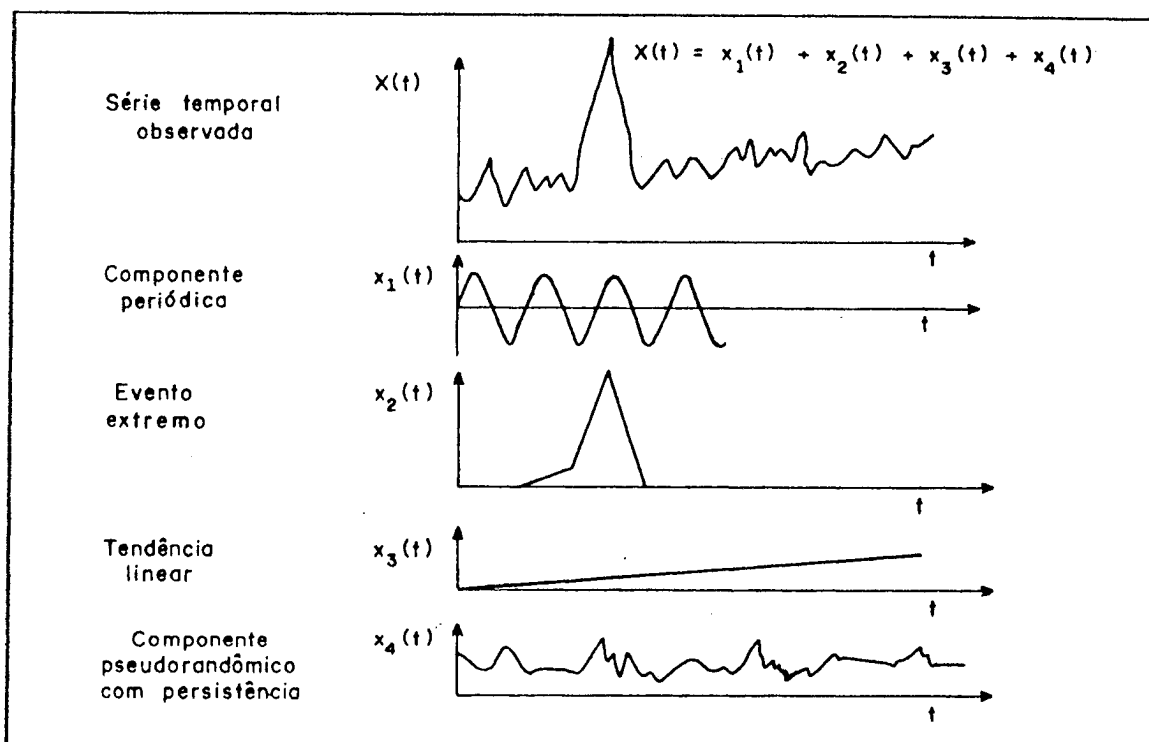


FIGURA 1 - Componentes de uma série temporal.

O dimensionamento de projetos de irrigação exige o conhecimento de fatores relativos ao solo, clima, topografia, cultura, etc. DORFMAN (1982) mostrou um caso em que os dados de solo podem ser considerados determinísticos. Neste caso, pode-se assumir que o uso de água na irrigação será apenas uma função da variação estocástica do clima local.

DORFMAN (1986), em um trabalho sobre planejamento de sistemas de irrigação em condições de dados escassos, afirma que as informações climáticas possuem o papel mais relevante na análise de um projeto de irrigação. Observa, ainda, que as informações climáticas são dependentes em relação ao tempo, sendo que o principal valor para o desenvolvimento de um projeto de irrigação é a quantidade máxima de água necessária, descrita como uma função da capacidade de armazenamento de água no solo, evapotranspiração e precipitação. Esta quantidade seria representada pela deficiência de água, que neste caso também é dependente em relação ao tempo. Nesse trabalho foram utilizados modelos para criar séries temporais de demanda de água, baseados nos modelos adaptados de análise de escoamento superficial, desenvolvidos por SALAS & SMITH (1978) na Colorado State University. Um modelo analisa os dados de entrada e define um modelo adequado de simulação para o balanço hídrico sintético, enquanto um outro estende os balanços hídricos sintéticos.

GUPTA & DUCKSTEIN (1975) realizaram uma análise estocástica da duração de secas extremas, definidas como o máximo intervalo seco entre dois processos de chuva. A seqüência de intervalos sem chuva, dentro de um espaço de tempo arbitrário, como o de duração do ciclo vegetativo de uma cultura, fornece informações úteis à investigação

de secas agrícolas. Segundo os autores, devido à estocacidade inerente à natureza dos fenômenos de precipitação, as várias seqüências de variáveis de interesse são descritas como variáveis aleatórias.

A natureza do ciclo hidrológico indica que períodos de pequena precipitação, pequeno escoamento superficial e baixo conteúdo de umidade no solo podem estar intimamente relacionados. Sendo assim, de certa forma o comportamento estatístico do escoamento superficial e, conseqüentemente, o do escoamento em cursos d'água, pode estar relacionado, de alguma maneira, com o comportamento estatístico do conteúdo de umidade do solo (DRACUP et al., 1980b).

SEN (1980) fez algumas considerações teóricas a respeito da análise de freqüência regional de secas e cheias com base em campos randômicos. A descrição da seca regional é abordada através de: área do déficit, área total do déficit e intensidade máxima do déficit. O autor afirma que as quantias hidrológicas devem ser consideradas aleatórias, pois não podem ser previstas com certeza.

O caráter estocástico das variações do conteúdo de água no solo e, conseqüentemente, das ocorrências de déficits e excessos hídricos, se deve à natureza estocástica das variáveis que determinam tais variações, seja de maneira direta ou indireta.

Um modelo estocástico de geração de dados de temperatura e radiação solar foi desenvolvido por NICKS & HARP (1980). Os dados gerados foram comparados com a série histórica e se mostraram satisfatórios, representando os dados observados em 11 meses, entre 12. A evapotranspiração mensal, calculada com base nos dados diários simulados de temperatura e radiação solar, não diferiu estatisticamente da evapotranspiração média mensal calculada a partir dos dados observados.

CORDOVA & BRAS (1981) afirmam que o controle da irrigação em tempo real, em áreas de chuvas esparsas, requer uma descrição probabilística da infiltração, umidade do solo e evapotranspiração atual. Os autores desenvolveram uma função densidade de probabilidade do volume de água infiltrada, como uma função de parâmetros climáticos e de solo. Esta entrada estocástica é usada com um modelo físico-conceitual do processo de depleção do conteúdo de água no solo, para derivar expressões analíticas das probabilidades de transição da umidade do solo em um dado período de tempo, e os primeiros dois momentos da evapotranspiração atual associada. Os autores concluíram pela adequação das entradas estocásticas no modelo de balanço hídrico do solo e que o comportamento probabilístico da umidade do solo e da evapotranspiração está relacionado exclusivamente com as plantas, as características físicas do solo e o clima.

Um estudo histórico estatístico a respeito da ocorrência de secas no México e suas conseqüências, foi realizado por CERVERA & ARIAS (1981). Os autores dividiram o período analisado em quatro fases. O estudo foi realizado para cada fase, sendo também apresentada uma análise estatística das precipitações.

RICHARDSON (1981) apresenta uma metodologia para gerar longas séries de precipitação diária, temperaturas máximas e mínimas e radiação solar. A precipitação é gerada independentemente das outras variáveis pelo uso de um modelo exponencial de Markov. As outras três variáveis são geradas pelo uso de um modelo multivariado, com as médias e desvios padrão das variáveis sendo condicionados ao estado de seco ou úmido do dia, determinado pelo modelo de precipitação. Toda a simulação foi feita baseada na estrutura estocástica do processo meteorológico.

BRAS & CORDOVA (1981) realizaram um estudo visando determinar a alocação temporal ótima da água de irrigação. Para tanto, os autores consideraram a variação estocástica intra-sazonal do requerimento de água da cultura e a dinâmica do processo de depleção da água do solo. As expressões das probabilidades de transição da umidade do solo, em um dado período de tempo, e os dois primeiros momentos da evapotranspiração atual associada, foram derivadas analiticamente. Um algoritmo de programação dinâmica estocástica foi usado para determinar o controle ótimo da irrigação, condicionado ao conteúdo de água do solo.

SMART (1983) utilizou procedimentos estatísticos para avaliar os conteúdos de umidade do solo obtidos por um modelo conceitual de balanço hídrico. Foram determinadas a frequência, duração e intensidade das secas obtidas.

Um dos estudos mais interessantes a respeito da variação estocástica do conteúdo de umidade do solo e sua relação com as necessidades de irrigação, foi realizado por ABDITIZ et al. (1986). Os autores desenvolveram uma metodologia para estimar e prever a depleção da água no solo e a evapotranspiração da cultura, com a consideração explícita dos erros de modelação e entradas estocásticas. O balanço hídrico de um campo irrigado e um modelo da série temporal para a evapotranspiração de referência da cultura, foram formulados na forma espaço-estado, sendo a depleção da umidade do solo e a evapotranspiração de referência as variáveis de estado. O filtro de Kalman é utilizado para gerar estimativas e previsões das variações de estado, junto com a informação estatística a respeito dos erros a elas associados. Os testes de validade e a calibração do modelo são feitos com dois conjuntos independentes de dados de locais do Colorado (U.S.A.). Cada conjunto inclui vários anos de dados de evapotranspiração de referência da cultura, calculados a partir de observações climatológicas, uma estação de valores medidos de umidade do solo, e as aplicações de irrigação concorrentes.

2.8 MODELO ESTOCÁSTICO

2.8.1 Generalidades

As definições e representações relativas aos modelos estocásticos, que serão apresentadas a seguir, visam mais esclarecer quais caminhos foram seguidos na condução do presente estudo, que esclarecer os princípios teóricos e seu desenvolvimento conseqüente, que, aliás, já está fartamente documentado na literatura pertinente.

Dessa forma, a representação de processos lineares como somas de infinitos termos, por exemplo, e outros tópicos similares não são apresentados.

a. Aplicabilidade

Os registros ao longo do tempo de medições de alguns processos hidrológicos constituem as séries temporais. Um dos objetivos da análise de séries temporais é identificar os mecanismos que originam os diferentes valores ao longo do tempo. Esta identificação nunca é perfeita, devido às características próprias dos processos. Entretanto, durante a formulação de um modelo para um fim específico, todo esforço é feito no sentido de preservar aquelas propriedades que são relevantes para os problemas em pauta. Para isto, devem ser identificados os principais parâmetros relativos àquelas propriedades e obter, então, os melhores estimadores possíveis destes parâmetros, com base na história do fenômeno.

A modelação de séries hidrológicas apresenta duas aplicações principais, que são a geração de séries hidrológicas sintéticas e a previsão do comportamento futuro de séries hidrológicas.

Segundo BRAS & RODRIGUEZ-ITURBE (1985) a geração de séries hidrológicas sintéticas foi popularizada no início da década de 60 e seu objetivo é produzir um conjunto de séries igualmente verossímeis, que sejam estatisticamente indistinguíveis dos dados históricos. Estas séries mostram muitas condições hidrológicas possíveis, que não aparecem explicitamente no registro histórico.

b. Distinção entre modelo estocástico e determinístico

Se quaisquer das variáveis envolvidas em uma função que descreva o comportamento de um sistema hidrológico são consideradas como variáveis randômicas, com distribuições em probabilidade, então o modelo que descreve este sistema é um modelo estocástico. O termo "estocástico", melhor do que o "estatístico", enfatiza a dependência temporal das variáveis hidrológicas relacionadas pelo modelo. Se, entretanto, todas as variáveis são consideradas isentas de variação randômica, tanto que nenhuma é considerada como possuidora de distribuição em probabilidade, então o modelo é considerado determinístico (CLARKE, 1973).

Para CHOW (1964), se a chance de ocorrência das variáveis envolvidas em um processo é ignorada e o modelo segue uma lei definida de certeza, mas não alguma lei de probabilidade, o processo e seu modelo são ditos determinísticos. Por outro lado, se a chance de ocorrência das variáveis é levada em consideração e o conceito de probabilidade é introduzido na formulação do modelo, o processo e seu modelo são ditos estocásticos ou probabilísticos.

c. Estacionaridade.

Quando o processo permanece em equilíbrio em torno de um nível médio constante, é dito ser estacionário (BOX & JENKINS, 1976).

Para BOX & JENKINS (1976) os processos estacionários formam uma classe muito especial de processos estocásticos, que se caracterizam por se apresentarem em um estado particular de equilíbrio estatístico. Um processo estocástico é dito ser estritamente estacionário se suas propriedades não são afetadas por alterações do tempo inicial (ponto de partida) da análise do processo, ou seja, se a distribuição de probabilidade conjunta associada a m observações $z_{t_1}, z_{t_2}, \dots, z_{t_m}$, feitas em um conjunto qualquer de tempos t_1, t_2, \dots, t_m , é a mesma associada a m observações $z_{t_1+k}, z_{t_2+k}, \dots, z_{t_m+k}$, feitas nos tempos $t_1 + k, t_2 + k, \dots, t_m + k$. Assim, para um processo discreto ser considerado estritamente estacionário, é necessário que a distribuição conjunta de qualquer grupo de observações não seja alterada por avanços ou recuos dos tempos de observação em um valor inteiro k .

KOTTEGODA (1980) ressalta que o conceito de estacionaridade deve ser aplicado de maneira relativa, pois na prática não ocorre uma verdadeira estacionaridade. Dessa forma, um processo estritamente estacionário é um conceito matemático e para propósitos práticos e analíticos é necessário restringir a idéia de estacionaridade somente à média e à variância. Dentro deste enfoque mais amplo é que surgem as chamadas séries estacionárias de segunda ordem.

d. Avaliação da estrutura de dependência temporal.

A suposição de estacionaridade também implica que a distribuição de probabilidade conjunta $p(z_{t_1}, z_{t_2})$ é a mesma em todos os intervalos de tempo t_1, t_2 que são intervalos constantes separados. Segue daí, que a natureza desta distribuição conjunta pode ser inferida através de um gráfico onde são locados os pares de valores (z_t, z_{t+k}) da série temporal, separados por um intervalo constante ou *retardo* k . A covariância entre z_t e z_{t+k} , separados por k intervalos de tempo, é chamada de *autocovariância* de retardo k (c_k) e pode ser estimada pela expressão

$$c_k = (1/N) \cdot \sum_{t=1}^{N-k} (z_t - \hat{\mu}_z)(z_{t+k} - \hat{\mu}_z) \quad (5)$$

em que $\hat{\mu}_z$ é a média estimada da série temporal.

Se o processo é estacionário, então a variância $\sigma_z^2 = c_0$ é a mesma para o tempo t e para o tempo $(t+k)$. Dessa forma, o coeficiente de correlação entre z_t e z_{t+k} , denominado *autocorrelação* de retardo k , é estimado por

$$r_k = c_k / c_0 \quad (6)$$

o que implica em que $r_0 = 1$.

A construção de um gráfico que relacione o coeficiente de autocovariância c_k com o retardo k é denominado de função de autocovariância. Da mesma forma, um gráfico que relacione o coeficiente de autocorrelação r_k com o retardo k é denominado função de autocorrelação, também conhecida por *correlograma*. Sendo $r_k = r_{-k}$, a função de autocorrelação é obrigatoriamente simétrica em torno de zero, tornando desnecessária a apresentação de sua porção negativa.

Segundo BOX & JENKINS (1976) um processo estacionário representado pela variável normalmente distribuída z_t é completamente caracterizado por sua média μ e sua função de autocovariância, ou, de forma equivalente, por sua média μ , sua variância σ_z^2 e sua função de autocorrelação.

2.8.2 Tipos De Modelos

a. Modelo linear autorregressivo (AR)

Em um modelo linear autorregressivo, ou simplesmente modelo autorregressivo, o valor atual da variável é igualado à soma ponderada de um determinado número de valores passados e uma variável totalmente aleatória. A expressão linear significa, neste caso, que a soma não inclui o quadrado, a raiz quadrada ou similares dos valores passados.

Modelos autorregressivos (AR) estão sendo extensivamente empregados desde o início da década de 60, para modelar séries temporais hidrológicas anuais e periódicas. Segundo SALAS et al. (1985) a aplicação destes modelos em hidrologia tem se mostrado interessante por dois motivos principais, quais sejam: (a) a forma autorregressiva possui um tipo intuitivo de dependência temporal (o valor atual da variável depende dos valores anteriores), e (b) são modelos simples de usar. A publicação do livro de BOX & JENKINS (1976) demarca o fim de uma fase, em que o processo usual para estimar os parâmetros dos modelos era baseado no método dos momentos e a qualidade do ajuste do modelo era pesquisada apenas pela análise de correlograma. A partir de então os pesquisadores passaram a utilizar as metodologias mais refinadas sugeridas por Box e Jenkins e outros, para prover estimativas dos parâmetros do modelo, para verificar ou checar as suposições do modelo, para proceder a seleção entre modelos equivalentes, etc.

a.1 Modelos AR constantes.

O modelo autorregressivo de ordem p , denotado por $AR(p)$, que representa uma série da variável y_t , normalmente distribuída, com média μ e variância σ^2 e correlação autorregressiva (ou estrutura com dependência temporal) com parâmetros constantes, pode ser geralmente escrito na forma

$$y_t = \mu + \phi_1(y_{t-1} - \mu) + \dots + \phi_p(y_{t-p} - \mu) + \varepsilon_t \quad (7)$$

ou

$$y_t = \mu + \sum_{j=1}^p \phi_j (y_{t-j} - \mu) + \epsilon_t \quad (8)$$

onde ϵ_t é uma série sem dependência temporal, independente de y_t e com distribuição normal, com média zero e variância σ_ϵ^2 . Os coeficientes ϕ_1, \dots, ϕ_p são os coeficientes de autorregressão. A ordem p do modelo é determinada pelo número de parâmetros autorregressivos.

Se tomarmos os desvios em relação à média

$$z_t = y_t - \mu \quad (9)$$

a representação assume a forma

$$z_t = \phi_1 z_{t-1} + \phi_2 z_{t-2} + \dots + \phi_p z_{t-p} + \epsilon_t \quad (10)$$

ou

$$z_t = \sum_{j=1}^p \phi_j z_{t-j} + \epsilon_t \quad (11)$$

Outras formas dos modelos autorregressivos podem ser encontradas em trabalhos de BOX & JENKINS (1976), KOTTEGODA (1980), BRAS & RODRIGUEZ-ITURBE (1985), ou em SALAS et al. (1985) citando FIERING & JACKSON (1971), BEARD (1967) e YEVJEVICH (1972).

Na maioria dos trabalhos analisados, onde o modelo eleito para representar o comportamento de séries temporais foi do tipo autorregressivo, o número de coeficientes de autorregressão empregados foi, em geral 1, ou no máximo 2.

Um modelo AR, que empregue apenas um coeficiente de autorregressão, chamado modelo autorregressivo de primeira ordem, ou AR(1), assume a seguinte forma:

$$y_t = \mu + \phi_1 (y_{t-1} - \mu) + \epsilon_t \quad (12)$$

a.2 Modelos AR periódicos.

Quando os parâmetros de um modelo autorregressivo variam dentro do ano, ou são periódicos, o modelo é denominado AR periódico. Esta periodicidade pode ser relativa à média, à variância e/ou aos coeficientes de autorregressão.

Um modelo AR de ordem p , que apresente coeficientes de autorregressão constantes e periodicidade quanto à média e à variância, pode ser representado na forma:

$$y_{v,\tau} = \mu_\tau + \sigma_\tau z_{v,\tau} \quad (13)$$

e

$$z_{v,\tau} = \sum_{j=1}^p \phi_j z_{v,\tau-j} + \epsilon_{v,\tau} \quad (14)$$

onde $y_{v,\tau}$ é a variável temporal para o período v , no intervalo de tempo τ (que pode ser de meses, semanas, etc.), para $\tau = 1, \dots, w$, sendo w o número total de intervalos de tempo dentro do período. A variável $y_{v,\tau}$ é normalmente distribuída, com média μ_τ e variância σ_τ^2 . Tanto a variável dependente $z_{v,\tau}$ como a variável independente $\epsilon_{v,\tau}$ possuem distribuição normal, com média zero e variância um e σ_τ^2 , respectivamente. Entretanto, se os coeficientes de autorregressão forem periódicos, o modelo pode ser representado na forma:

$$z_{v,\tau} = \sum_{j=1}^p \phi_{j,\tau} z_{v,\tau-j} + \sigma_\tau \epsilon_{v,\tau} \quad (15)$$

onde $\phi_{j,\tau}$ é o coeficiente autorregressivo periódico, de ordem j , no intervalo τ . σ_τ é um coeficiente periódico e $\epsilon_{v,\tau}$ é uma variável independente normal padronizada.

Existe uma notável preferência pelo emprego de modelos AR com parâmetros constantes, em detrimento dos modelos AR com parâmetros variáveis, apesar de ambos serem largamente aplicados em hidrologia. Esta preferência é uma decorrência da grande quantidade de informação disponível a respeito dos modelos AR com parâmetros constantes e do fato de que suas propriedades relativas à média, variância, autocorrelação, autocorrelação parcial e condições a serem satisfeitas pelos seus parâmetros são bem conhecidas, enquanto que as propriedades dos modelos AR periódicos não são tão bem conhecidas e são usualmente mais complexas, o que é confirmado por SALAS et alii (1985).

a.3 Função de autocorrelação parcial.

A função de autocorrelação parcial (FACP) ou *correlograma parcial*, é uma outra maneira de representar a estrutura de dependência temporal de uma série ou de um dado modelo. A FACP é extremamente útil como auxiliar na identificação do tipo e ordem do modelo, quando da investigação de uma dada série temporal amostral.

A função de autocorrelação (FAC) da variável y_t da equação (7) pode ser obtida pela multiplicação de ambos os lados da equação (7) por y_{t-k} e, em seguida, tomando as esperanças termo a termo. A FAC, desse modo, satisfaz a relação conhecida por equação de Yule-Walker, apresentada como:

$$\Gamma_k = \phi_1 \cdot \Gamma_{k-1} + \phi_2 \cdot \Gamma_{k-2} + \dots + \phi_p \cdot \Gamma_{k-p}, \quad k > 0 \quad (16)$$

ou

$$\Gamma_k = \sum_{j=1}^p \phi_j \cdot \Gamma_{k-j}, \quad k > 0. \quad (17)$$

Empregando a notação $\phi_j(k)$ para identificar o coeficiente autorregressivo de ordem j de um modelo AR(k), o último coeficiente será $\phi_k(k)$. Assim a equação (16) origina

$$r_j = \phi_1(k) \cdot r_{j-1} + \phi_2(k) r_{j-2} + \dots + \phi_k(k) \cdot r_{j-k} \quad (18)$$

para $j = 1, \dots, k$.

A função de autocorrelação parcial é $\phi_k(k)$ e pode ser determinada pela resolução recursiva da equação (18) para cada $k = 1, 2, \dots$. Assim, de uma forma geral, para um modelo AR(p) é obtido

$$\phi_k(k) \neq 0, \quad \text{para } k \leq p$$

e

(19)

$$\phi_k(k) = 0, \quad \text{para } k > p.$$

BOX & JENKINS (1976) chamam a atenção para o fato de que as estimativas da FACP obtidas desta forma são muito sensíveis aos erros de arredondamento, não devendo ser empregadas se os parâmetros estiverem muito próximos das fronteiras de não-estacionaridade. Neste caso as autocorrelações parciais deverão ser estimadas pelo ajuste sucessivo de modelos autorregressivos de ordens 1, 2, 3, ... por mínimos quadrados e escolher as estimativas de $\phi_1(1)$, $\phi_2(2)$, $\phi_3(3)$ do último coeficiente ajustado em cada estágio.

b. Modelo linear de média móvel (MA)

Um modelo linear de média móvel (MA, do termo em inglês moving average) representa uma série temporal, cujos valores sucessivos são altamente dependentes, como resultado de uma seqüência de variáveis aleatórias ϵ_t . Estas variáveis são também entendidas como "choques" independentes e sua seqüência é conhecida como um processo de ruído branco (BOX & JENKINS, 1976). Como já foi mencionado, ϵ_t possui distribuição normal, com média zero e variância σ_ϵ^2 .

Novamente tomando os desvios em relação à média

$$z_t = y_t - \mu \quad (20)$$

o modelo assume a forma

$$z_t = \epsilon_t - \theta_1 \epsilon_{t-1} - \theta_2 \epsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \epsilon_{t-q} \quad (21)$$

ou

$$z_t = \epsilon_t - \sum_{j=1}^q \theta_j \epsilon_{t-j} \quad (22)$$

onde $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$, são os q parâmetros de média móvel do modelo linear de média móvel, de ordem q , dito MA(q).

Sendo as variáveis randômicas ϵ_t não correlacionadas, sua função de autocovariância apresenta o seguinte comportamento

$$c_k = \begin{cases} \sigma_{\epsilon}^2 & p/ k = 0 \\ 0 & p/ k \neq 0 \end{cases} \quad (23)$$

enquanto a função de autocorrelação deste ruído branco apresenta uma forma particularmente simples, qual seja

$$r_k = \begin{cases} 1 & p/ k = 0 \\ 0 & p/ k \neq 0 . \end{cases} \quad (24)$$

c. Modelo linear autorregressivo de média móvel (ARMA)

Uma série hidrológica cujo comportamento seja o resultado, ora de uma forte relação autorregressiva entre o valor atual da variável e os valores anteriores da série e ora de uma influência mais pronunciada de outras entradas do sistema, pode ser modelada de forma conveniente através de uma espécie de simbiose entre um componente autorregressivo (AR) e um componente de média móvel (MA). Desta simbiose surgem os chamados modelos ARMA (autorregressivo de média móvel). A flexibilidade obtida pela adição do componente média móvel ao componente autorregressivo, permite construir um modelo com menor número de parâmetros do que aquele que seria necessário estimar para um modelo AR de ordem mais elevada (SALAS et al., 1985). Como os parâmetros são estimados a partir dos dados, a idéia de parcimônia, ligada ao número de parâmetros, passa a ser particularmente interessante.

Considerando que a série hidrológica a ser modelada, formada pelos valores $y_t, y_{t+1}, y_{t+2}, \dots$ tomados em intervalos de tempo igualmente espaçados $t, t+1, t+2, \dots$ é estacionária e aproximadamente normal, ou devidamente transformada, e considerando os desvios relativos à média, na forma

$$z_t = y_t - \mu \quad (25)$$

um modelo autorregressivo de ordem p e um modelo de média móvel de ordem q , podem ser combinados para obter um "modelo autorregressivo de média móvel" (ARMA) de ordem (p,q) . Este modelo pode ser definido por

$$z_t = \phi_1 z_{t-1} + \dots + \phi_p z_{t-p} + \epsilon_t - \theta_1 \epsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \epsilon_{t-q} \quad (26)$$

ou, também, na forma

$$z_t = \sum_{j=1}^p \phi_j z_{t-j} + \epsilon_t - \sum_{j=1}^q \theta_j \epsilon_{t-j} . \quad (27)$$

Os parâmetros do modelo, usualmente chamado de ARMA(p,q), são $\mu, \sigma_{\epsilon}^2, \phi_1, \dots, \phi_p, \theta_1, \dots, \theta_q$, num total de (p+q+2) parâmetros, que devem ser avaliados a partir dos dados.

Como já foi mencionado, séries hidrológicas, quando analisadas para intervalos de tempo inferiores a um ano, geralmente apresentam uma periodicidade característica, com algumas ou todas características estatísticas variando com o tempo, de uma maneira periódica. A estrutura correlacional de séries periódicas pode resultar em um processo ARMA, com coeficientes constantes, ou periódicos. Em ambos os casos, o modelo ARMA que represente tais processos será chamado modelo ARMA periódico.

Uma série periódica normal $y_{v,\tau}$, pode ser expressa como

$$y_{v,\tau} = \mu_{\tau} + \sigma_{\tau} z_{v,\tau} \quad (28)$$

onde $y_{v,\tau}$ é a variável temporal para o período v, no intervalo de tempo τ (que pode ser de meses, semanas, etc.), para $\tau = 1, \dots, w$, sendo w o número total de intervalos de tempo dentro do período. A variável $y_{v,\tau}$ é normalmente distribuída, com média μ_{τ} e variância σ_{τ}^2 e $z_{v,\tau}$ pode ser representada por um modelo ARMA periódico, com coeficientes constantes ou variáveis.

O modelo ARMA(p,q) com coeficientes constantes pode ser escrito na forma

$$z_t = \sum_{j=1}^p \phi_j z_{t-j} + \epsilon_t - \sum_{j=1}^q \theta_j \epsilon_{t-j} \quad (29)$$

onde $t = (v-1)w + \tau$. ϕ e θ são os coeficientes do modelo e ϵ_t é a variável independente normal.

Já um modelo ARMA(p,q) com coeficientes periódicos pode assumir a forma

$$z_{v,\tau} = \sum_{j=1}^p \phi_{j,\tau} z_{v,\tau-j} + \epsilon_{v,\tau} - \sum_{j=1}^q \theta_{j,\tau} \epsilon_{v,\tau-j} \quad (30)$$

onde $\phi_{j,\tau}$ e $\theta_{j,\tau}$ são os coeficientes periódicos autorregressivos e média móvel, respectivamente, e $\epsilon_{v,\tau}$ é uma variável randômica independente e normalmente distribuída.

d. Modelo autorregressivo de média móvel integrado (ARIMA)

Os modelos ARMA são ajustados para séries hidrológicas estacionárias ou, no caso de séries que apresentem periodicidade, que são submetidas ao processo de remoção da não estacionaridade. Se a

série não estacionária original for mensal, por exemplo, e a periodicidade é removida por uma padronização periódica do tipo

$$Y_{v,\tau} = \frac{X_{v,\tau} - \mu_\tau}{\sigma_\tau} \quad (31)$$

onde $x_{v,\tau}$ é a variável periódica original, no ano v e no mês τ e sendo μ_τ e σ_τ a média e o desvio padrão, respectivamente, da série original, para o mês τ correspondente. $y_{v,\tau}$ é a variável padronizada, normalmente distribuída, com média zero e desvio padrão unitário. Neste caso, um modelo ARMA(1,1) que fosse ajustado à série implicaria na obtenção de 27 parâmetros (12 médias mensais, 12 desvios padrão mensais, ϕ_1 , θ_1 e σ_ϵ^2).

Existe um método alternativo de transformar uma série temporal em uma série estacionária, a qual conduz a modelos que requerem um menor número de parâmetros. Se uma determinada série não possui uma média fixa, mas suas diferenças sucessivas são estacionárias, então é possível estender o uso dos modelos ARMA para séries não estacionárias, desde que sejam utilizadas as suas diferenças.

Uma diferenciação de primeira ordem, de uma série de valores x_t , é definida por

$$u_t = x_t - x_{t-1} \quad (32)$$

a qual remove ou atenua as componentes de baixa frequência da série. De forma semelhante é possível fazer diferenciações de segunda, terceira, ou de forma geral, de ordem d . A aplicação de um modelo ARMA à série diferenciada d vezes caracteriza os chamados modelos ARIMA(p,d,q) não periódicos (ou não sazonais). Quando são feitas diferenciações periódicas ou sazonais, considerando intervalos de tempo (w) iguais a extensão da sazonalidade (12ª diferença para séries mensais, por exemplo), então o modelo obtido é do tipo ARIMA(P,D,Q) $_w$ periódico (ou sazonal). A combinação dos modelos ARIMA periódicos e não periódicos resulta nos chamados modelos ARIMA multiplicativos.

O termo ARIMA especifica o modelo autorregressivo de média móvel integrado (autorregressive integrated moving average) e tem sua origem no fato de que para obter a série estacionária foi preciso diferenciar a série original e, portanto, para recuperar o processo original, se faz necessário integrar o processo diferenciado. Seguindo a analogia da integração, uma constante de integração seria necessária, porém, foi perdida durante o processo de diferenciação. Dessa forma, os modelos ARIMA são muito úteis na previsão de desvios de um processo, porém, não se prestam à geração de séries hidrológicas estacionárias.

O comportamento da série diferenciada pode ser representado por um modelo ARMA(p,q) na forma

$$u_t = \sum_{j=1}^p \phi_j u_{t-j} + \epsilon_t - \sum_{j=1}^q \theta_j \epsilon_{t-j} \quad (33)$$

e o modelo para x_t é referido como um ARIMA(p,d,q), onde os parâmetros p e q indicam a ordem dos componentes autorregressivo e média móvel e d é o número de diferenciações necessário para obter a série u_t estacionária.

O modelo ARIMA é, na verdade, uma versão generalizada do modelo ARMA, que por sua vez é uma combinação dos modelos AR e MA. Ficam, portanto, estabelecidas as seguintes equivalências

$$\begin{aligned} \text{ARMA}(p,q) &= \text{ARIMA}(p,0,q) \\ \text{AR}(p) &= \text{ARIMA}(p,0,0) \\ \text{MA}(q) &= \text{ARIMA}(0,0,q) \end{aligned}$$

e. Modelo ARIMA multiplicativo (ARIMAX)

Através de uma diferenciação sazonal é possível remover a periodicidade intra-anual em séries hidrológicas. Uma série hidrológica mensal, por exemplo, pode ser diferenciada de um período de 12 meses pela operação

$$u_t = x_t - x_{t-12} \quad (34)$$

De uma forma generalizada, se w representa a extensão do período de sazonalidade, a diferenciação sazonal pode ser expressa por

$$u_t = x_t - x_{t-w} \quad (35)$$

Um modelo ARIMA(P,D,Q)_w sazonal simples é obtido pelo ajuste de um modelo ARMA à série diferenciada sazonalmente D vezes, sendo P a ordem do componente autorregressivo sazonal e Q a ordem do componente média móvel sazonal.

Um modelo ARIMA(P,1,Q) pode ser apresentado na forma

$$\begin{aligned} u_t = & \Phi_1 u_{t-w} + \Phi_2 u_{t-2w} + \dots + \Phi_P u_{t-Pw} + a_t - \theta_1 a_{t-w} - \\ & - \theta_2 a_{t-2w} - \dots - \theta_Q a_{t-Qw} \end{aligned} \quad (36)$$

ou

$$u_t = \sum_{j=1}^P \Phi_j u_{t-jw} + a_t - \sum_{j=1}^Q \theta_j a_{t-jw} \quad (37)$$

em que a_t representa o componente residual do modelo sazonal.

Um modelo periódico mensal, com w igual a 12, explica a dependência entre a observação x_t de um mês particular, e as observações feitas neste mesmo mês, nos anos anteriores. Assim, surgem 12 modelos (um para cada mês), os quais são assumidos como sendo similares.

Apesar da observação de um determinado mês, maio por exemplo, ser relacionada com as observações de maio precedentes, ela está também relacionada com as observações de outros meses do mesmo ano. Conseqüentemente, os resíduos a_t apresentam correlação serial. Para levar em conta esta correlação serial, entre os meses de um mesmo ano, um modelo ARMA(p,q) é ajustado às séries de a_t , na forma

$$a_t = \sum_{j=1}^p \phi_j a_{t-j} + \epsilon_t - \sum_{j=1}^q \theta_j \epsilon_{t-j} . \quad (38)$$

Combinando as duas últimas equações é obtido o modelo ARIMA(p,q)x(P,1,Q) multiplicativo, na forma

$$u_t = \sum_{i=1}^P \phi_i u_{t-1} + \sum_{j=1}^P \Phi_j u_{t-jw} - \sum_{i=0}^P \sum_{j=0}^P \phi_i \Phi_j u_{t-1-jw} + \sum_{i=0}^q \sum_{j=0}^q \theta_i \Theta_j \epsilon_{t-jw-1} \quad (39)$$

sendo $\theta_0 = \Theta_0 = -1$.

A generalização deste modelo consiste no modelo ARIMA(p,d,q)x(P,D,Q)w multiplicativo, que pode ser representado em uma forma bastante condensada, mediante a adoção do operador de retrocesso B, definido como

$$Bx_t = x_{t-1}$$

e

(40)

$$B^n x_t = x_{t-n}$$

assim, o modelo ARIMA(p,d,q)x(P,D,Q)w multiplicativo pode ser representado na forma:

$$\begin{aligned} (1 - \sum_{i=1}^P \phi_i B^i) (1 - \sum_{i=1}^P \Phi_i B^{iw}) (1-B)^D (1-B)^d x_t &= \\ &= (1 - \sum_{i=1}^q \theta_i B^i) (1 - \sum_{i=1}^q \Theta_i B^{iw}) \epsilon_t . \end{aligned} \quad (41)$$

3. MATERIAL E METODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA AREA

A área a ser estudada situa-se na parte central do estado do Rio Grande do Sul, ocupando uma área de aproximadamente 10000 Km², sendo que sua porção norte está situada na região da Depressão Central, enquanto que sua porção sul situa-se na região da Serra do Sudeste.

A porção situada na região da Depressão Central, entre as regiões do Planalto e da Serra do Sudeste, possui um relevo que se caracteriza por apresentar amplas planícies aluviais e coxilhas sedimentares (ondulado, com pendentes de dezenas de metros). A altitude é inferior a 200 metros.

A porção situada na Serra do Sudeste é constituída por massa cristalina, por vezes apresentando cobertura sedimentar. O relevo é ondulado (8 a 16%) e constituído por elevações com declives de dezenas ou centenas de metros, formando vales. A altitude é inferior a 400 metros.

Segundo o sistema universal de classificação climática de Koeppen, na bacia do Vacacaí predomina o clima tipo "Cf" (temperado úmido), na variedade climática "Cfa", ou seja, clima sub-tropical ou virginiano, sendo a temperatura do mês mais quente (janeiro) superior a 22°C.

Na região sul da bacia a temperatura média anual é inferior a 18°C, enquanto que na região norte a temperatura média anual é superior a 18°C. A precipitação média anual fica em torno de 1550 mm, sobre a área.

A fração da bacia do Vacacaí situada na região da Depressão Central, apresenta solos com horizonte B textural e argila de atividade alta (hidromórficos), cuja limitação mais evidente é a drenagem deficiente.

Na região sul da bacia do Vacacaí a limitação mais evidente é a pouca profundidade do solo, associada à pedregosidade e rochosoidade. Esta região apresenta solos pouco desenvolvidos e argilas de atividade alta (não hidromórficos) (INCRA, 1973).

Encontram-se nas duas porções solos com horizonte B textural e argila de atividade baixa (não hidromórficos).

A bacia do Vacacai é, na verdade, uma sub-bacia da do Rio Jacuí, que por sua vez, faz parte da grande bacia da Lagoa dos Patos. Na Figura 2 a área marcada corresponde à bacia do rio Vacacai, sendo que seus principais rios são o Vacacai, São Sepé, Santa Bárbara, Dos Corvos, Arroio dos Lourenços, Arroio Ibiajutura (ex Cambai), Arroio dos Freires e Arroio Acangupá.

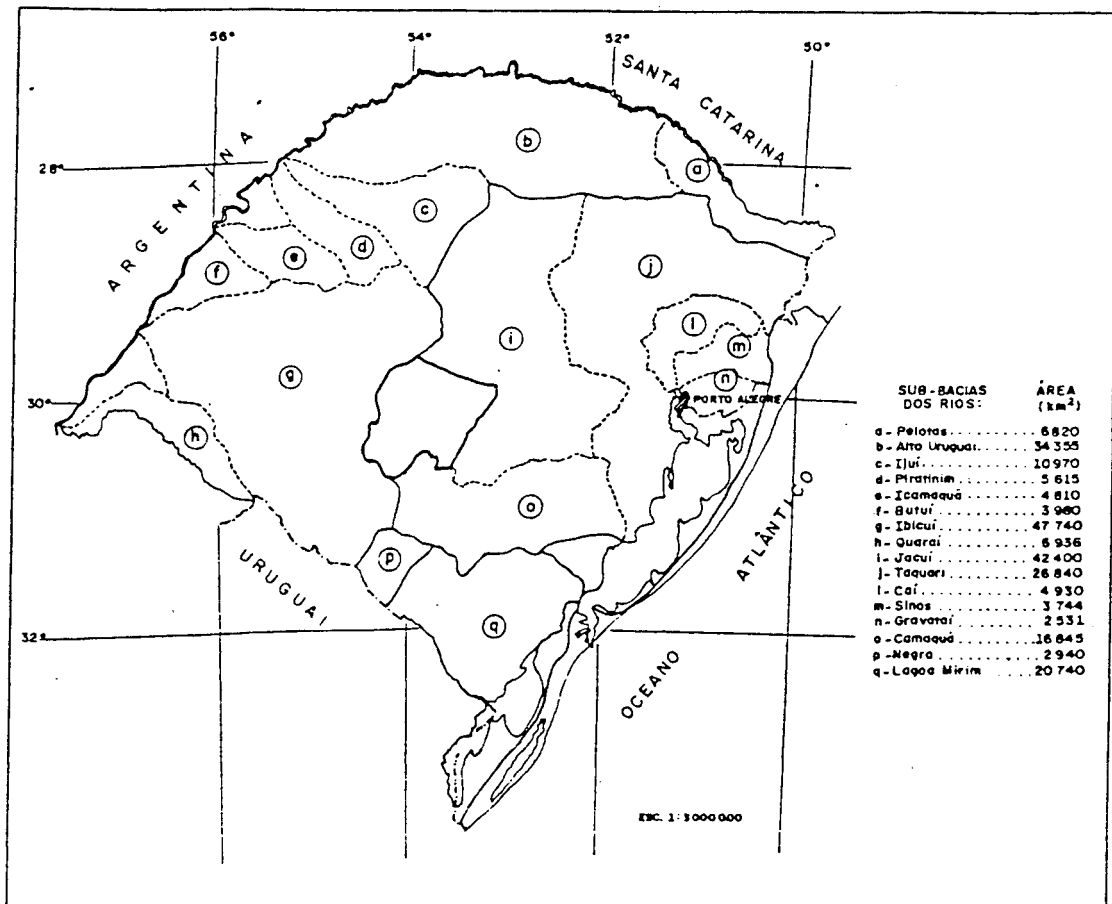


FIGURA 2 - Principais sub-bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul.

A bacia do rio Vacacai abrange os municípios de São Sepé e Formigueiro, e parte dos municípios de Santa Maria, Restinga Seca, Cachoeira do Sul, Caçapava do Sul e São Gabriel. Na Figura 3 podem ser visualizados os principais municípios e a rede hidrográfica da bacia do rio Vacacai.

A escolha da área em questão, para a realização dos estudos propostos, foi baseada nos seguintes critérios:

- potencialidade para implementação da irrigação, ou seja, onde as condições de clima e relevo indiquem a irrigação e/ou drenagem como alternativas possíveis de serem adotadas;

- disponibilidade de informações climatológicas, ou seja, onde a densidade de distribuição de postos de coleta de dados meteorológicos e a extensão das séries históricas destes dados sejam suficientes para permitir a correta aplicação das técnicas necessárias ao estudo;
- disponibilidade de estudos semelhantes, que permitam uma confrontação entre os resultados obtidos.

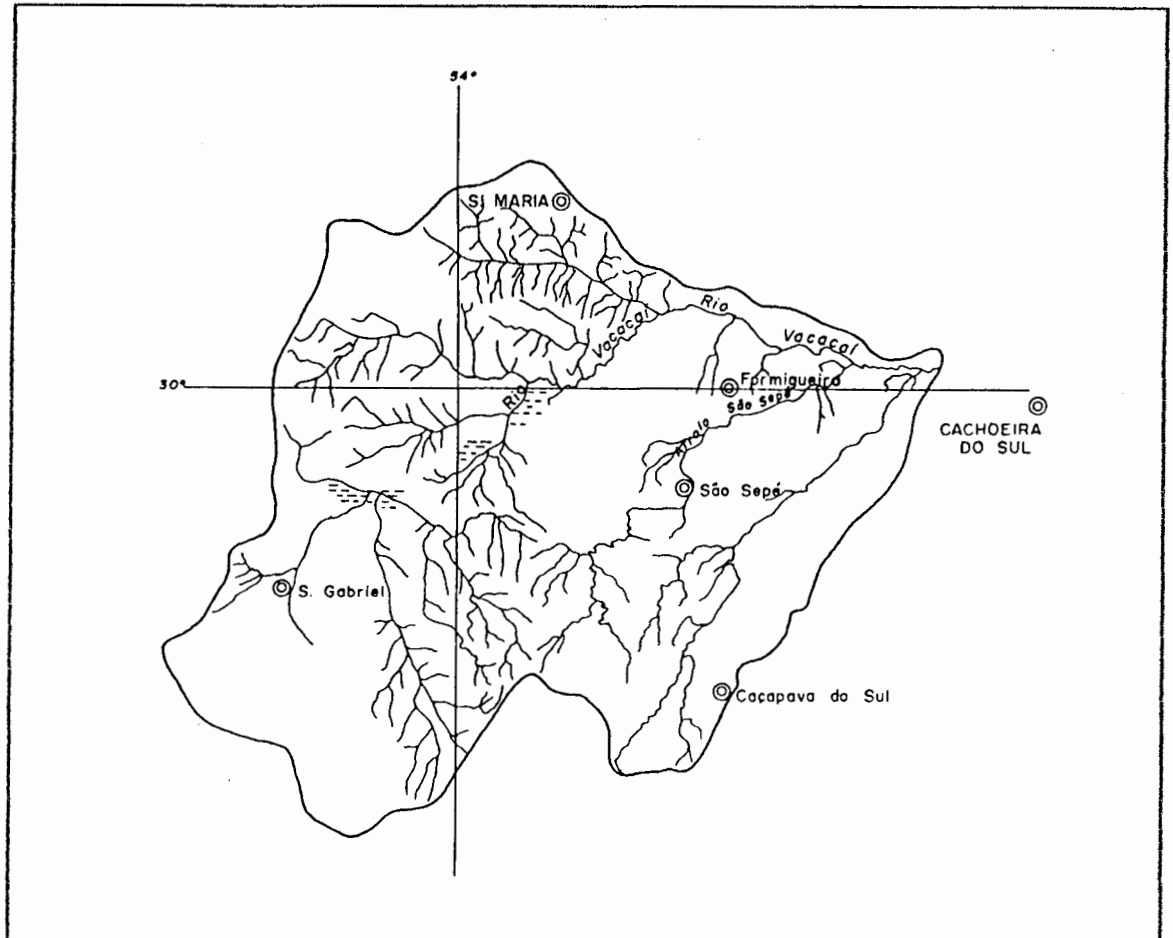


FIGURA 3 - Bacia do rio Vacacaí.

3.2 INFORMAÇÃO DISPONIVEL

Para a realização do presente estudo foi selecionada a região da bacia do rio Vacacaí, por apresentar uma quantidade razoável de postos de coleta de dados climatológicos. A escolha dos postos existentes na região, cujos dados foram efetivamente empregados na elaboração dos modelos, foi baseada, em um primeiro momento, nos seguintes critérios:

- a adequação dos tipos de dados registrados aos tipos de variáveis necessárias nas diversas etapas do estudo;
- a relevância da localização dos postos, em termos de distribuição espacial;
- a existência de séries de registros históricos de extensão compatível com o tipo de estudo a ser realizado.

De acordo com o acima exposto, foram selecionados, em um primeiro momento, 15 postos climatológicos, sendo 11 postos mantidos pelo Departamento Estadual de Portos, Rios e Canais - DEPREC, 2 postos mantidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia - INEMET e 2 postos mantidos pelo Instituto de Pesquisas Agropecuárias - IPAGRO. Com a finalidade de tornar o texto presente mais objetivo, cada um destes postos será identificado por um número de ordem. Segue abaixo um quadro de identificação dos postos selecionados.

QUADRO 1 - Postos incluídos na primeira seleção.

Nº	Nome	Município	Instituição
1	São Gabriel	São Gabriel	DEPREC
2	Pau Fincado	São Gabriel	DEPREC
3	Cerro do Ouro	São Gabriel	DEPREC
4	Posto Branco	São Gabriel	DEPREC
5	Santa Margarida	São Gabriel	DEPREC
6	Caçapava	Caçapava do Sul	DEPREC
7	Barro Vermelho	Cachoeira do Sul	DEPREC
8	Passo das Tropas	Restinga Seca	DEPREC
9	Passo do Verde	Santa Maria	DEPREC
10	Mata Grande	São Sepé	DEPREC
11	Marco da Ramada	São Sepé	DEPREC
12	Santa Maria	Santa Maria	INEMET
13	Caçapava	Caçapava do Sul	INEMET
14	São Gabriel	São Gabriel	IPAGRO
15	Santa Maria	Santa Maria	IPAGRO

3.3 ANÁLISE DE CONSISTENCIA E PREENCHIMENTO DE FALHAS

Os dados climatológicos dos postos incluídos nesta seleção preliminar, foram posteriormente submetidos a uma análise, onde foram identificadas as ocorrências de falhas e inconsistências nos registros históricos, visando minimizar as incertezas relativas à confiabilidade dos dados. Desta análise resultou a escolha definitiva dos postos considerados no desenvolvimento do presente estudo.

BOX & JENKINS (1976) e KOTTEGODA (1980) ressaltam que o caráter estocástico de certos processos hidrológicos se deve, em

parte, às próprias incertezas inerentes ao valor das variáveis que constam nos registros históricos. Dessa forma a eficiência do emprego de técnicas mais ou menos avançadas em diversas etapas do processo de obtenção de séries sintéticas, que simulem o comportamento de determinada variável hidrológica, pode ser seriamente comprometida por erros sistemáticos, ou ocasionais, na obtenção do registro histórico. Por este motivo as ações relativas ao preenchimento de falhas e análise de consistência receberam especial atenção, na busca de uma seleção mais rigorosa dos dados empregados.

Os métodos empregados para o preenchimento de falhas e substituição de dados considerados inconsistentes nas séries de registros históricos são basicamente os mesmos. Assim, em primeiro lugar, será abordada a questão da identificação dos dados que apresentem valores que possam ser considerados discrepantes, dentro da série a que pertencem e, a seguir, a questão da determinação dos valores a serem utilizados no preenchimento das falhas e substituição dos valores discrepantes que forem eleitos inconsistentes.

3.3.1 Análise de Consistência

Não é raro o aparecimento de valores discrepantes em registros de séries hidrológicas. A ocorrência destes valores pode ter diversas origens, como falhas humanas na leitura dos instrumentos, ou na transcrição dos dados, ação de agentes externos sobre os instrumentos, ou mesmo a ocorrência de um evento pouco comum. Neste último caso o valor da variável analisada não constitui uma inconsistência e, portanto, deve ser preservado. A maior dificuldade consiste em determinar quando um valor discrepante deve ser considerado inconsistente ou não.

A primeira fase da análise de consistência, de acordo com PINTO et al. (1976), consiste na detecção de erros grosseiros, como por exemplo, o registro de dados em dias inexistentes, ou o aparecimento de valores sabidamente impossíveis. Esta fase foi bastante simples, requerendo apenas uma cuidadosa conferência dos registros. O elevado número de dados, porém, tornou o processo um tanto demorado.

Para se obter uma melhor idéia do comportamento de cada variável, em cada posto, todas as séries disponíveis foram plotadas em relação ao tempo, facilitando a identificação de erros grosseiros e subsidiando a decisão pela inconsistência ou não dos valores discrepantes. Adiante é apresentado, para ilustrar o procedimento descrito, o gráfico da série mensal de precipitação, para o posto 12.

As séries de variáveis que apresentam interesse direto para o desenvolvimento do estudo, englobam temperaturas, precipitação, umidade relativa, insolação, radiação solar e velocidade do vento. Porém todas as variáveis disponíveis em cada posto foram utilizadas para as análises, pois o estabelecimento das correlações entre diferentes variáveis de um mesmo posto, ou de postos diferentes, é importante tanto para a avaliação da qualidade das informações contidas em cada série, como para o processo de remoção das inconsistências.

SERIE DE PRECIPITACOES (Posto 12)

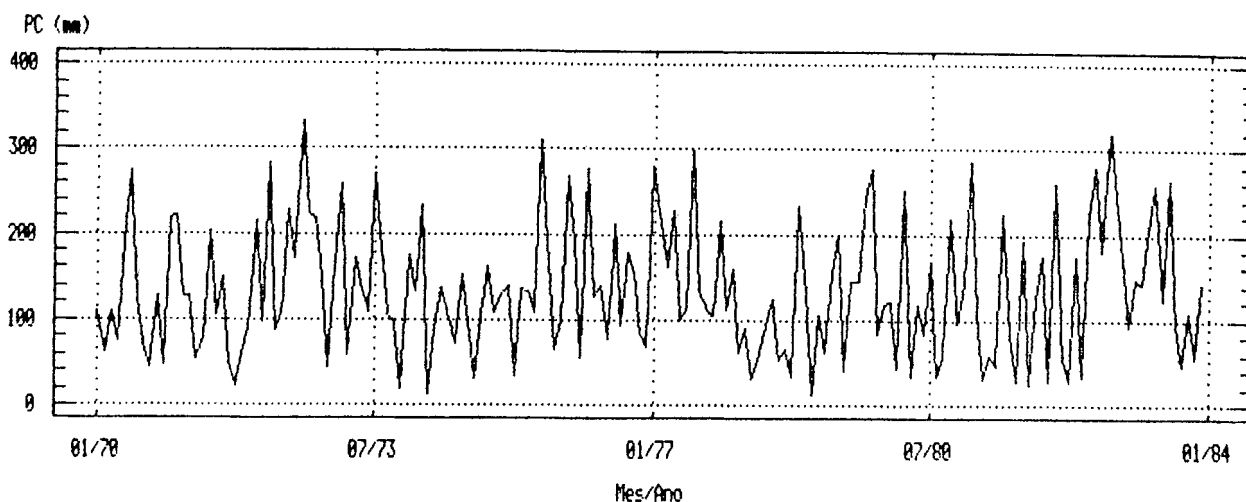


FIGURA 4 - Série mensal de precipitação, para o posto 12.

Assim sendo, procedeu-se a determinação das matrizes dos coeficientes de correlação simples entre as séries disponíveis e, a seguir, utilizando os postos que apresentaram os coeficientes de correlação mais altos entre si, foram elaboradas as matrizes de correlação múltipla. A partir dos resultados contidos neste conjunto de matrizes é que foram determinadas quais séries seriam combinadas em cada análise de consistência.

Inicialmente, para cada série, foram eliminados todos os meses em que ocorreram falhas em pelo menos um dos 15 postos, já que a simultaneidade de ocorrência é importante e estas falhas não poderiam ser preenchidas, pois desta forma o processo de escolha de quais postos deveriam ser utilizados seria prejudicado pelas distorções conseqüentes.

Um cuidado adicional, tido quanto à análise das séries de precipitação, foi o de eliminar da análise de correlação aqueles meses em que o valor da precipitação mensal foi inferior a 20 mm, considerando que nestes casos tenham ocorrido vários dias secos. A permanência de períodos secos na série, afetaria a estrutura de correlação interpostos (a correlação aumentaria). O valor adotado, de 20 mm é basicamente arbitrário, considerando apenas que a FAO (1987) sugere que quando o valor do total mensal precipitado for inferior a 20 mm, a precipitação efetiva seja considerada nula.

O coeficiente de correlação empregado mede a dispersão, ou o grau de desvio, existente entre os valores das séries amostrais e uma função de regressão obtida a partir dos dados, através do método dos mínimos quadrados.

Estabelecendo a função de regressão de uma variável y (a dependente) a partir de uma variável x (a independente) são obtidos os valores estimados de y (y_{est}) em função dos valores dados de x .

Sendo m_y a média amostral dos valores de y , o coeficiente de correlação amostral pode ser obtido mediante a expressão

$$R = \pm [\Sigma(y_{t-t} - m_y)^2 / \Sigma(y - m_y)^2]^{1/2} \quad (42)$$

em que os sinais \pm indicam, no caso de regressão linear, uma correlação linear positiva ou negativa respectivamente.

A expressão apresentada para o coeficiente de correlação é geral e foi empregada tanto para as relações lineares como para as não-lineares, quando os sinais \pm foram omitidos. Para determinar o grau de correlação entre três ou mais variáveis foi empregada a mesma expressão, porém os valores de y_{t-t} foram obtidos por meio de equações de regressão múltipla.

A fim de diminuir o risco de confundir a ocorrência de um evento pouco comum com um dado inconsistente, a análise de consistência de cada série foi realizada por diferentes métodos, os quais são expostos a seguir.

a. Análise de variação da série padronizada.

Consistiu em efetuar uma operação de padronização da série histórica, a fim de obter uma série com média zero e variância unitária, identificando a seguir aqueles dados cujo valor absoluto permaneceu superior a 2,0.

O valor da variável padronizada pode ser expresso da seguinte forma

$$z_t = \frac{y_t - \mu}{\sigma} \quad (43)$$

onde z_t é a variável padronizada, normalmente distribuída, com média zero e variância unitária. y_t é a variável original, normalmente distribuída, com média μ e desvio padrão σ . Na realidade μ e σ são estimativas da média e do desvio padrão obtidas a partir da série registrada.

Pela natureza das séries analisadas podia-se prever uma certa periodicidade no comportamento da média e do desvio padrão, o que foi confirmado ao se plotar os dados agrupados mês a mês. Esta característica de periodicidade pode ser claramente identificada na figura 5, onde são mostrados os valores de insolação total mensal, para o posto 12, agrupados mês a mês.

Dessa forma, não seria representativo utilizar a média e o desvio padrão da amostra, como um todo, para padronizar os valores mensais. Assim sendo, se optou por estimar a média e o desvio padrão para cada um dos doze meses do ano e proceder a padronização dos valores mensais das variáveis em função dos parâmetros correspondentes, na forma

$$z_{v,\tau} = \frac{y_{v,\tau} - \mu_\tau}{\sigma_\tau} \quad (44)$$

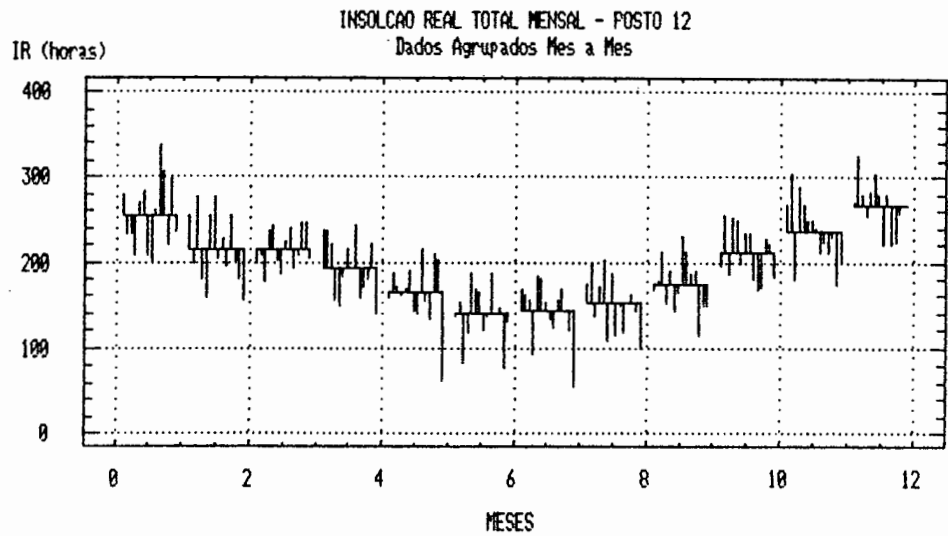


FIGURA 5 - Valores de insolação total mensal (IR), no posto 12, agrupados mês a mês, tendo a média mensal como referência.

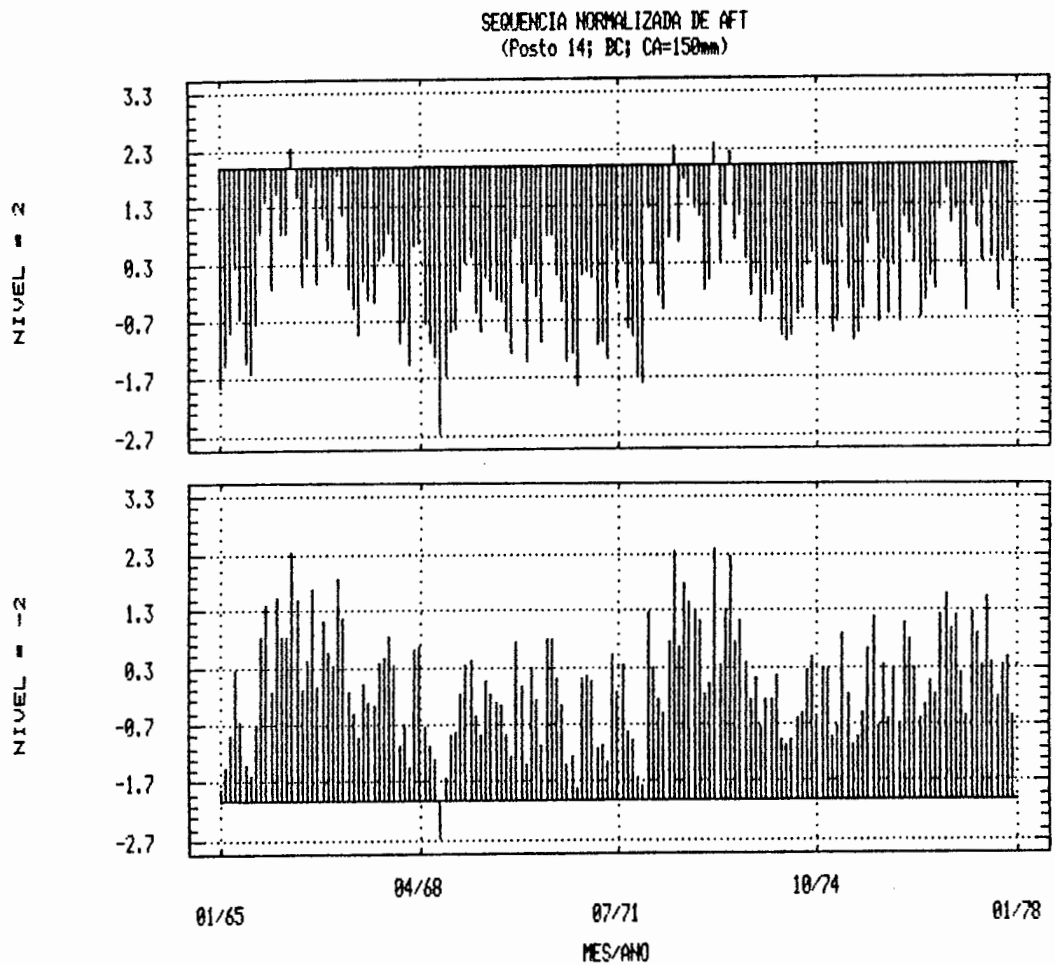


FIGURA 6 - Valores padronizados de precipitação, para o posto 14, com linhas de referência em 2 e -2.

onde $y_{v,\tau}$ é a variável temporal no mês τ , para $\tau = 1, \dots, 12$, no ano v , para $v = 1, \dots, L$, sendo L o número de anos que compõem a série. A variável $z_{v,\tau}$ é a variável padronizada correspondente. Ambas são normalmente distribuídas, com os parâmetros anteriormente caracterizados. μ_τ e σ_τ são os valores da média e do desvio padrão para cada um dos doze meses do ano.

Nas séries padronizadas foram examinados aqueles dados cujo valor absoluto permaneceu superior a 2, pois que estes poderiam representar a ocorrência de inconsistências. Na Figura 6 são mostrados dois gráficos referentes a uma série padronizada de precipitação. No primeiro os valores estão referidos à reta que corresponde ao valor 2, e no segundo à reta que corresponde ao valor -2. Pode ser observado na figura, que no primeiro gráfico aparecem 4 valores acima de 2, enquanto que no segundo, aparece um valor, em agosto de 1968, bem abaixo de -2, próximo a -2,7. Os dados referentes a estes valores precisam ser verificados quanto à sua consistência.

b. Método da tendência linear central.

Consistiu em aplicar, com as devidas adaptações, a metodologia exposta em BRASIL (1980), onde é apresentado o Programa de Homogeneização de Dados (PROHD), baseado em processos iterativos de ajustes dos dados a uma curva dupla acumulada, obtida pela média dos valores acumulados ou, opcionalmente, por mínimos quadrados. Os ajustes foram realizados de acordo com parâmetros de calibração, arbitrados em função do rigor adotado em cada análise, e de coeficientes de correlação.

Em cada análise foram utilizadas, além da série analisada, um mínimo de duas e um máximo de cinco séries que apresentassem o melhor coeficiente de correlação com aquela em questão. Por convenção, a série para a qual é dirigida a análise será denominada de A e as demais, em ordem decrescente do valor do coeficiente de correlação com A, de B, C, D, E e F.

As observações contidas em cada série são designadas por A_1, B_1, \dots, F_1 , com $i = 1, 2, \dots, L$, onde L é o número de observações na série. Os coeficientes de correlação entre a série analisada e as demais são designados por $R_{AB}, R_{AC}, \dots, R_{AF}$.

Segundo os autores do programa citado, uma relação funcional envolvendo uma curva dupla acumulada, dos dados da estação A e B, segue uma tendência, que foi denominada "Tendência Linear Central". São utilizados dois modos para o cálculo das variações funcionais em torno dessa tendência, desdobrando-se cada modo, por sua vez, em duas situações de contorno com coeficientes angulares bem definidos.

Os dados da série A são testados, primeiramente, em relação aos da série B, visando detectar dados inconsistentes na série A, de acordo com as condições de contorno estabelecidas. Os dados considerados suspeitos são novamente testados, desta vez em relação aos da série C, para que seja confirmada ou não a inconsistência e feita a correção, se for o caso, do valor sob suspeita.

Após efetuadas as eventuais correções na série A, o processo é realizado uma segunda vez, porém todos os cálculos, inclusive os de coeficientes de correlação, são realizados com os valores da série corrigida. É desta segunda realização do processo que se obtém uma visão mais clara das possíveis inconsistências e suas respectivas correções, que não são feitas automaticamente, o que permite uma ação mais criteriosa sobre a análise de consistência.

O primeiro teste entre a série A e a série B pode ser assim definido

$$CC1 \leq A_1/B_1 \leq CC2 \quad (45)$$

para CC1 e CC2 obtidos da seguinte forma

$$CC1 = \frac{R_{AB}}{G} \cdot DS_{AB} \quad (46)$$

e

$$CC2 = \frac{G}{R_{AB}} \cdot DS_{AB} \quad (47)$$

sendo G um parâmetro de calibração e DS_{AB} o quociente entre o somatório dos valores da série A e o somatório dos valores da série B, definido por

$$DS_{AB} = SA_1/SB_1 \quad (48)$$

onde:

$$SA_1 = \sum_{i=1}^L A_i \quad (49)$$

e

$$SB_1 = \sum_{i=1}^L B_i \quad (50)$$

Se a condição do primeiro teste é satisfeita, o valor A_1 em análise é considerado consistente e nenhuma modificação é feita sobre ele, passando-se à análise do valor seguinte. Em caso contrário, o dado é considerado suspeito, sendo então testado de maneira análoga em relação à série C, com o objetivo de confirmar ou não a suspeita de inconsistência. Este novo teste pode ser assim definido

$$CC3 \leq A_1/C_1 \leq CC4 \quad (51)$$

para CC3 e CC4 obtidos da seguinte forma

$$CC3 = \frac{R_{AC}}{G} \cdot DS_{AC} \quad (52)$$

e

$$CC4 = \frac{G}{R_{AC}} \cdot DS_{AC} \quad (53)$$

sendo DS_{AC} o quociente entre o somatório dos valores da série A e o somatório dos valores da série C, definido por:

$$DS_{AC} = SA_1 / SC_1 \quad (54)$$

onde

$$SC_1 = \sum_{i=1}^L C_i \quad (55)$$

Sendo confirmada neste segundo teste a inconsistência do dado, este sofre uma correção antes de se passar à análise do valor seguinte. Esta correção é feita através de

$$A_1' = (FB_1 + FC_1 + FD_1 + FE_1 + FF_1) / SR \quad (56)$$

nesta expressão A_1' é o valor corrigido do dado considerado inconsistente e os demais fatores da expressão são obtidos por:

$$FB_1 = R_{AB} \cdot B_1 \cdot DS_{AB} \quad (57)$$

$$FC_1 = R_{AC} \cdot C_1 \cdot DS_{AC} \quad (58)$$

$$FD_1 = R_{AD} \cdot D_1 \cdot DS_{AD} \quad (59)$$

$$FE_1 = R_{AE} \cdot E_1 \cdot DS_{AE} \quad (60)$$

$$FF_1 = R_{AF} \cdot F_1 \cdot DS_{AF} \quad (61)$$

$$SR = R_{AB} + R_{AC} + R_{AD} + R_{AE} + R_{AF} \quad (62)$$

em que DS_{AD} , DS_{AE} e DS_{AF} são expressões análogas a DS_{AB} e DS_{AC} .

Após a análise de todos os valores, a série A passa uma segunda vez pelos dois testes do processo, desta vez, porém, com os dados corrigidos A_1' , que poderão sofrer uma nova correção, análoga à primeira. É possível, nesta segunda rodada, alterar o parâmetro de calibração G, adotando um valor que torne os testes mais rigorosos. Os dados que sofrerem duas correções serão designados por A". Os valores resultantes desta segunda análise é que indicarão uma possibilidade de correção de inconsistências, tendo A' e A" como valores sugeridos para substituição.

No segundo modo empregado para a análise de Tendência Linear Central, é mantida a mesma seqüência acima exposta, porém no cálculo das condições de contorno são impostas novas expressões para a execução dos testes. Dessa forma, DS_{AB} e DS_{AC} passam a ser determinados pelo método dos mínimos quadrados, sendo obtidas as seguintes relações

$$DS_{AB} = [(SA_1 \cdot B_1 - (SA_1 \cdot SB_1) / L) / [SA_1^2 - (SA_1)^2 / L]] \quad (63)$$

e

$$DS_{ac} = [(SA_1.C_1 - (SA_1.SC_1)/L]/[SA_1^2 - (SA_1)^2/L] \quad (64)$$

em que

$$SA_1^2 = \sum_{i=1}^L A_1^2 . \quad (65)$$

Quando foram utilizadas séries que já haviam passado pelo processo, para a análise de uma nova série, estas foram empregadas tanto em seu estado original, como no estado corrigido. Isto para obter um panorama mais completo do efeito das correções das prováveis inconsistências.

3.3.2 Substituição de Valores

A substituição de valores, aqui referida, trata tanto da substituição de valores inexistentes (preenchimento de falhas), como da substituição dos valores considerados inconsistentes, de acordo com a análise de consistência já descrita.

Se a decisão por considerar um determinado dado como sendo consistente, ou não, representa uma dificuldade na análise de séries hidrológicas, a determinação do valor a ser utilizado na substituição daqueles considerados inconsistentes, pode se tornar uma dificuldade ainda maior, em face dos numerosos métodos desenvolvidos para este fim. No presente trabalho foram utilizados alguns destes métodos, de acordo com as condições encontradas caso a caso. Os métodos selecionados serão descritos adiante e a estratégia geral empregada foi a de, em cada caso, aplicar o maior número possível de métodos entre os selecionados, obtendo assim diversos valores, os quais, analisados em conjunto, serviram de substrato para a escolha do valor a ser empregado. Em outras palavras, a substituição de valores não foi efetuada de maneira automática, mas sim baseada no resultado dos diferentes métodos.

Entre os postos disponíveis, foram utilizados como referência, em todas as substituições efetuadas, aqueles que apresentassem a melhor correlação com o posto em que aparecesse o valor passivo de substituição.

A seguir é feita uma descrição sumária dos métodos selecionados para determinar os valores de substituição.

a. Métodos de interpolação ponderada.

a.1. Pelas distâncias.

Neste método é assumido que o ponderador depende exclusivamente da distância entre o posto A, no qual se deseja efetuar a substituição de valor, e os postos que contém os valores que serão utilizados como referência. O cálculo do valor de substituição se dá na forma

$$V_A = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i/d_i)}{\sum_{i=1}^n (1/d_i)} \quad (66)$$

onde V_A é o valor da variável de substituição no posto A e V_i são os valores correspondentes desta variável, nos n postos tomados como referência, que se encontram a uma distância d_i do posto A.

Este método possui como principal desvantagem o fato de não considerar a estrutura espacial da informação interpostos. Assim as informações redundantes de postos que se encontram muito próximos não são discriminadas.

Este método foi utilizado de forma bastante restrita, apenas quando a estrutura de correlação entre o posto sob análise e os disponíveis para referência se mostrou por demais enfraquecida.

a.2. Pelas médias mensais dos postos.

Bem conhecido e largamente empregado em estudos hidrológicos, principalmente para preenchimento de falhas, este método parte da suposição que o valor de uma variável no posto A seja proporcional aos valores desta variável em n postos vizinhos, no mesmo período. O coeficiente de proporcionalidade é o quociente entre a média da variável no posto A e as médias da variável nos demais postos considerados, no mesmo intervalo de tempo. Para levar em consideração a periodicidade inerente às séries, foram consideradas as médias do mês em que seria necessária a substituição. Dessa forma o método pode ser expresso pela relação abaixo

$$V_{A,\tau} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (m_{A,\tau} \cdot V_{i,\tau} / m_{i,\tau}) \quad (67)$$

em que $V_{A,\tau}$ é o valor da variável de substituição no posto A e $m_{A,\tau}$ é a média mensal da variável no posto A, para o mês τ , para $\tau = 1, \dots, 12$. $V_{i,\tau}$ e $m_{i,\tau}$ representam o valor da variável e sua média mensal para o mês τ , em cada um dos n postos considerados.

b. Método das equações de regressão.

Consistiu em ajustar uma função relacionando uma variável dependente com uma ou mais variáveis independentes. No caso, a variável dependente é aquela em cuja série ocorre a necessidade de substituição e as variáveis independentes são aquelas cujas séries são tomadas como referência.

Foram plotados gráficos relacionando as séries de maior nível de correlação, duas a duas. A análise destes gráficos indicou o emprego de funções lineares como sendo a melhor maneira para relacionar as diversas variáveis.

Foram testados dois tipos de regressão linear, a regressão linear simples e a regressão linear múltipla. Ambas podem ser expressas na forma

$$V_A = a + \sum_{i=1}^n (b_i \cdot V_i) \quad (68)$$

onde a e b_i são os parâmetros da reta de regressão, estimados para os n postos tomados como referência, pelo método dos mínimos quadrados, de forma a minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre os valores registrados e os valores ajustados pela equação de regressão. A regressão é dita simples quando $n=1$.

Para decidir quantos e quais postos seriam arranjados na equação de regressão de cada série, foram testadas algumas alternativas de arranjo e escolhida aquela que proporcionasse o maior coeficiente de correlação entre os dados da série trabalhada e os ajustados pela equação de regressão.

Em alguns casos foi verificado que valores mais elevados do coeficiente de correlação eram obtidos, quando as séries eram relacionadas mês a mês, ao invés de se utilizar a série como um todo. Neste caso a regressão assume a forma:

$$V_{A,\tau} = a_\tau + \sum_{i=1}^n (b_{i,\tau} \cdot V_{i,\tau}) \quad (69)$$

nesta expressão o índice τ ($\tau = 1, 2, \dots, 12$) indica que os fatores são específicos para cada um dos doze meses do ano.

As séries formadas pelos quadrados dos desvios em relação à reta de regressão, também foram plotadas, servindo assim, como mais uma ferramenta na análise de consistência dos dados.

c. Método da tendência linear central.

Através do método da tendência linear central, que já foi anteriormente descrito, são obtidas sugestões de valores que podem ser utilizados na substituição dos dados considerados inconsistentes pelo método. Alternativamente, foi montada uma sub-rotina que permitiu que os dados considerados consistentes por este método, mas inconsistente por algum dos demais, pudessem ser submetidos ao mesmo processo de correção, ampliando o leque de possibilidades de substituição.

A estrutura do método deixa clara sua vocação para a eliminação de inconsistências, mas foi possível utilizá-lo no preenchimento de falhas mediante uma pequena adaptação. O esquema elaborado foi aplicado para cada falha, sendo descrito a seguir.

Após terem sido substituídos todos os valores considerados inconsistentes, o parâmetro de calibração do método (G) é alterado, de forma que um determinado dado só pode ser aprovado nos testes

quando seu valor for praticamente igual ao da tendência linear central. E, então, atribuído um valor sabidamente impossível à variável, no mês em que ocorreu a falha (como dito anteriormente, os meses em que ocorreram falhas haviam sido eliminados da série) e o processo de correção do valor é repetido, de forma iterativa, até que surja um valor que seja aprovado pelos testes. A partir daí o procedimento é repetido para o preenchimento da próxima falha.

d. Método da estação regional.

HIEZ & RANCAN (1983) apresentaram uma aplicação do chamado método do vetor regional, para o Brasil, para proceder a análise de chuvas baseada na otimização de um vetor característico das chuvas da região de interesse. Neste mesmo sentido JESUS et al. (1985) apresentaram um procedimento objetivo para a determinação de uma base regional, característica do comportamento espacial e temporal das chuvas anuais, ou mensais, de uma zona sob domínio de um mesmo tipo de tempo, para o qual adotaram a denominação de "Estação Regional". Este procedimento foi adaptado para o preenchimento de falhas nas séries das variáveis aqui trabalhadas e, alternativamente, para auxiliar na análise de consistência e substituição de valores em conjunto com os demais métodos.

O procedimento estabelecido visa encontrar dois vetores otimizados, sendo um característico dos postos e o outro representativo da variável na região ao longo do tempo, tais que, a matriz produto destes dois vetores seja aquela cujos elementos melhor se ajustem aos elementos da matriz relativa aos dados observados.

Para cada grupo de n séries de dados mensais, referentes a um conjunto de postos estreitamente correlacionados, foram determinados dois vetores otimizados, um representativo da seqüência temporal da variável e o outro formado pelos coeficientes característicos de cada posto, de tal modo que o produto desses vetores conduza à matriz que mais se aproxima da matriz de dados observados. Na matriz procurada, o primeiro vetor representa as colunas, enquanto o segundo representa as linhas.

O equacionamento geral do processo é representado por

$$\begin{bmatrix}
 x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,j} & \dots & x_{1,n} \\
 x_{2,1} & x_{2,2} & \dots & x_{2,j} & \dots & x_{2,n} \\
 x_{3,1} & x_{3,2} & \dots & x_{3,j} & \dots & x_{3,n} \\
 \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\
 \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\
 \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\
 x_{i,1} & x_{i,2} & \dots & x_{i,j} & \dots & x_{i,n} \\
 \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\
 \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\
 \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\
 x_{m,1} & x_{m,2} & \dots & x_{m,j} & \dots & x_{m,n}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 L_1 \\
 L_2 \\
 L_3 \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 L_i \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 L_m
 \end{bmatrix}
 \cdot
 \begin{bmatrix}
 C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_n
 \end{bmatrix}
 \quad (70)$$

Na matriz formada pelos dados observados nos postos, as linhas representam cada um dos m anos do período de observação e as colunas cada uma das n séries consideradas.

Os desvios entre as chuvas observadas e os valores gerados pelo produto do vetor coluna (L) pelo vetor linha (C), são fornecidos pela equação

$$D_{i,j} = x_{i,j} - L_i C_j \quad (71)$$

para $i = 1, 2, \dots, m$ e $j = 1, 2, \dots, n$.

Os valores de L_i e C_j foram determinados de modo a tornar mínimo o somatório dos quadrados dos desvios absolutos $D_{i,j}$. Para tanto, foi procurado o mínimo da função objetivo dada por

$$FO = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (D_{i,j})^2 \quad (72)$$

No ponto de mínima, valem as duas seguintes expressões da derivada

$$\frac{dFO}{dL_i} = 2 \sum_{j=1}^n (D_{i,j} \cdot dD_{i,j} / dL_i) = 0 \quad (73)$$

e

$$\frac{dFO}{dC_j} = 2 \sum_{i=1}^m (D_{i,j} \cdot dD_{i,j} / dC_j) = 0 \quad (74)$$

Observando-se que

$$D_{i,j} \cdot dD_{i,j} / dL_i = (x_{i,j} - L_i C_j) (-C_j) = L_i C_j^2 - C_j x_{i,j} \quad (75)$$

e

$$D_{i,j} \cdot dD_{i,j} / dC_j = (x_{i,j} - L_i C_j) (-L_i) = L_i^2 C_j - L_i x_{i,j} \quad (76)$$

obtem-se:

$$C_j = \frac{\sum_{i=1}^m L_i x_{i,j}}{\sum_{i=1}^m L_i^2} \quad (\text{para } j = 1, 2, \dots, n) \quad (77)$$

e

$$L_i = \frac{\sum_{j=1}^n C_j x_{i,j}}{\sum_{j=1}^n C_j^2} \quad (\text{para } i = 1, 2, \dots, m) \quad (78)$$

Este sistema de $(m + n)$ equações foi resolvido iterativamente, igualando, inicialmente todos os n elementos C_j à unidade.

A ocorrência de uma falha representa a ocorrência de um valor $x_{i,j}$ desconhecido. Para contornar este problema o procedimento adotado foi o de ignorar os valores $x_{i,j}$ desconhecidos. Dessa forma, ao calcular um valor C_j relativo à uma coluna onde haviam falhas, este cálculo foi realizado com $(m - f_j)$ linhas, sendo f_j o número de valores desconhecidos na coluna j . Da mesma forma, ao calcular um valor L_i relativo à uma linha onde haviam falhas, este cálculo foi realizado com $(n - f_i)$ linhas, sendo f_i o número de valores desconhecidos na linha i . Procedimento análogo foi adotado para os dados considerados inconsistentes.

Os valores que poderiam ser utilizados no preenchimento das falhas, ou correção de inconsistências, foram determinados pela simples multiplicação dos valores de C_j e L_i , resultantes do processo iterativo, correspondentes ao dado sob análise. Não houve preocupação em preservar os desvios entre os dados gerados e observados, ao contrário da proposta dos autores do método. Também diferindo da proposta original dos autores, não foram trabalhados os dados anuais.

3.4 SELEÇÃO FINAL.

Após a análise de consistência das séries disponíveis, foi feita a opção por utilizar apenas 8 dos 15 postos inicialmente selecionados. A decisão por eliminar 7 postos se deve ao fato de que as suas séries de dados apresentaram características, que indicam uma qualidade de informação bem inferior a dos demais postos selecionados. Cada um dos postos eliminados apresentou, com maior ou menor intensidade, uma das características que serão citadas a seguir, ou uma combinação destas.

- presença de erros grosseiros em mais de 5% dos dados;
- ocorrência de falhas esparsas em grande quantidade, ou de períodos superiores a 6 meses sem dados;
- número de dados considerados inconsistentes pelos testes realizados superior a 20% do total da série;
- correlação das séries do posto com as dos demais postos inferior a 0,7;
- padrão de comportamento anormal nas matrizes de correlação e/ou correlação cruzada;
- falta de ajuste das séries às distribuições de probabilidade características.

Em alguns dos 8 postos selecionados foram eliminados alguns anos das séries, por motivos análogos aos acima citados.

Terminada esta última etapa de seleção, o conjunto de postos efetivamente empregados neste estudo, bem como o número máximo de anos trabalhados, ficou definido de acordo com o quadro abaixo.

QUADRO 2 - Postos efetivamente empregados no estudo.

Nº	Nome	Instituição	Nº de anos
1	São Gabriel	DEPREC	26
2	Pau Fincado	DEPREC	28
6	Caçapava	DEPREC	14
7	Barro Vermelho	DEPREC	27
12	Santa Maria	INEMET	14
13	Caçapava	INEMET	32
14	São Gabriel	IPAGRO	13
15	Santa Maria	IPAGRO	14

3.5 BALANÇO HIDRICO

A caracterização do comportamento temporal da ocorrência de déficits e excessos hídricos através do balanço hídrico a nível mensal, é fundamental no planejamento da irrigação e da drenagem, ainda mais quando não há disponibilidade de dados que permitam a elaboração de balanços hídricos em escalas de tempo mais detalhadas. Diversos trabalhos já foram desenvolvidos no sentido de determinar a probabilidade de ocorrência de déficits e excessos hídricos em diferentes regiões, porém alguns fatores dificultam esta tarefa e podem, inclusive, comprometer os resultados encontrados. Entre estes fatores, são citados a seguir alguns dos mais importantes.

- a variabilidade espacial das características do solo a nível local, pode não ser contemplada em um estudo regional mais amplo;
- algumas características do solo consideradas em determinado estudo, podem vir a ser modificadas ao longo do tempo;
- a multiplicidade de espécies que são cultivadas, ou que podem vir a ser implantadas em uma região, é de difícil caracterização;
- em geral, os recursos disponíveis para determinar a quantidade de água consumida por evapotranspiração, a nível regional, são escassos em quantidade ou em qualidade;
- as séries históricas, obtidas pela aplicação de balanços hídricos, representam na verdade uma amostra, uma realização entre as possíveis, dentro de uma população bem maior.

O balanço hídrico adotado neste estudo é mensal, do tipo Thornthwaite-Mather, com algumas adaptações. As ações implementadas, desde a análise dos dados até a obtenção dos resultados finais, buscam tornar estes resultados mais abrangentes, flexibilizando o método na tentativa de contornar as dificuldades apresentadas.

Como alguns dos procedimentos adotados são repetidos para os vários postos e para diferentes situações, serão incluídos no texto apenas alguns resultados obtidos para um determinado posto.

3.5.1 Armazenamento Mensal De Agua

Para efetuar o balanço hídrico foi considerado que o solo atua como um reservatório de umidade, com uma capacidade finita de retenção de água, denominada capacidade de armazenamento (CA). As entradas de água neste reservatório são representadas pela precipitação (P), enquanto as saídas, ou retiradas de água do reservatório, são atribuídas à evapotranspiração potencial (ET), que representa, de maneira conjunta, a capacidade de retirada de água do solo tanto por evaporação direta da superfície, como através das plantas em suas atividades fisiológicas. Os critérios adotados para estabelecer ou estimar os valores de cada componente do balanço hídrico proposto, serão abordados mais adiante. De momento será exposta, tão somente a estrutura do modelo em sua essência.

O objetivo do balanço hídrico adotado é estimar o conteúdo de água no solo mês a mês. Para tanto, foi estabelecido que a quantidade de água armazenada no solo, em determinado mês t (RA_t), é igual à reserva de água no mês anterior (RA_{t-1}) acrescido da precipitação no mês (P_t) e subtraída a evapotranspiração no mesmo (ET_t), o que pode ser representado na forma

$$RA_t = RA_{t-1} + P_t - ET_t \quad (79)$$

Entretanto, o cálculo da quantidade de água armazenada no solo deve atender a duas condições de contorno, quais sejam:

$$0 \leq RA_t \leq CA \quad (80)$$

de onde resultariam duas situações extremas. Uma quando $P_t - ET_t$ excede $CA - RA_{t-1}$ e outra quando ET_t excede o valor de $RA_{t-1} + P_t$.

Na primeira situação a quantidade de água precipitada seria maior do que aquela que o reservatório do solo poderia absorver, mesmo considerando a retirada de água devido a ET. Neste caso ocorre um excedente de água que poderá gerar escoamento superficial, ou percolação profunda, ou retenção superficial, ou uma combinação destes. Mesmo sem preencher toda a capacidade de armazenamento de água, nem toda precipitação é incorporada ao reservatório do solo, devido a fatores relativos às características do solo, da cobertura vegetal e da própria precipitação. Em face destas considerações, antes de efetuar o balanço, é adotado um esquema de transformação da precipitação total mensal em precipitação efetiva (PE), a qual poderá ainda, em função da quantidade de água armazenada no solo, ser

transformada parcial ou totalmente em excesso de água, durante a execução do balanço. A quantia da precipitação efetiva que passa a fazer parte do reservatório do solo é aqui denominada precipitação armazenada (PA), sendo

$$PA_t \begin{cases} = PE_t & \text{para } PE_t - ET_t \leq CA - RA_{t-1} \\ = CA - RA_{t-1} & \text{para } PE_t - ET_t > CA - RA_{t-1} \end{cases} \quad (81)$$

Na segunda situação as retiradas de água do solo seriam maiores do que a reserva disponível, mesmo com a adição das entradas correspondentes. Porém não pode ocorrer um armazenamento de água negativo e, por este motivo, a retirada de água fica limitada à quantidade de água disponível. Dessa forma foi adotado um conceito de evapotranspiração real (ETR), como sendo a porção da evapotranspiração potencial possível de ser suprida pela água acumulada no solo, ou seja

$$ETR_t \begin{cases} = ET_t & \text{para } ET_t \leq RA_{t-1} + PE_t \\ = RA_{t-1} + PE_t & \text{para } ET_t > RA_{t-1} + PE_t \end{cases} \quad (82)$$

A expressão da quantidade de água armazenada no solo em um determinado mês t (RA_t) passa a ser

$$RA_t = RA_{t-1} + PA_t - ETR_t \quad (83)$$

3.5.2 Saldo Potencial Mensal De Agua

A determinação da quantidade de água que fica armazenada no solo mês a mês pode indicar a ocorrência de déficits e excessos hídricos, mas não pode, por si só, indicar a intensidade destes déficits e excessos. A ocorrência de um valor zero para a água armazenada em um determinado mês, por exemplo, indica certamente a ocorrência de um déficit hídrico neste mesmo mês, mas não indica qual deveria ser a quantidade de água aplicada por irrigação, de modo a evitar a ocorrência deste déficit. Para obter de cada balanço hídrico realizado uma informação mais completa neste sentido, foi adotado o cálculo de uma variável que fornece o saldo potencial mensal de água, considerando a água armazenada no mês anterior e toda a água que poderia entrar ou sair do solo, sem considerar as condições de contorno impostas pela capacidade de armazenamento do mesmo. Assim, esta variável representa uma espécie de armazenamento final totalizado e pode ser representada na forma:

$$AFT_t = RA_{t-1} + PE_t - ET_t \quad (84)$$

A variável AFT caracteriza de forma mais completa e, ao mesmo tempo flexível, o estado da relação solo-água-planta-clima em cada mês e, por este motivo, é a variável de maior interesse neste estudo.

As séries históricas de AFT obtidas pela aplicação do balanço hídrico são analisadas de modo a estabelecer o tipo e ordem de modelo estocástico, que melhor se ajusta a cada série e que deve ser utilizado para geração de séries sintéticas, as quais são estatisticamente analisadas para a caracterização do comportamento temporal da água no solo.

O armazenamento final totalizado (AFT) é uma variável que não representa a quantidade de água realmente armazenada no solo, em determinado mês. Representa, isto sim, uma condição potencial do balanço hídrico.

Como as condições de contorno impostas pela capacidade de armazenamento do solo, não são consideradas para o cálculo de AFT, esta variável pode assumir valores negativos e valores superiores à capacidade de armazenamento. No primeiro caso, os valores negativos representariam um consumo potencial de água, caso esta pudesse ser fornecida por algum método artificial, por exemplo. Já os valores superiores à capacidade de armazenamento, representariam o valor do excesso hídrico ocorrido, caso fosse feita a suposição de que ocorra excesso hídrico apenas quando seja ultrapassada a capacidade de armazenamento do solo, por exemplo.

3.5.3 Capacidade De Armazenamento

A capacidade de armazenamento de água no solo (CA) pode ser determinada pela aplicação de fórmulas, que fazem uso, na grande maioria das vezes, dos valores do estado de umidade do solo em capacidade de campo (CC) e no chamado ponto de murcha permanente (PM), da profundidade efetiva e da densidade do solo. Em termos regionais todas estas variáveis apresentam considerável variação, sendo que os valores de CC e PM podem variar de acordo com o método de determinação utilizado.

Trabalhar de modo a caracterizar as variações possíveis em cada um destes componentes, de maneira individual, seria extremamente complexo e trabalhoso. Para contornar este problema foram adotados quatro valores diferentes para a capacidade de armazenamento na região e todos os balanços hídricos executados, bem como as ações consequentes foram repetidos para cada um dos valores adotados.

Este esquema pretende fazer com que os quatro valores adotados possam ser representativos do leque de valores que CA pode assumir, em função das combinações mais comuns dos seus fatores componentes.

Os quatro valores adotados para a capacidade de armazenamento de água no solo foram 50, 100, 150 e 200 mm. Estes valores foram selecionados tendo como referência os trabalhos de MOTA (1980), BELTRAME et al. (1979), BRASIL (1973), BURIOLO et al. (1977), BARRIOS & LEOBEL (1971), INCRA (1973) e MOTA et al. (1970).

3.5.4 Precipitação Efetiva

Muitas propostas já foram elaboradas no sentido de extrair da precipitação total mensal aquela fração relativa à precipitação efetiva, como entendida neste estudo. Entre as que poderiam servir ao propósito aqui presente destacam-se o método proposto pelo Soil Conservation Service (SCS) dos Estados Unidos (PORTO, 1986), o sugerido pela FAO (1987) e outro, semelhante a este, abordado por DORFMAN (1989).

O método do SCS emprega um parâmetro denominado "Número da Curva" (CN), que varia de 0 a 100, em função do tipo de solo e da cobertura vegetal. A já abordada dificuldade em caracterizar a variabilidade, tanto temporal como espacial, da cobertura vegetal e de algumas características do solo, parecem indicar que o método seria mais indicado para locais onde exista um plano de ocupação do solo, que não é o caso em questão.

A metodologia proposta pela FAO considera apenas os totais mensais precipitados, empregando a seguinte relação:

$$PE_t \begin{cases} = 0 & \text{para } P_t \leq 20 \\ = 0,6P_t - 10 & \text{para } 20 < P_t \leq 75 \\ = 0,8P_t - 25 & \text{para } P_t > 75 \end{cases} \quad (85)$$

sendo PE_t e P_t expressos em mm/mês.

A outra metodologia mencionada apresenta a seguinte forma:

$$PE_t \begin{cases} = 0 & \text{para } P_t \leq 10 \\ = 2P_t - 20 & \text{para } 10 < P_t \leq 20 \\ = 0,3P_t(3,5 - P_t/100) & \text{para } 20 < P_t \leq 150 \\ = 90 & \text{para } P_t > 150 \end{cases} \quad (86)$$

sendo PE_t e P_t expressos em mm/mês.

Esta última metodologia, por atribuir um valor máximo à precipitação efetiva, foi preterida em relação ao método sugerido pela FAO, que se apresenta mais flexível. Este por sua vez não é isento de críticas, como a formulada por LANNA *et al.* (-), que ressaltam a deficiente caracterização da intensidade instantânea da precipitação, a partir dos totais mensais. Este método, porém, é de fácil aplicação e parece ser adequado às características do presente trabalho.

3.5.5 Evapotranspiração

Determinar os totais mensais de água retirada do solo por evapotranspiração é uma tarefa crucial no processo de caracterização

do comportamento temporal dos déficits e excessos hídricos. Porém esta etapa do processo é tão complexa quanto importante. Determinar ou estimar o valor da evapotranspiração tem sido objeto de estudos os mais variados em todo o mundo. O grande número de métodos propostos, com suas respectivas modificações, e a diversidade de resultados encontrados em suas aplicações tornam, freqüentemente, a decisão por um ou outro método uma tarefa difícil e incerta.

Os estudos a respeito da evapotranspiração foram intensificados a partir das tentativas feitas por Blaney e Criddle, em 1945 (segundo JENSEN, 1974) e de Thornthwaite, em 1948, de estimar o valor da evapotranspiração total mensal, através de uma relação empírica com a temperatura. Desde então muitos métodos têm sido propostos, variando entre si quanto ao tipo e número de parâmetros envolvidos. Estes métodos estão sendo constantemente testados, sob as condições mais diversas. Destes testes costumam surgir sugestões de modificação, para tornar o método mais adequado à condição específica em questão, ou até mesmo surgem novos métodos. Infelizmente todo este estudo ainda não foi suficiente para solucionar todos os problemas de estimativa da evapotranspiração. Isto se deve, em alguns casos, às variações de eficiência que cada método apresenta, em função do tipo de clima do local em que é aplicado e, em outros casos, à indisponibilidade dos dados meteorológicos requeridos pelos métodos considerados mais eficientes. Inúmeros estudos sobre a estimativa da evapotranspiração refletem uma preocupação generalizada com este problema, entre os quais estão os de DORFMAN (1977), NAKAGAWA (1984), KOTODA (1986) e SADD & SCALOPPI (1988). Por outro lado, já existe um grau de conhecimento suficiente para determinar, em cada situação, que métodos provavelmente proporcionarão melhores resultados e que métodos devem ser preteridos.

Para contornar os problemas de falta de dados e de incerteza a respeito da eficiência dos métodos mais indicados, foram selecionados 6 métodos para estimar a evapotranspiração total mensal e elaborada uma rotina computacional que analisa as informações disponíveis em cada posto para, a partir desta análise, calcular as estimativas da ET, empregando todos os métodos viáveis, entre os 6 selecionados. Dessa forma, foi possível obter em alguns postos até 6 séries mensais diferentes de estimativas de ET.

A escolha dos métodos foi baseada no resultado de alguns trabalhos que já foram, ou serão aqui mencionados e recaiu sobre os métodos de Thornthwaite (TH), Blaney-Criddle (BC), Penman (PN), Hargreaves (HS), Makkink (MK) e Turc (TC). Cada método foi aplicado empregando coeficientes e algumas modificações que, segundo a literatura consultada, podem proporcionar melhores resultados para a região estudada.

O quadro a seguir identifica os métodos que foram empregados para o cálculo da evapotranspiração em cada posto, bem como o número de anos para os quais foi possível aplicar cada método.

QUADRO 3 - Métodos aplicados em cada posto, para estimativa da evapotranspiração.

Nº	Nome	Métodos	Nº de anos
1	São Gabriel	TH e BC	26
2	Pau Fincado	TH e BC	28
6	Caçapava	TH e BC	14
7	Barro Vermelho	TH e BC	27
12	Santa Maria	TH, BC, HS, MK e TC	14
13	Caçapava	TH e BC	32
14	São Gabriel	TH, BC, PN, HS, MK, TC	13
15	Santa Maria	TH, BC, PN, HS, MK, TC	14

A seguir é feita uma descrição sumária dos métodos, como foram empregados.

a. Método de Thornthwaite - TH.

Este método correlaciona a temperatura média mensal do ar com a evapotranspiração potencial, através da equação

$$ET = 16.Fc.(10.T/I)^a \quad (87)$$

onde ET é a evapotranspiração potencial mensal, em mm/mês, para meses de 30 dias, com 12 horas de comprimento médio. Fc é um fator de correção da ET em função da latitude e do mês considerado. T é a temperatura média mensal do ar, em °C. I é um índice de calor anual, resultante da soma de 12 índices mensais de calor, que é obtido pela expressão

$$I = \sum_{i=1}^{12} (0,2.t_i)^{1,014} \quad (88)$$

sendo t_i a temperatura média normal do ar para o mês i , em °C. O parâmetro a é obtido a partir do índice I, através da expressão

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-6} \cdot I^2 + 1,792 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49239 \quad (89)$$

A equação de Thornthwaite tem sido utilizada com frequência, sobretudo quando os dados meteorológicos disponíveis se restringem à temperatura, o que não é raro. CAMARGO (1966) encontrou resultados satisfatórios aplicando a equação de Thornthwaite no planalto paulista, sendo que no Rio Grande do Sul o método já foi utilizado em diversos trabalhos, entre os quais se destaca o de BELTRAME et al. (1979), enquanto MOTA (1975) afirma que o método funcionou bem no Rio Grande do Sul, para períodos mensais. Resultados insatisfatórios da aplicação da equação de Thornthwaite podem ser encontrados nos trabalhos de SADD & SCALOPPI (1988) e DORFMAN (1977), entre outros.

Na Figura 7 podem ser observadas as séries de armazenamento final totalizado (AFT), para o posto 14, obtidas pela aplicação do balanço hídrico anteriormente descrito, para 4 valores de capacidade de armazenamento, tendo sido a evapotranspiração estimada pelo método de Thornthwaite (TH).

b. Método de Blaney-Criddle - BC.

Foi utilizada a versão modificada pelo Serviço de Conservação do Solo do Departamento de Agricultura dos EUA (SADD & SCALOPPI, 1988) e que pode ser apresentada na seguinte forma

$$ET = Kt.p.(0,457 + 8,13.T) \quad (90)$$

onde ET é a evapotranspiração potencial mensal, em mm/mês. T é a temperatura média mensal do ar, em °C. O coeficiente p é a porcentagem de brilho solar mensal em relação ao total anual, enquanto Kt é um coeficiente climático calculado com base na temperatura, através da equação

$$Kt = 0,24 + 0,0312.T \quad (91)$$

Avaliações do método de Blaney-Criddle podem ser encontradas em CAMARGO (1966), DORFMAN (1977), BRASIL (1985) e SADD & SCALOPPI (1988).

Na Figura 8 podem ser observadas as séries de AFT, para o posto 14, obtidas pela aplicação do balanço hídrico anteriormente descrito, para 4 valores de CA, tendo sido a evapotranspiração estimada pelo método de Blaney-Criddle.

c. Método de Penman - PN.

Para estimar o valor da ET pelo método de Penman, foi utilizada a forma reduzida empregada por CAICEDO et al. (1988), com pequenas modificações

$$ET = d.10.L^{-1}.(\delta.Rn/\psi + Ea)/(\delta/\psi + 1) \quad (92)$$

em que,

- ET - evapotranspiração potencial mensal, em mm/mês;
- d - número de dias do mês;
- L - calor latente de evaporação, em cal.cm⁻³;
- δ - declividade da curva de pressão de saturação de vapor versus temperatura, determinada à temperatura média mensal em mb.°C⁻¹;
- Rn - saldo de radiação solar à superfície, em cal.cm⁻².dia⁻¹;
- ψ - constante psicrométrica, em mb.°C⁻¹;
- Ea - termo aerodinâmico.

Os valores de L, δ e β foram calculados mês a mês, em função da temperatura média mensal, na forma abordada por SEDIYAMA (1987).

O termo aerodinâmico adotado foi

$$E_a = 15,49 \cdot (1 + 0,54 \cdot u_z) \cdot (e_a - e_d) \quad (93)$$

onde,

- u_z - velocidade do vento, medida 2m acima da superfície, em m/s;
- e_a - pressão de saturação do vapor, à temperatura média do ar, em mb;
- e_d - pressão de saturação do vapor, à temperatura do ponto de orvalho, em mb.

A velocidade do vento, medida em altura diferente de 2m, é corrigida pela expressão

$$u_z = u_x \cdot (2/z)^{0,2} \quad (94)$$

sendo,

- u_x - velocidade do vento na altura observada, em m/s;
- z - altura de instalação do medidor, em m.

Os valores de R_n foram determinados pela expressão

$$R_n = R_s \cdot (1 - \alpha) - \sigma \cdot T_m^4 \cdot (0,56 - 0,08 \cdot e_d^{0,5}) (0,1 + 0,9 \cdot n/N) \quad (95)$$

em que,

- R_s - radiação solar global, em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$;
- α - albedo, igual a 0,15;
- σ - constante de Stefan-Boltzmann, igual a $1,171 \cdot 10^{-7} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{°K}^{-4} \cdot \text{dia}^{-1}$;
- T_m - temperatura média do ar, em °K;
- n - insolação total ocorrida durante o mês, em h;
- N - insolação máxima possível para o mês, em h.

Onde havia medidas de insolação, mas não havia medidas de radiação solar global, esta foi estimada através da expressão

$$R_s = R_a (0,23 + 0,48 \cdot n/N) \quad (96)$$

sendo,

- R_a - radiação solar total, no topo da atmosfera, em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$.

Os coeficientes das equações para estimativa de R_n e R_s foram adotados considerando sugestões encontradas em BRASIL (1971), BERLATO (1976) e BERLATO & MOLION (1981), além das outras obras citadas neste item.

Na Figura 9 podem ser observadas as séries de AFT, para o posto 14, obtidas pela aplicação do balanço hídrico anteriormente descrito, para 4 valores de CA, tendo sido a evapotranspiração estimada pelo método de Penman.

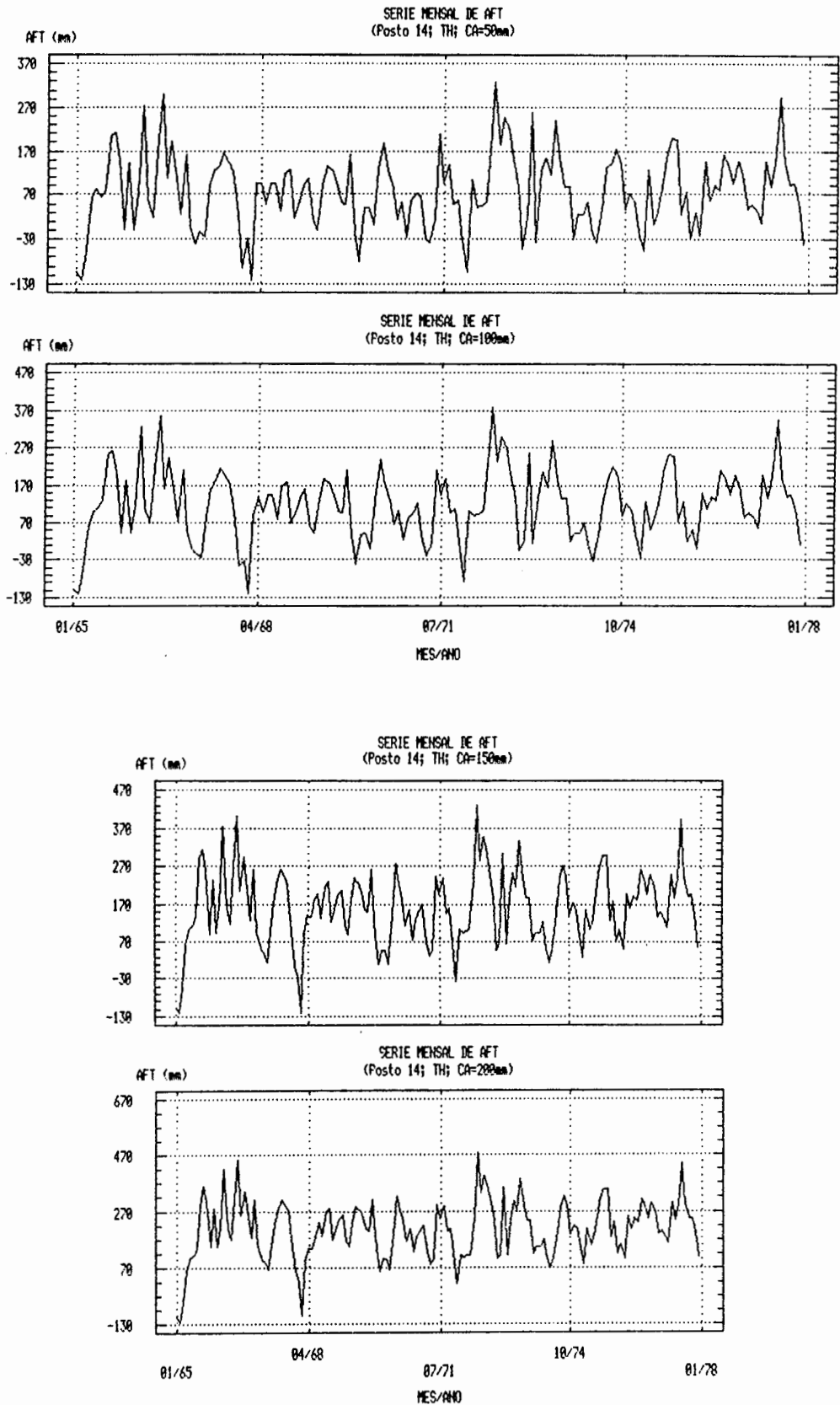


FIGURA 7 - Série mensal de Armazenamento Final Totalizado obtida pelo balanço hídrico, no posto 14, para as capacidades de armazenamento de 50, 100, 150 e 200mm, com evapotranspiração estimada pelo método de Thornthwaite.

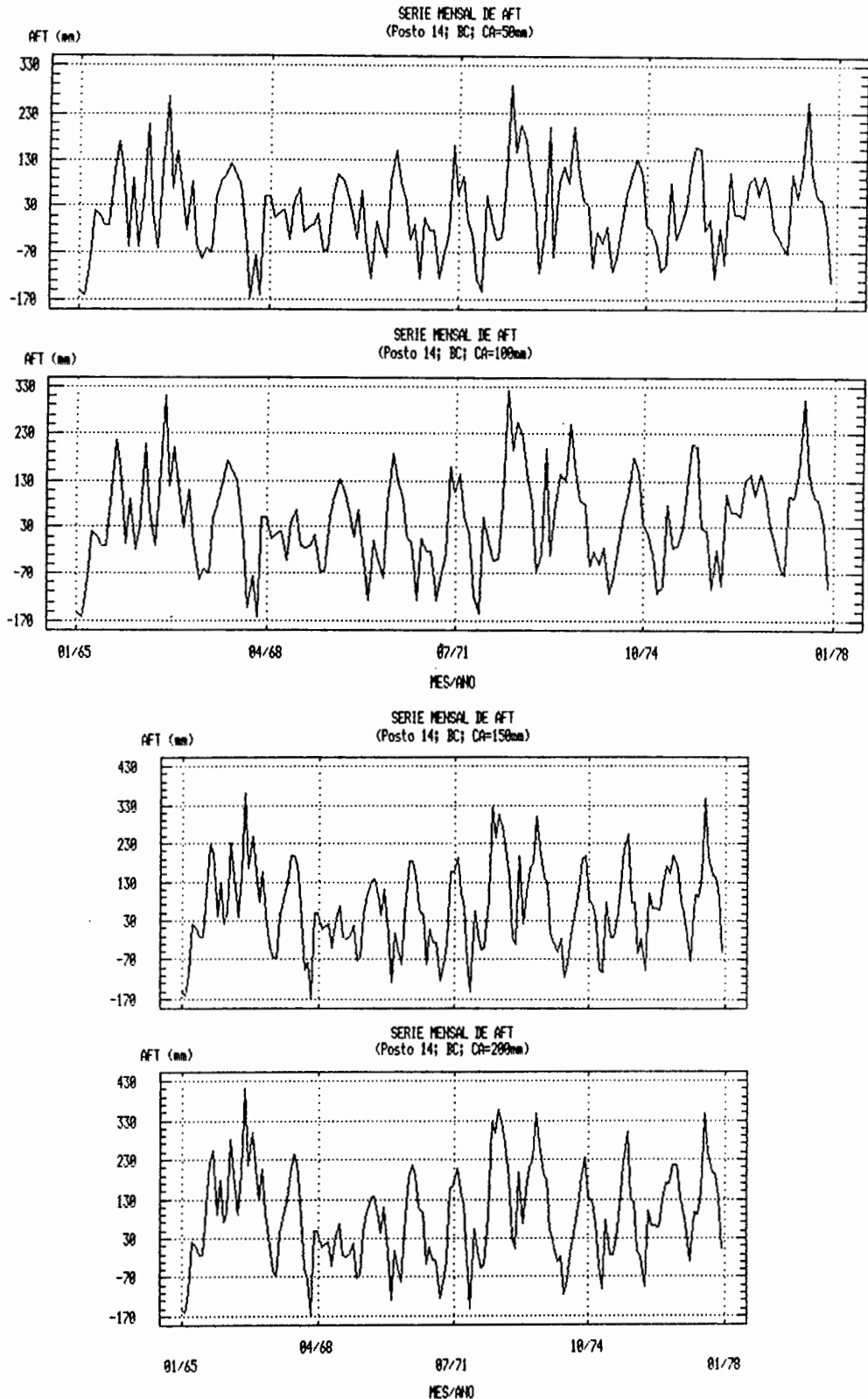


FIGURA 8 - Série mensal de Armazenamento Final Totalizado obtida pelo balanço hídrico, no posto 14, para as capacidades de armazenamento de 50, 100, 150 e 200mm, com evapotranspiração estimada pelo método de Blaney-Criddle.

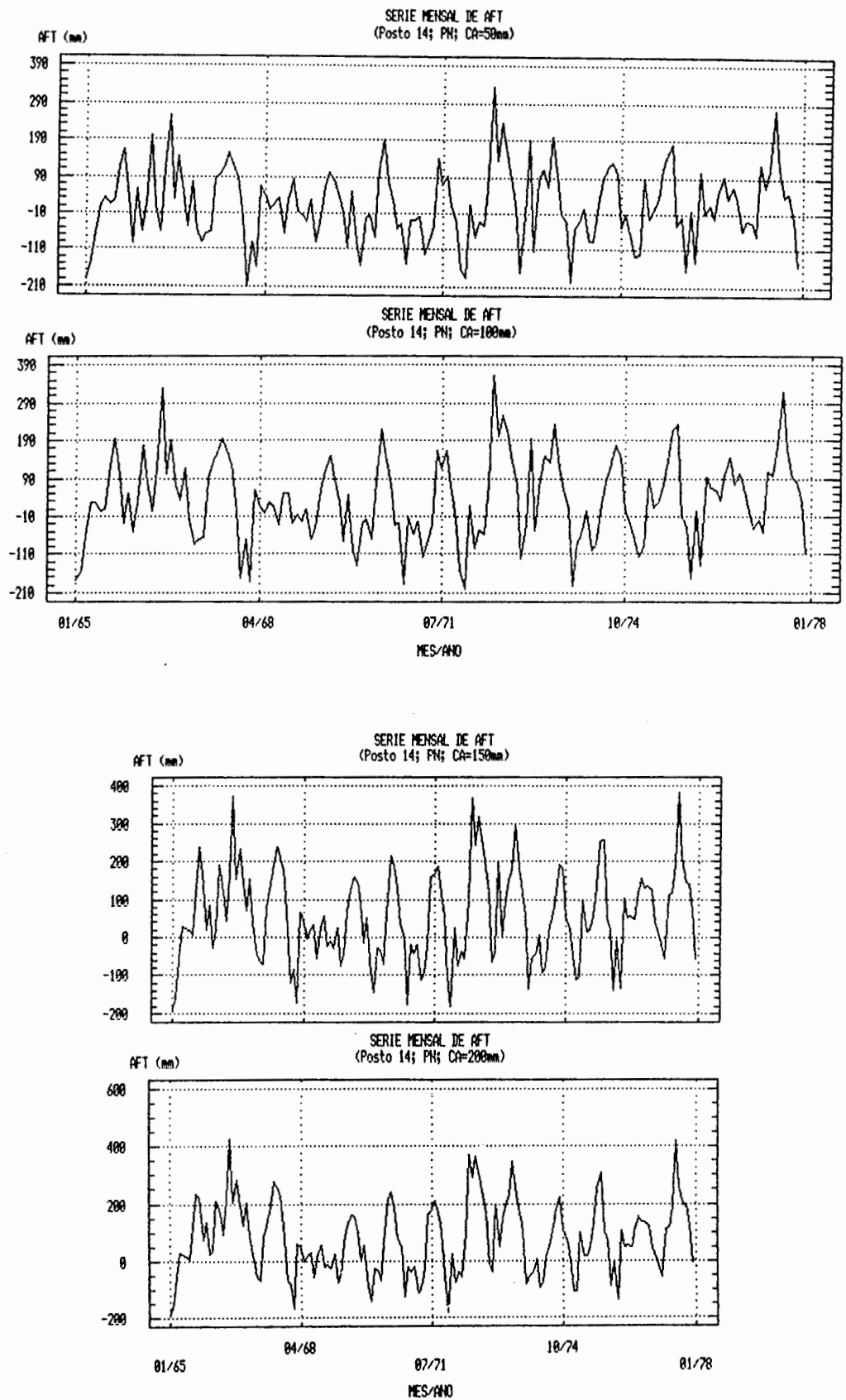


FIGURA 9 - Série mensal de Armazenamento Final Totalizado obtida pelo balanço hídrico, no posto 14, para as capacidades de armazenamento de 50, 100, 150 e 200mm, com evapotranspiração estimada pelo método de Penman.

d. Método de Hargreaves - HS.

Foi utilizada a versão modificada da equação de Hargreaves, encontrada no trabalho de SADD & SCALOPPI (1988), adaptada à apresentação utilizada por SEDIYAMA (1987), na forma

$$ET = 0,164.d.(T + 17,8).Rs/L . \quad (97)$$

Todos os fatores que aparecem nesta equação seguem as definições anteriormente apresentadas, sendo que o detalhamento a respeito das modificações feitas sobre a equação original de Hargreaves, pode ser encontrado em SEDIYAMA (1987) e SAMANI & PESSARAKLI (1986).

Na Figura 10 podem ser observadas as séries de armazenamento final totalizado (AFT), para o posto 14, obtidas pela aplicação do balanço hídrico anteriormente descrito, para 4 valores de capacidade de armazenamento, tendo sido a evapotranspiração estimada pelo método de Hargreaves (HS).

e. Método de Makkink - MK.

DORFMAN (1977), propôs e testou uma versão modificada da equação de Makkink, obtendo, através desta versão modificada, resultados bem mais satisfatórios do que aqueles obtidos por meio da equação original. Uma análise superficial do trabalho de SADD & SCALOPPI (1988) parece confirmar os resultados obtidos por Dorfman. Sendo assim foi adotada a versão modificada, na forma

$$ET = 10.d.8/(8+f).Rs/L . \quad (98)$$

Todos os fatores que aparecem nesta equação seguem as definições anteriormente apresentadas.

Na Figura 11 podem ser observadas as séries de armazenamento final totalizado (AFT), para o posto 14, obtidas pela aplicação do balanço hídrico anteriormente descrito, para 4 valores de capacidade de armazenamento, tendo sido a evapotranspiração estimada pelo método de Makkink (MK).

f. Método de Turc - TC.

Para estimar o valor da evapotranspiração potencial, pelo método de Turc, foram empregadas as expressões encontradas em DORFMAN (1977) e SADD & SCALOPPI (1988), na seguinte forma

$$UR \begin{cases} \text{se } \geq 50\%, \text{ então,} \\ ET = 0,0134.d.T/(T + 15).(Rs + 50) \\ \\ \text{se } < 50\%, \text{ então,} \\ ET = 0,0134.d.T/(T + 15).(Rs + 50).[1 + (50 - UR)/70] \end{cases} \quad (99)$$

sendo UR o valor da umidade relativa, do ar atmosférico, média mensal, expresso em porcentagem (%), enquanto que os demais fatores já foram definidos.

Na Figura 12 podem ser observadas as séries de armazenamento final totalizado (AFT), para o posto 14, obtidas pela aplicação do balanço hídrico anteriormente descrito, para 4 valores de capacidade de armazenamento, tendo sido a evapotranspiração estimada pelo método de Turc (TC).

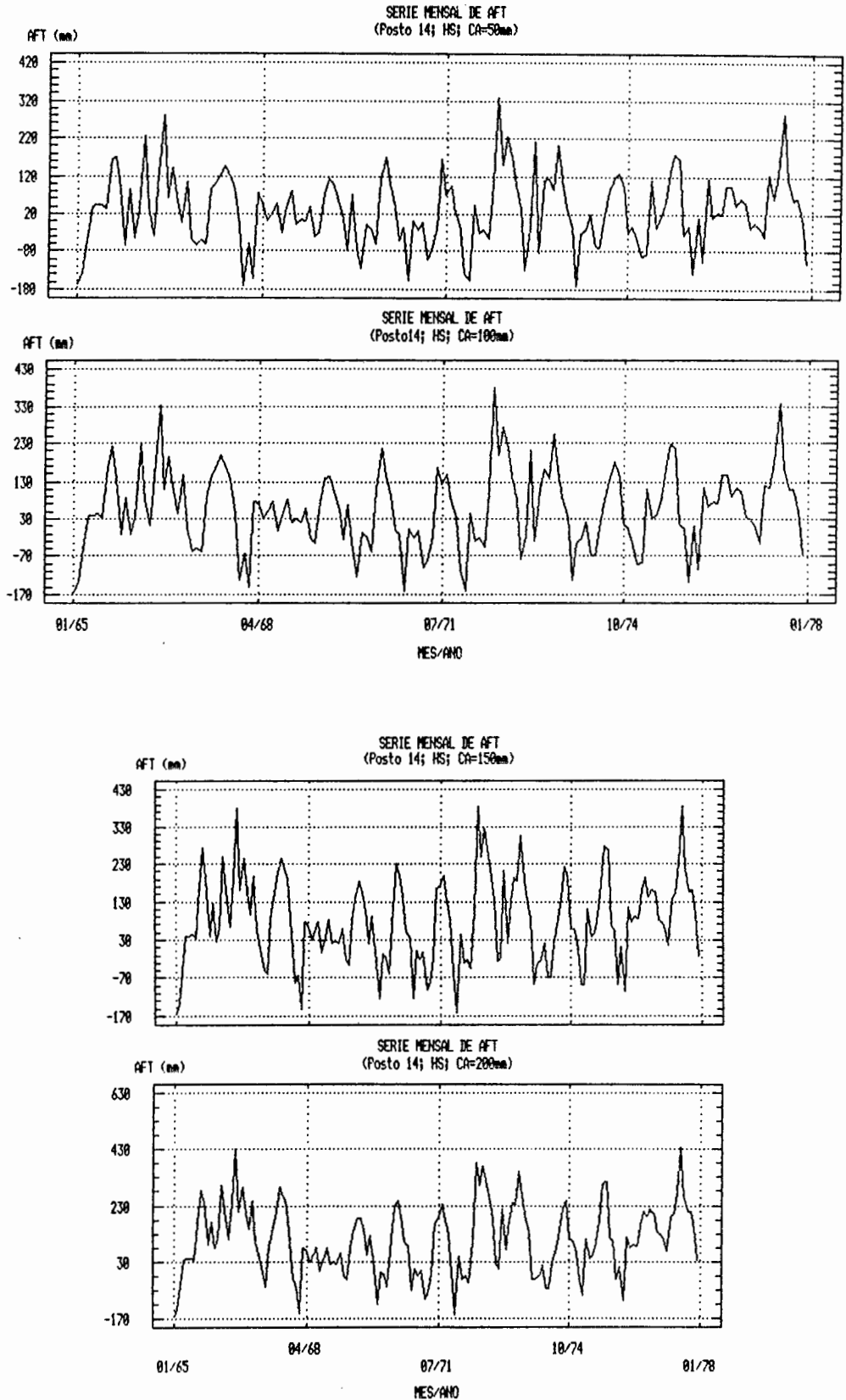


FIGURA 10 - Série mensal de Armazenamento Final Totalizado obtida pelo balanço hídrico, no posto 14, para as capacidades de armazenamento de 50, 100, 150 e 200mm, com evapotranspiração estimada pelo método de Hargreaves.

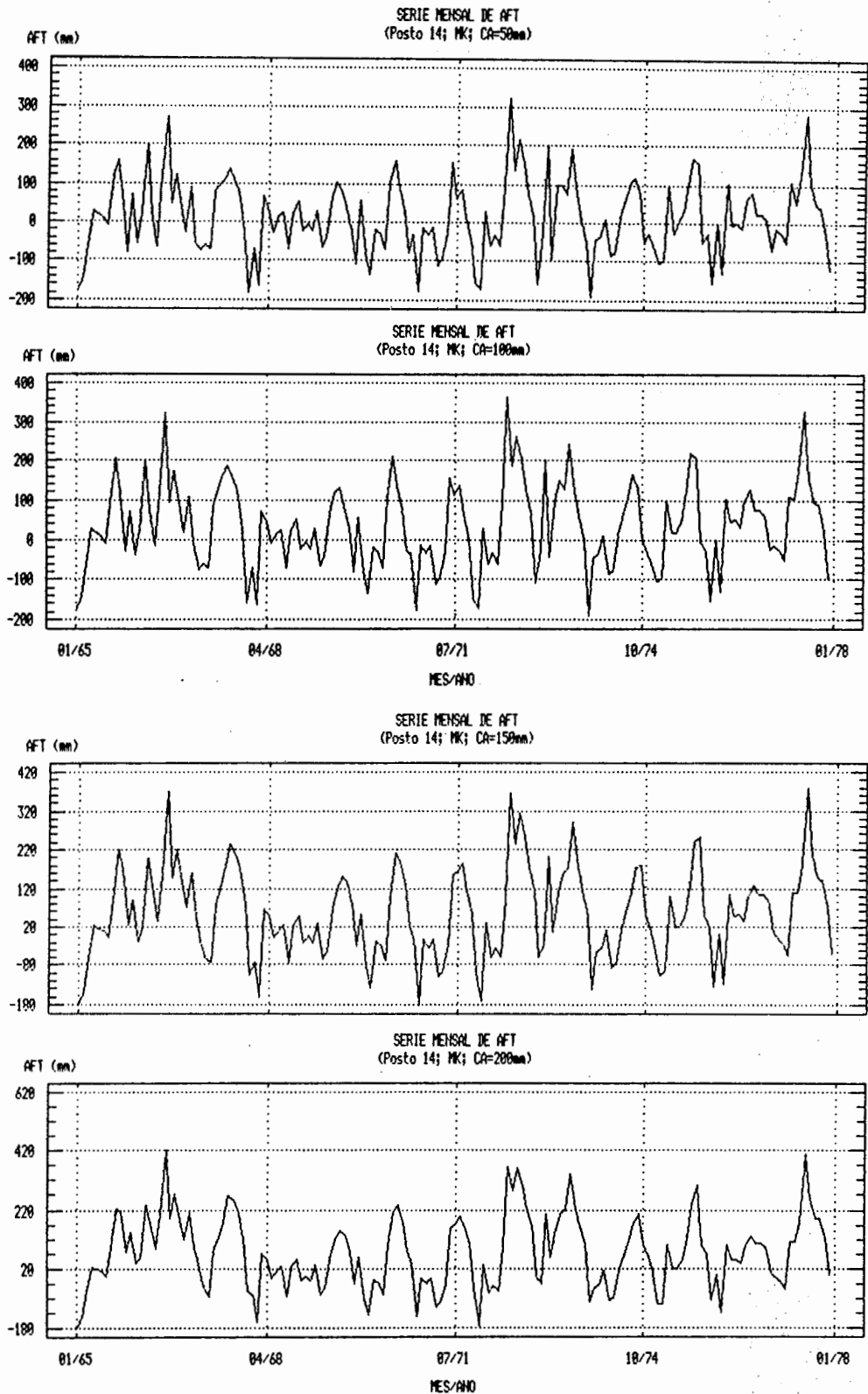


FIGURA 11 - Série mensal de Armazenamento Final Totalizado obtida pelo balanço hídrico, no posto 14, para as capacidades de armazenamento de 50, 100, 150 e 200mm, com evapotranspiração estimada pelo método de Makkink.

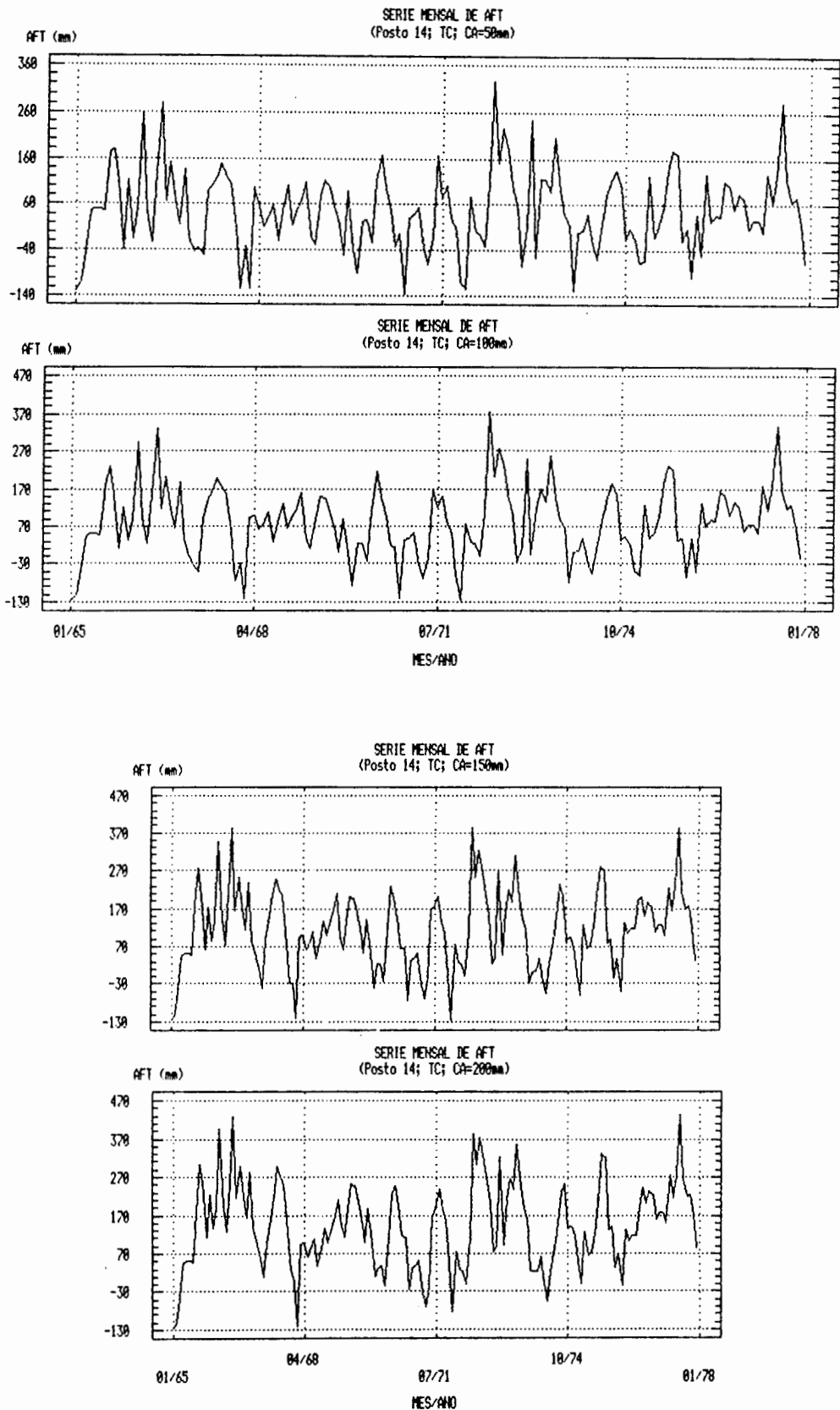


FIGURA 12 - Série mensal de Armazenamento Final Totalizado obtida pelo balanço hídrico, no posto 14, para as capacidades de armazenamento de 50, 100, 150 e 200mm, com evapotranspiração estimada pelo método de Turc.

3.6 AJUSTE DOS MODELOS

3.6.1 Generalidades

Os modelos ajustados neste estudo foram empregados de maneira análoga à descrita na Revisão Bibliográfica, porém, no caso dos modelos multiplicativos o passo inicial, que consiste na diferenciação das séries temporais não foi realizado, visto que para recuperar o processo original, se faz necessário integrar o processo diferenciado.

Como já foi esclarecido, seria necessário, para integrar o processo, manter o nível do mesmo (constante de integração), que foi perdido durante o processo de diferenciação. Dessa forma os modelos ARIMA multiplicativos não se prestam à geração de séries hidrológicas estacionárias, que é um dos objetivos do trabalho. Dessa forma foi necessário implementar uma modificação no modelo, que consistiu em manter as diferenciações sazonais e não-sazonais nulas ($d = 0$ e $D = 0$). Assim é possível obter uma espécie de modelo "ARMA multiplicativo" (ARMAX), que é na verdade uma particularização dos modelos ARIMA multiplicativos, representado por $ARIMA(p,0,q) \times (P,0,Q)_w$, expresso como

$$(1 - \sum_{i=1}^P \phi_i B^i)(1 - \sum_{i=1}^P \varphi_i B^i) x_t = (1 - \sum_{i=1}^Q \theta_i B^i)(1 - \sum_{i=1}^Q \Theta_i B^i) \varepsilon_t \quad (100)$$

3.6.2 Identificação Do Modelo

Foi feita uma análise preliminar dos dados plotando, as séries mensais de AFT (armazenamento final totalizado) em sua forma original (Fig. 13), o que permitiu uma primeira avaliação dos dados quanto à existência de tendência, periodicidade, estacionaridade, distribuição de frequências e ocorrência de valores extremos.

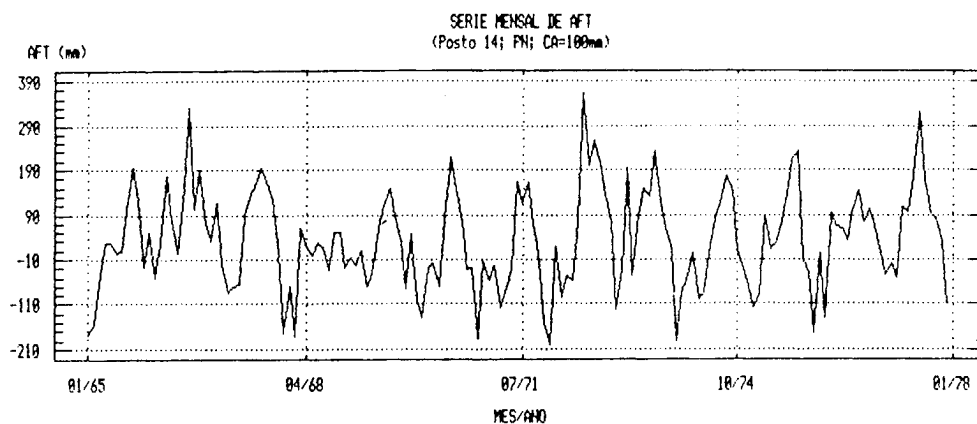


FIGURA 13 - Série mensal de Armazenamento Final Totalizado, no posto 14, para a capacidade de armazenamento de 100mm, com evapotranspiração estimada pelo método de Penman.

Na Figura 14 a mesma série teve seus valores plotados usando a média da série como nível de referência. Pode ser observado claramente que um valor acima da média geralmente é seguido de outro valor acima da média e que um valor abaixo da média é, geralmente, seguido de outro valor abaixo da média. Segundo SALAS et al. (1985) esta situação caracteriza uma clara dependência temporal positiva e, neste caso, um modelo AR(1), com $\phi_1 > 0$, poderia ser um modelo candidato ao ajuste da série temporal.

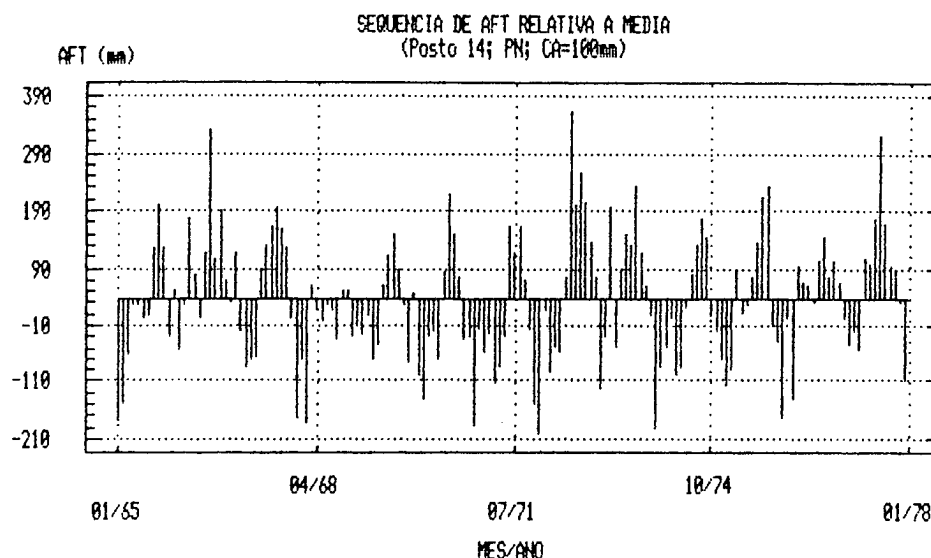


FIGURA 14 - Série mensal de Armazenamento Final Totalizado (Posto 14, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 100mm, Penman), relacionada à média.

Todas as séries plotadas apresentaram o mesmo tipo de comportamento, sem evidenciar, na maioria dos casos, qualquer tipo de tendência e, em alguns poucos casos, uma tendência positiva ou negativa irrelevante, cuja ocorrência certamente está relacionada com questões de amostragem. Isto fica bem evidenciado quando são comparadas as Figuras 15 e 16. Na primeira está plotada uma seqüência completa de 13 anos de valores de AFT (posto 14, CA=100mm, PN) e sua respectiva estimativa de tendência, enquanto que na segunda a mesma seqüência de AFT teve seus 18 últimos valores retirados, sendo estes plotados, com sua respectiva estimativa de tendência. Fica claro que na primeira situação poderia ser identificada uma tendência positiva, o que não se confirma na segunda situação.

A análise das séries originais de AFT permitiu identificar a ocorrência de sazonalidade anual, o que já era esperado, em consequência de as variáveis envolvidas nas estimativas de AFT serem variáveis meteorológicas, que apresentam uma natural periodicidade. Na Figura 17 pode ser observada uma série de AFT (posto 14, CA=100mm, PN) cujos valores foram agrupados mês a mês e plotados em relação à média do mês respectivo. Além da periodicidade fica também evidenciada a não estacionaridade da série quanto à média e à variância.

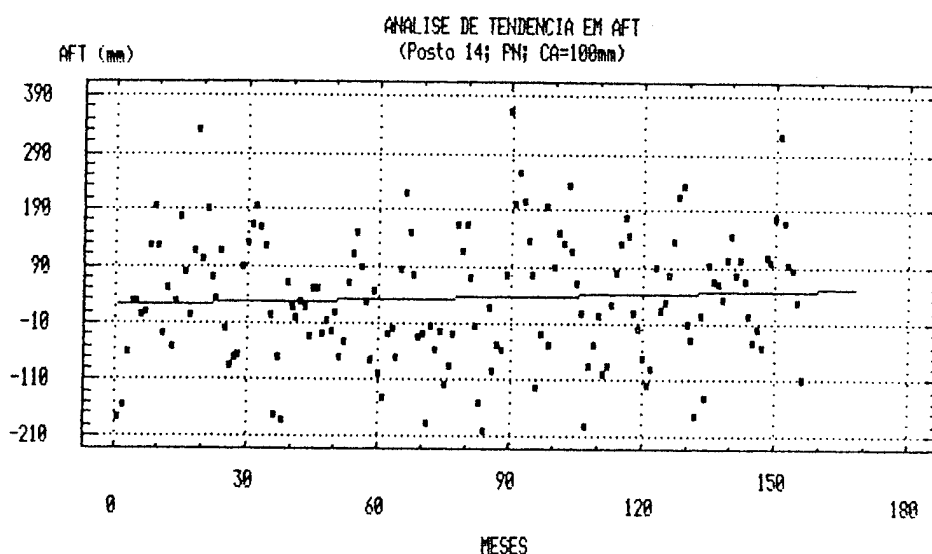


FIGURA 15 - Valores mensais de Armazenamento Final Totalizado (posto 14, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 100mm, Penman), e estimativa de tendência.

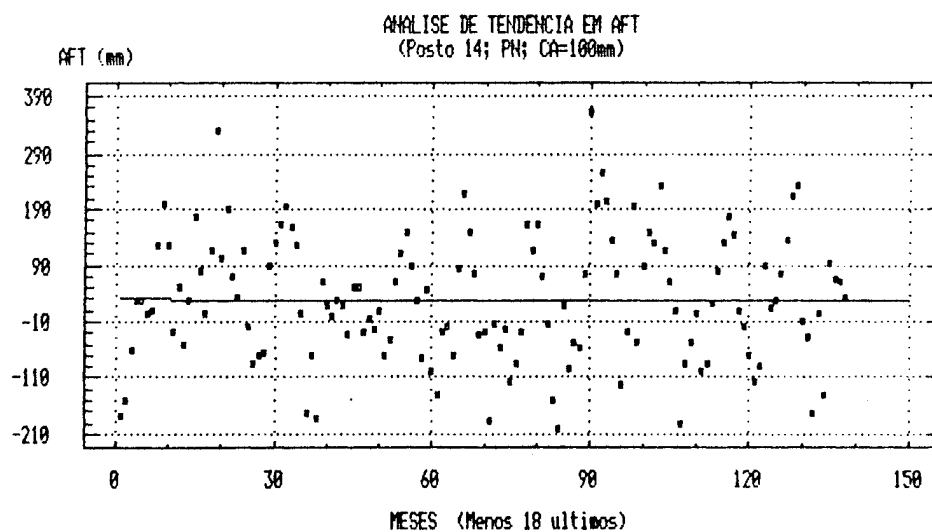


FIGURA 16 - Valores mensais de Armazenamento Final Totalizado (posto 14, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 100mm, Penman), sem os 18 últimos valores, e estimativa de tendência.

Como a idéia básica do estudo consiste em ajustar modelos estocásticos, dos tipos descritos por BOX & JENKINS (1976), às séries históricas de AFT, foi necessário verificar se as séries originais eram normalmente distribuídas, ou se seria necessário algum tipo de transformação dos dados (normalização). Para tanto cada série mensal de AFT foi submetida a três testes onde foi testada a hipótese de a série ser normalmente distribuída. Os testes aplicados foram o de Smirnov-Kolmogorov sobre o gráfico de probabilidade normal, o de qui-quadrado e o de assimetria da normalidade. A descrição dos testes empregados está detalhada no item 3.6.2.

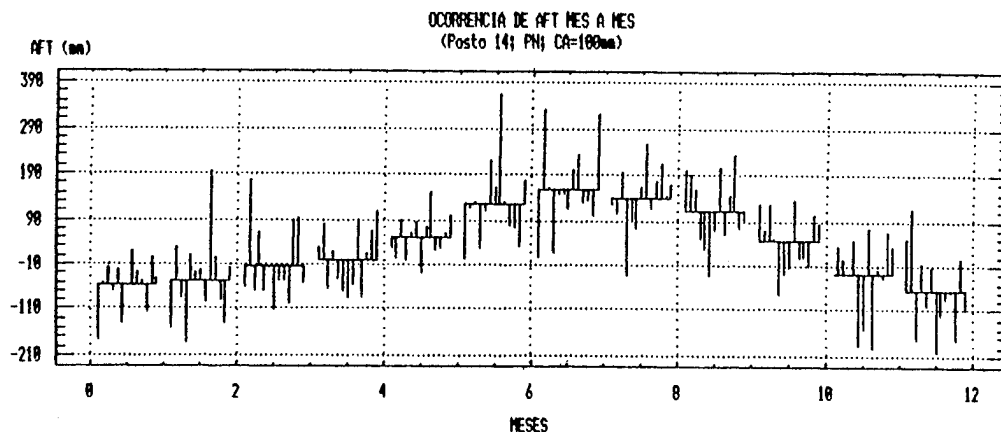


FIGURA 17 - Valores de Armazenamento Final Totalizado (posto 14, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 100mm, Penman), agrupados mês a mês, em relação à média mensal.

As séries de AFT foram consideradas, a partir dos testes de normalidade realizados, como sendo aproximadamente normais, dispensando qualquer trabalho de normalização. De forma ilustrativa serão mostrados, os resultados obtidos quando da aplicação dos testes de normalidade à série mensal de AFT anteriormente já empregada.

Teste de qui-quadrado.

Na Tabela 1 são mostrados os resultados do cálculo de qui-quadrado (X^2) para cada um dos intervalos de classe nos quais foi dividida a série de AFT. A soma destes resultados (2,25) indica que, de acordo com a tabela de distribuição de qui-quadrado acumulada, a hipótese de normalidade da série não pode ser rejeitada a um nível de significância de 1,3%.

TABELA 1 - Valores de X^2 para a série de Armazenamento Final Totalizado (posto 14, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 100mm, Penman).

	Limite Inferior	Limite Superior	Freqüência Observada	Freqüência Esperada	Qui-quadrado
até ou abaixo de		-157.26	7	6.5	.03145
	-157.27	-120.90	5	6.0	.17898
	-120.91	-84.54	9	9.5	.02841
	-84.55	-48.17	16	13.5	.46717
	-48.18	-11.81	20	17.2	.46175
	-11.82	24.54	18	19.7	.14284
	24.55	60.90	17	20.3	.52338
	60.91	97.26	19	18.7	.00349
	97.27	133.63	16	15.6	.01061
	133.64	170.00	12	11.7	.00983
	170.01	206.36	9	7.8	.17171
acima de	206.37		8	9.5	.22255

Teste de Smirnov-Kolmogorov.

O gráfico de probabilidade normal da referida série pode ser visto na Figura 18 e a aplicação do teste de Smirnov-Kolmogorov indica que a hipótese de normalidade da série não pode ser rejeitada a um nível de 0,01%.

GRÁFICO DE PROBABILIDADE NORMAL
(Posto 14; PN; CA=100mm)

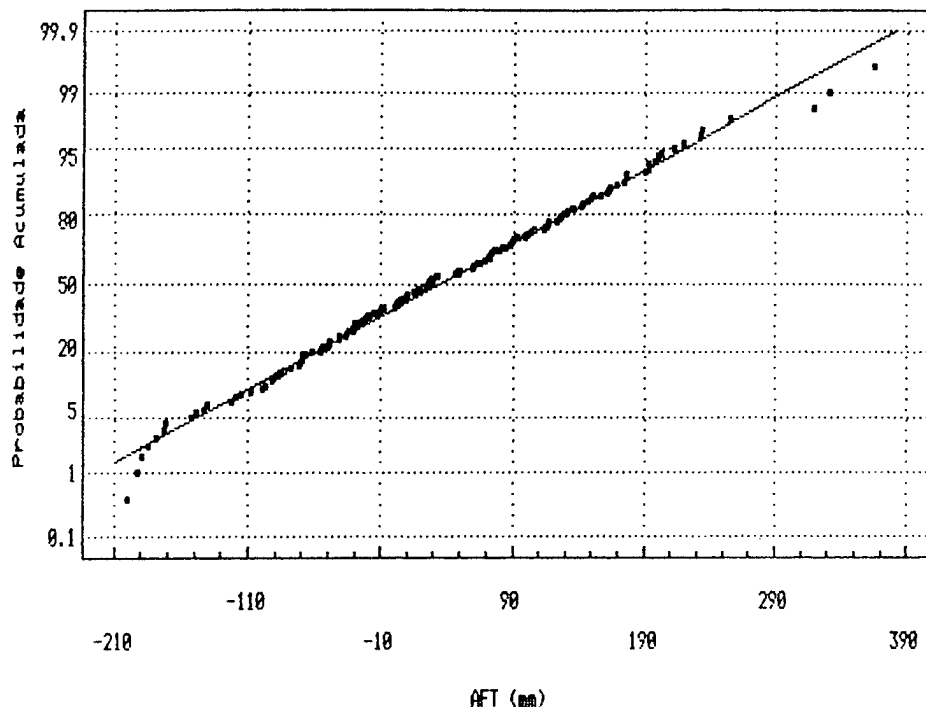


FIGURA 18 - Gráfico de probabilidade normal para série de Armazenamento Final Totalizado (posto 14, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 100mm, Penman).

Teste de assimetria da normalidade.

De acordo com o teste de assimetria da normalidade a hipótese de que os valores da série de AFT em questão sejam normalmente distribuídos não poderia ser rejeitada, a um nível de probabilidade de 98%, desde que o coeficiente de assimetria a da série ficasse entre os limites $-0,456 \leq a \leq 0,456$. Como o coeficiente de assimetria estimado para a série foi igual a 0,206 a hipótese de normalidade não pode ser rejeitada.

A análise do comportamento das médias e desvios padrão demonstrou, como já foi visto (Figura 17), que as séries originais não eram estacionárias quanto à média e à variância e, portanto foi necessário uma operação de padronização das séries, a fim de obter, a partir da série original não estacionária, uma série padronizada, normalmente distribuída, com média zero e desvio padrão próximo de 1.

Para tornar as séries estacionárias, considerando a periodicidade evidenciada pelas médias e desvios padrão, foi executada a seguinte operação,

$$y_{v,\tau} = \frac{x_{v,\tau} - \mu_{\tau}}{\sigma_{\tau}} \quad (101)$$

onde $x_{v,\tau}$ representa o valor de AFT original, no ano v e no mês τ e sendo μ_{τ} e σ_{τ} a média e o desvio padrão estimados, respectivamente, da série original, para o mês τ correspondente. $y_{v,\tau}$ é a variável padronizada (ou variável reduzida), normalmente distribuída, com média zero e desvio padrão unitário. Desta forma a não estacionaridade e a periodicidade são removidas e a estrutura de dependência temporal da série é preservada. Os resultados da operação de padronização aplicada à uma série de AFT (posto 14, CA=100mm, PN) podem ser observados nas Figuras 19 e 20, onde aparecem, respectivamente, a série de AFT padronizada e os valores de AFT agrupados mês a mês em relação à média mensal.

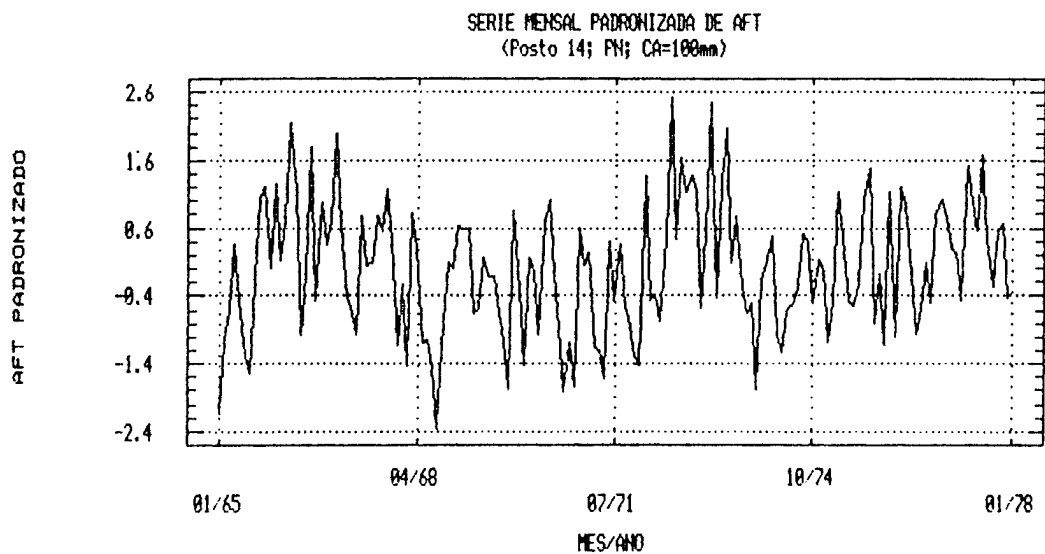


FIGURA 19 - Série mensal de Armazenamento Final Totalizado padronizada, no posto 14 (Capacidade de Armazenamento de 100mm; evapotranspiração estimada pelo método de Penman).

Após obter as séries padronizadas de AFT foram estimados os correlogramas $r_k(y)$ de y_k e plotados os valores de $r_k(y)$ versus o tempo de retardo k , para $k=1, \dots, L$, tendo o valor de L variado de 0,10 a 0,15 da extensão N da série de dados mensais. A seguir foram também estimados os correlogramas parciais $\phi_k(k)$ das séries e plotados seus valores versus o tempo de retardo k .

Na Figura 21 podem ser observados o correlograma e o correlograma parcial de uma série mensal original de AFT (posto 14, CA=100mm, PN), onde ficam caracterizadas a periodicidade da série e a existência de uma estrutura de correlação positiva. Já na Figura 22 podem ser observados o correlograma e o correlograma parcial desta mesma série após efetuada a operação de padronização. Pela comparação das duas figuras fica evidenciado que a operação de padronização removeu a periodicidade, porém, manteve a estrutura de correlação positiva entre os valores.

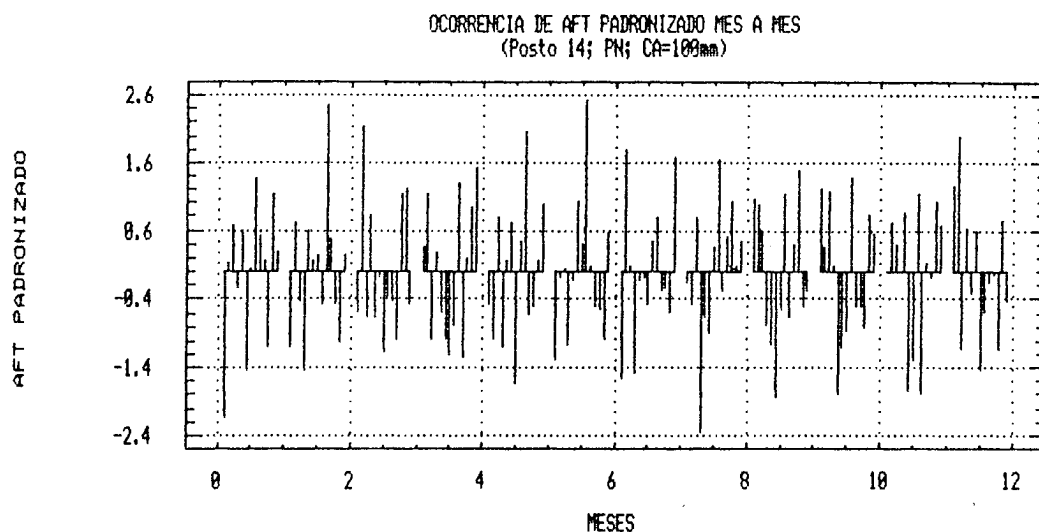


FIGURA 20 - Valores de Armazenamento Final Totalizado padronizados (posto 14, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 100mm, Penman), agrupados mês a mês, em relação à média mensal.

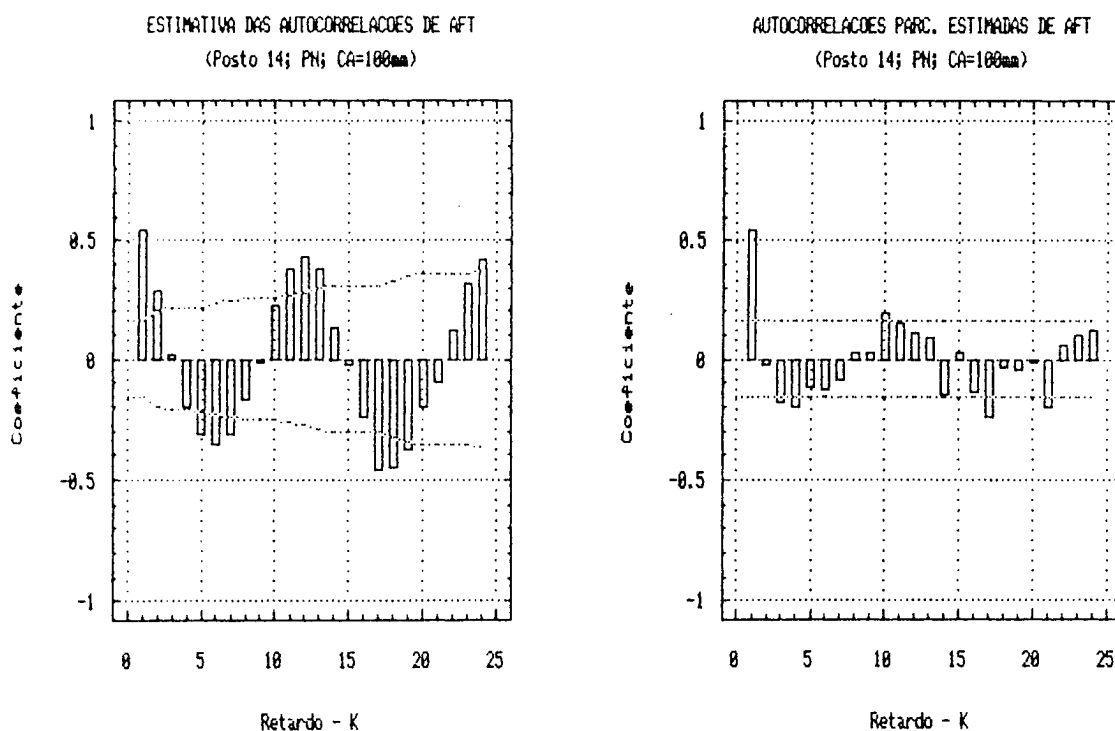


FIGURA 21 - a) correlograma da série original de Armazenamento Final Totalizado (posto 14, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 100mm, Penman); b) correlograma parcial da série original de Armazenamento Final Totalizado (posto 14, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 100mm, Penman).

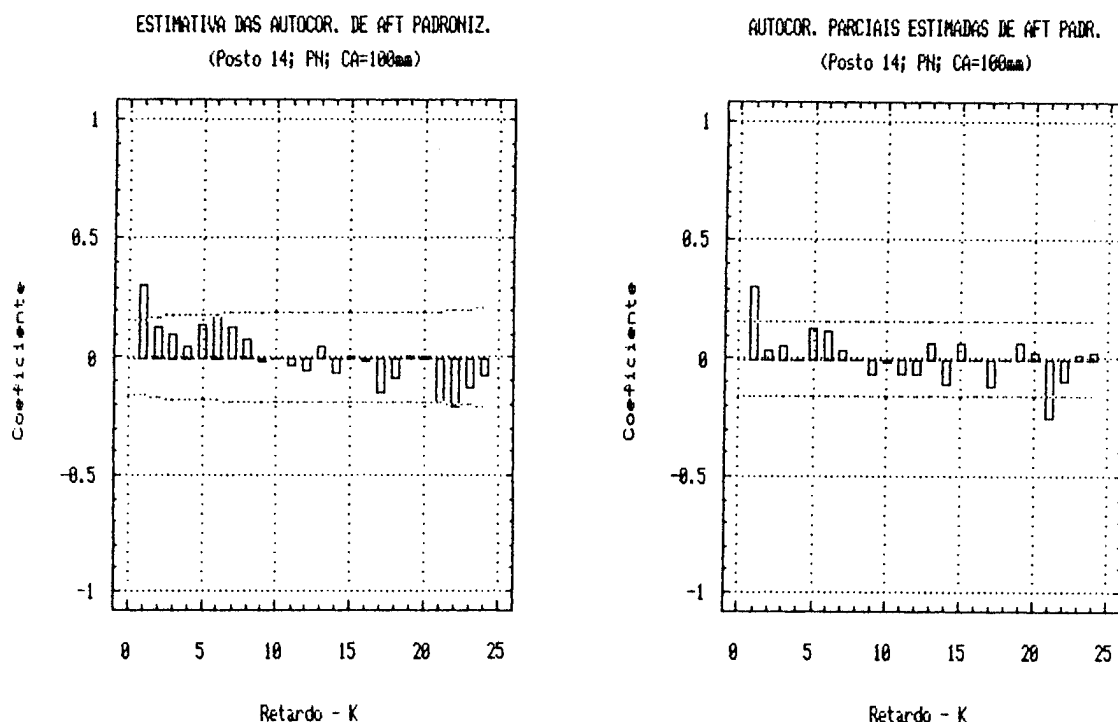


FIGURA 22 - a) correlograma da série padronizada de Armazenamento Final Totalizado (posto 14, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 100mm, Penman); b) correlograma parcial da série padronizada de Armazenamento Final Totalizado (posto 14, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 100mm, Penman).

Através da análise dos gráficos das séries temporais de AFT e de seus respectivos gráficos de correlogramas e de correlogramas parciais é possível ter uma idéia aproximada do tipo e ordem de modelo que pode ser ajustado para cada série. Porém, na maioria dos casos não foi possível determinar, tendo por base apenas este procedimento, que modelo melhor se ajustaria a cada série, havendo portanto necessidade de testar mais de um modelo e, posteriormente, escolher o modelo mais adequado entre os concorrentes.

A seguir é apresentada a Tabela 2, que foi utilizada como referencial para a escolha dos modelos que possivelmente poderiam apresentar uma qualidade de ajuste satisfatória para as séries disponíveis. A tabela foi montada a partir de similares apresentadas por BOX & JENKINS (1976, pg. 176 e 177) e SALAS et al. (1985, pg. 198).

TABELA 2 - Comportamento das funções de autocorrelação e autocorrelação parcial para um processo ARMA de ordem (p,q).

PROCESSO ARMA (1,0)	
Comportamento de r_k	Decresce em curvas exponenciais amortecidas, podendo apresentar ondas senoidais amortecidas.
Comportamento de ϕ_{kk}	Apenas ϕ_{11} diferente de zero.
Estimativas preliminares	$\phi_1 = r_1$
Região Admissível	$-1 < \phi_1 < 1$

PROCESSO ARMA (0,1)	
Comportamento de r_k	Apenas r_1 diferente de zero.
Comportamento de ϕ_{kk}	Decrescimento predominantemente exponencial.
Estimativas preliminares	$r_1 = -\theta_1 / (1 + \theta_1^2)$
Região Admissível	$-1 < \theta_1 < 1$

PROCESSO ARMA (2,0)	
Comportamento de r_k	Apresenta forma mista, com curvas exponenciais e/ou ondas senoidais, com amortecimento.
Comportamento de ϕ_{kk}	Apenas ϕ_{11} e ϕ_{22} diferente de zero.
Estimativas preliminares	$\phi_1 = r_1(1-r_2)/(1-r_1^2)$ $\phi_2 = (r_2-r_1^2)/(1-r_1^2)$
Região Admissível	$-1 < \phi_2 < 1$; $\phi_2 + \phi_1 < 1$; $\phi_2 - \phi_1 < 1$

TABELA 2 - Continuação.

PROCESSO ARMA (0,2)	
Comportamento de r_k	Apenas r_1 e r_2 diferentes de zero.
Comportamento de ϕ_{kk}	Apresenta forma mista, com curvas exponenciais e/ou ondas senoidais, com amortecimento.
Estimativas preliminares	$r_1 = -\theta_1(1 - \theta_2)/(1 + \theta_1^2 + \theta_2^2)$ $r_2 = -\theta_2/(1 + \theta_1^2 + \theta_2^2)$
Região Admissível	$-1 < \theta_2 < 1$; $\theta_2 + \theta_1 < 1$; $\theta_2 - \theta_1 < 1$

PROCESSO ARMA (1,1)	
Comportamento de r_k	Decai exponencialmente após o primeiro retardo.
Comportamento de ϕ_{kk}	Dominado por curvas exponenciais amortecidas, após o primeiro retardo.
Estimativas preliminares	$r_1 = (1 - \theta_1\phi_1)(\phi_1 - \theta_1)/(1 + \theta_1^2 - 2\phi_1\theta_1)$ $r_2 = r_1\phi_1$
Região Admissível	$-1 < \phi_1 < 1$; $-1 < \theta_1 < 1$

3.6.3 Estimação Dos Parâmetros

a. Nos modelos AR.

Os modelos AR(p) ajustados neste estudo são do tipo periódicos com parâmetros autorregressivos constantes. Esta escolha preliminar se deve ao fato de que as séries apresentam periodicidade intra-anual e são relativamente pequenas, visto que, se fossem utilizados coeficientes autorregressivos periódicos mensais haveria um acréscimo de 11 vezes p parâmetros ao modelo, o que certamente violaria o princípio da parcimônia quanto ao número de parâmetros.

Para proceder a operação de padronização das séries históricas foram determinados os valores das médias mensais \bar{y}_τ e das variâncias mensais $\hat{\sigma}_\tau^2$ através do método dos momentos, pelas expressões

$$\bar{y}_\tau = (1/L) \cdot \sum_{v=1}^L y_{v,\tau} \quad (102)$$

e

$$\hat{\sigma}_\tau^2 = [1/(L-1)] \cdot \sum_{v=1}^L (y_{v,\tau} - \bar{\mu}_\tau)^2 \quad (103)$$

onde $y_{v,\tau}$ é a variável AFT, normalmente distribuída, em cada mês τ , em cada ano v , sendo L o número total de anos da série.

Após efetuar a operação de padronização, da maneira como descrita anteriormente, foram calculados os valores da média $\bar{\mu}$ e do desvio padrão $\hat{\sigma}^2$ das séries de variáveis padronizadas (variáveis reduzidas), pelas expressões

$$\bar{\mu} = (1/N) \cdot \sum_{t=1}^N z_t \quad (104)$$

e

$$\hat{\sigma}^2 = [1/(N-1)] \cdot \sum_{t=1}^N (z_t - \bar{\mu})^2 \quad (105)$$

onde z_t é a variável AFT padronizada e N é o número total de dados da série.

Como foram ajustados mais de um modelo para cada série, a fim de poder escolher o de melhor qualidade de ajuste, as estimativas dos p parâmetros autorregressivos do modelo foram obtidas tanto pelo método dos momentos como pelo método da máxima verossimilhança. O método dos momentos foi empregado devido ao fato de que as estimativas dos parâmetros podem ser obtidas a partir dos valores dos coeficientes de correlação da série e os mesmos já foram obtidos quando da construção dos correlogramas, na fase de identificação dos modelos.

a.1 Método dos momentos.

Os p parâmetros autorregressivos ϕ_1, \dots, ϕ_p do modelo AR(p) são estimados pela resolução do sistema de p equações lineares

$$r_k = \phi_1 r_{k-1} + \phi_2 r_{k-2} + \dots + \phi_p r_{k-p} \quad (106)$$

para $k = 1, \dots, p$, sendo r_1 os coeficientes de correlação amostrais e ϕ_1 as estimativas dos parâmetros autorregressivos.

No caso específico dos modelos autorregressivos de ordem $p = 1$, AR(1), temos

$$\phi_1 = r_1 \quad (107)$$

enquanto que para os modelos autorregressivos de ordem $p = 2$, AR(2), temos

$$\phi_1 = r_1(1 - r_2)/(1 - r_1^2) \quad (108)$$

e

$$\phi_2 = (r_2 - r_1^2)/(1 - r_1^2) . \quad (109)$$

O parâmetro $\hat{\sigma}_a^2$ foi obtido a partir das estimativas de $\hat{\sigma}^2$, ϕ_j e r_j , através da expressão

$$\hat{\sigma}_a^2 = \hat{\sigma}^2(1 - \sum_{j=1}^p \phi_j \cdot r_j) \cdot N/(N-p) . \quad (110)$$

a.2 Método da máxima verossimilhança.

Foi utilizada a metodologia exposta por BOX & JENKINS (1976), na qual a função logarítmica de verossimilhança é derivada com relação aos parâmetros e posteriormente igualada a zero. Na verdade, devido à complexidade dos termos que envolvem os parâmetros, é utilizada uma simplificação que permite trabalhar com um sistema de equações lineares.

As estimativas de máxima verossimilhança dos p parâmetros autorregressivos ϕ_1, \dots, ϕ_p do modelo AR(p) são obtidas pela resolução do sistema de p equações lineares

$$D_{1j} = \phi_1 \cdot D_{j2} + \phi_2 \cdot D_{j3} + \dots + \phi_p \cdot D_{j(p+1)} \quad (111)$$

em que $j = 2, \dots, p+1$ e D_{1j} é dado pela expressão

$$D_{1j} = D_{j1} = N/(N+2-i-j) \cdot \sum_{i=0}^{N+1-(i+j)} z_{i+1} \cdot z_{j+1} . \quad (112)$$

No caso específico dos modelos autorregressivos de ordem $p = 1$, AR(1), temos

$$\phi_1 = D_{12}/D_{22} \quad (113)$$

enquanto que, para os modelos autorregressivos de ordem $p = 2$, AR(2), temos

$$\phi_1 = (D_{12}D_{33} - D_{13}D_{23})/(D_{22}D_{33} - D_{23}^2) \quad (114)$$

e

$$\phi_2 = (D_{13}D_{22} - D_{12}D_{23})/(D_{22}D_{33} - D_{23}^2) . \quad (115)$$

A estimativa do parâmetro σ_a^2 é obtida por

$$\hat{\sigma}_a^2 = (D_{11} - \sum_{j=1}^p \phi_j D_{1(j+1)})/(N-p) . \quad (116)$$

b. Nos modelos MA.

As estimativas dos q parâmetros de média móvel dos modelos MA(q) têm origem nas propriedades dos modelos MA(q), relativas à autocovariância c_k e variância c_0 .

Assim, são obtidas as seguintes expressões para as estimativas de σ_e^2 e dos q parâmetros de média móvel $\theta_1, \dots, \theta_q$

$$\hat{\sigma}_e^2 = c_0 / (1 + \theta_1^2 + \dots + \theta_q^2) \quad (117)$$

e

$$\hat{\theta}_j = - (c_j / \hat{\sigma}_e^2 - \theta_1 \theta_{j+1} - \theta_2 \theta_{j+2} - \dots - \theta_{q-j} \theta_q) . \quad (118)$$

As estimativas dos parâmetros são obtidas por sucessivas iterações, sendo que, na primeira é atribuído o valor zero aos parâmetros de média móvel.

No caso específico dos modelos de média móvel de ordem $q=1$, MA(1), temos

$$\hat{\sigma}_e^2 = c_0 / (1 + \theta_1^2) \quad (119)$$

e

$$\hat{\theta}_1 = - (c_1 / \hat{\sigma}_e^2) \quad (120)$$

enquanto que, para os modelos de média móvel de ordem $q=2$, MA(2), temos

$$\hat{\sigma}_e^2 = c_0 / (1 + \theta_1^2 + \theta_2^2) \quad (121)$$

e

$$\hat{\theta}_1 = - (c_1 / \hat{\sigma}_e^2 - \theta_1 \theta_2) \quad (122)$$

$$\hat{\theta}_2 = - (c_2 / \hat{\sigma}_e^2) . \quad (123)$$

c. Nos modelos ARMA.

Para os modelos ARMA(p, q) foram primeiramente estimados os valores dos p parâmetros autorregressivos, tendo por base o fato de que as autocovariâncias c_k são independentes dos parâmetros de média móvel para $k \geq q+1$. Assim, a expressão das autocovariâncias, para $k \geq q+1$, pode ser escrita como

$$c_k = \sum_{i=1}^p \phi_i c_{k-i} \quad (124)$$

Através da resolução desta expressão, são obtidas as estimativas de $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$. A partir daí, uma nova série é construída, sendo formada pelas diferenças entre a série original e uma série obtida através do modelo AR(p) ajustado. A série de diferenças é expressa como

$$z_t' = z_t - \phi_1 z_{t-1} - \phi_2 z_{t-2} - \dots - \phi_p z_{t-p} . \quad (125)$$

Para a série z_t' , considerada como contendo somente a parte do processo relativa à média móvel, são calculadas as estimativas das autocovariâncias c_0', c_1', \dots, c_q' e ajustados então os coeficientes de média móvel $\theta_1, \dots, \theta_q$ de forma iterativa, como visto anteriormente, no caso dos modelos MA(q).

Os valores de ϕ e θ encontrados são utilizados como uma estimativa preliminar dos parâmetros do modelo ARMA(p,q). Para conseguir estimativas mais precisas dos parâmetros, de forma que toda informação contida nos dados seja considerada, é empregado um algoritmo de busca do conjunto de valores dos parâmetros autorregressivos ($\underline{\phi}$) e de média móvel ($\underline{\theta}$) que minimize a soma dos quadrados dos resíduos (SQR) dados por

$$\epsilon_t = z_t - \phi_1 z_{t-1} - \dots - \phi_p z_{t-p} + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \epsilon_{t-q} . \quad (126)$$

A soma dos quadrados dos resíduos (SQR), em função dos dois conjuntos de parâmetros, pode ser expressa como

$$S(\underline{\phi}, \underline{\theta}) = \sum_{t=1}^N (\epsilon_t)^2 \quad (127)$$

Dessa forma, a estimativa da variância dos resíduos é calculada por

$$\hat{\sigma}_\epsilon^2 = (1/N) \cdot S(\underline{\phi}, \underline{\theta}) \quad (128)$$

Pode ser dito, de uma outra forma, que uma superfície de valores de $S(\underline{\phi}, \underline{\theta})$ é obtida em função de um conjunto de valores dos parâmetros, que giram em torno daqueles obtidos por ocasião das estimativas preliminares e que o ponto de valor mínimo desta superfície corresponde às melhores estimativas dos parâmetros. Na Figura 23 está ilustrado o processo de busca dos valores dos parâmetros ϕ_1 e θ_1 , que produzem o ponto de valor mínimo da superfície da SQR de um modelo ARMA(1,1), ajustado aos dados do posto 12, com CA = 200mm e evapotranspiração estimada pelo método de Makkink. Nesta figura pode ser observado que o nível de detalhamento na busca do valor mínimo de SQR vai aumentando até ser obtido o valor de SQR = 97,1035, para $\phi_1 = 0,7885$ e $\theta_1 = 0,2903$, que correspondem às melhores estimativas de ϕ_1 e θ_1 .

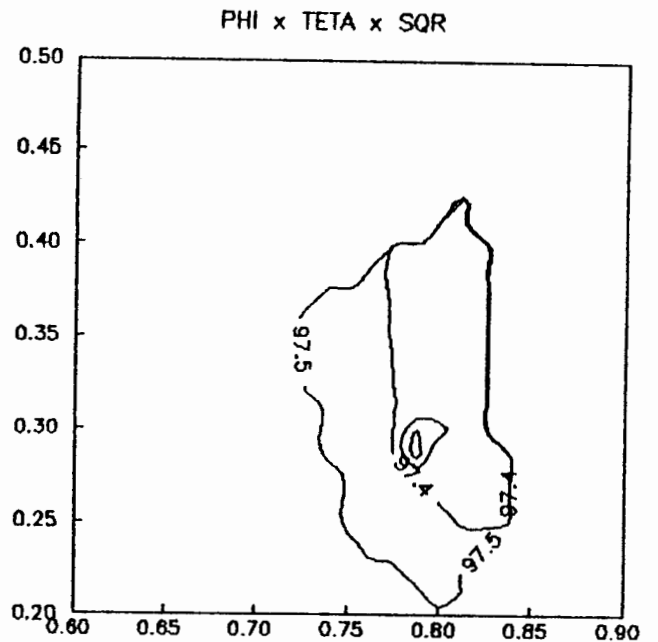
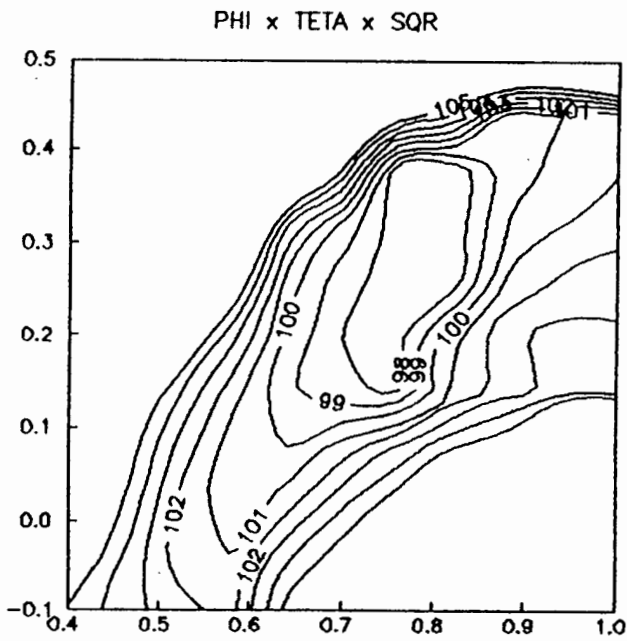
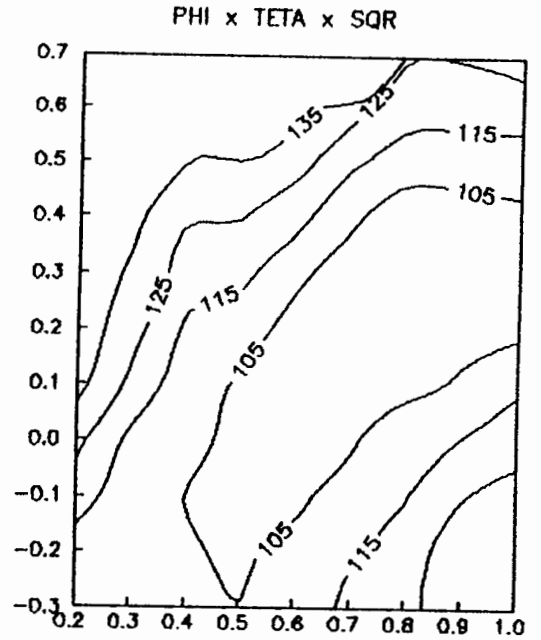
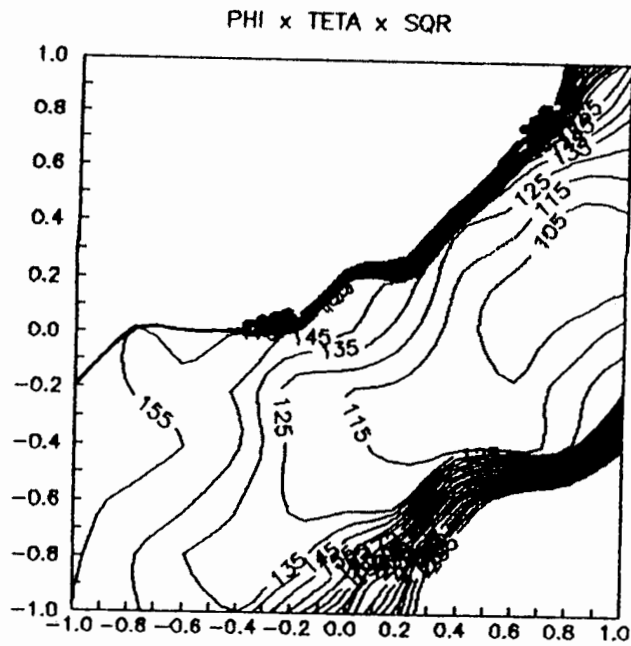


FIGURA 23 - Sucessivas etapas do processo de pesquisa do valor mínimo do Somatório dos Quadrados dos Resíduos, para um modelo ARMA(1,1) (posto 12, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 200mm, método de Makkink).

d. Nos modelos ARMA multiplicativos.

Nos modelos ARMA multiplicativos, tipo $ARMA(p,q) \times (P,Q)$, é desenvolvido o cálculo da soma dos quadrados dos resíduos, para várias séries de valores dos parâmetros ϕ , θ , Φ e Θ , sendo procurado o arranjo de valores dos parâmetros que resulte no valor mínimo desta soma. Estes valores de ϕ , θ , Φ e Θ são então utilizados como estimativas iniciais dos parâmetros em um procedimento de estimação não linear, do qual são obtidas as estimativas finais dos parâmetros.

3.6.4 Checagem Diagnóstica

Usualmente, quando da modelação de séries hidrológicas temporais, após a remoção dos componentes de periodicidade e da estrutura de dependência temporal, é assumido que o componente estocástico do processo (resíduos do modelo) compõe uma série independente e normalmente distribuída. Para checar a qualidade de ajuste de um determinado modelo, se faz necessário testar estas hipóteses. O ajuste do modelo pode ser testado, de forma adicional, comparando as características estatísticas e os correlogramas das séries históricas, com os obtidos pela geração de séries sintéticas.

No presente estudo, a qualidade do ajuste de cada modelo foi verificada mediante testes de independência e normalidade das séries de resíduos dos mesmos. Os modelos aprovados nestes testes foram empregados na geração de séries sintéticas de AFT, as quais foram testadas quanto à semelhança estatística com as séries originais, a fim de estabelecer qual modelo seria mais indicado para cada série, considerando a qualidade de ajuste, a parcimônia quanto ao número de parâmetros e a capacidade de reproduzir as características estatísticas da série original.

A seguir são descritos os testes de independência e normalidade, aos quais foram submetidos os resíduos dos modelos neste estudo.

a. Testes de independência.

Para testar os resíduos dos modelos quanto à sua independência foram empregados três testes. O teste do correlograma dos resíduos, também chamado teste de Anderson (SALAS et al., 1985), o qual testa a hipótese de que o correlograma da amostra de resíduos é aproximadamente igual a zero; o teste de Porte Manteau, que é um teste aproximado de adequacidade do modelo; e o teste do periodograma cumulativo.

a.1 Teste do correlograma.

O coeficiente de correlação r_k é uma medida adimensional clássica de dependência linear e o correlograma de uma série temporal é uma relação estatística clássica de representação do domínio temporal. Para uma série independente o correlograma da população é igual a zero para $k \neq 0$. Entretanto, para uma amostra de uma série independente, devido a variabilidades inerentes à própria amostragem, o coeficiente de correlação r_k flutua em torno de zero, sem ser necessariamente igual a zero. Em cada caso específico é preciso determinar os limites, a um dado nível de probabilidade, entre os quais r_k possa variar, sendo a série considerada independente. Anderson, em 1941, propôs a seguinte relação

$$r_k(95\%) = \frac{-1 \pm 1,96(N-k-1)^{1/2}}{N - k} \quad (129)$$

e

$$r_k(99\%) = \frac{-1 \pm 2,326(N-k-1)^{1/2}}{N - k} \quad (130)$$

para níveis de probabilidade de 95% e 99% respectivamente e uma amostra de tamanho N.

A seguir serão mostrados os correlogramas estimados, para os resíduos de três modelos ajustados aos dados do posto 15, com CA = 150mm e evapotranspiração estimada pelo método de Turc. Os modelos em questão são um AR(1), um MA(1) e um ARMAX(0,0)(0,1). O primeiro modelo foi escolhido como o que melhor representa o processo, enquanto que o segundo é um modelo candidato, de ajuste inferior e o terceiro é um modelo totalmente inadequado para representar o processo.

a.2 Teste de Porte Manteau.

O teste de qualidade de ajuste de Porte Manteau é empregado neste estudo para verificar se a série de resíduos ϵ_t de um dado modelo ARMA(p,q) é uma série independente e, portanto, se o modelo é adequado. Este teste emprega a estatística

$$Q = N \cdot \sum_{k=1}^L r_k^2(\epsilon) \quad (131)$$

onde $r_k(\epsilon)$ é o correlograma dos resíduos ϵ_t e L é o retardo máximo considerado. A estatística Q possui distribuição aproximadamente igual a de qui-quadrado, com (L-p-q) graus de liberdade. A adequação é averiguada comparando o valor da estatística Q com o valor de qui-quadrado $X(L-p-q)$ a um dado nível de significância. Se

$Q < X(L-p-q)$, então a série de ϵ_t é independente e o modelo é considerado adequado, do contrário, o modelo é rejeitado.

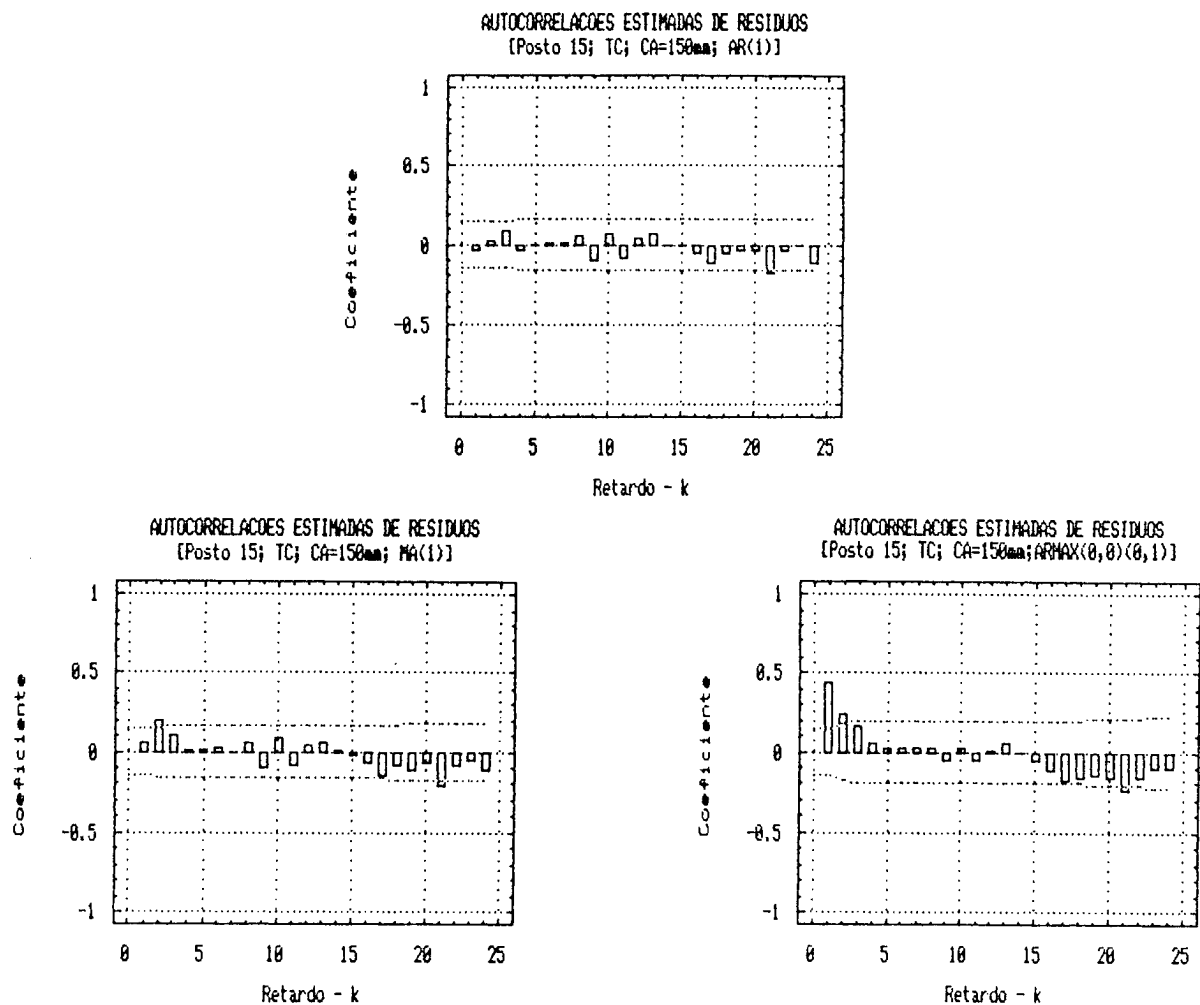


FIGURA 24 - Correlogramas estimados dos resíduos dos modelos AR(1), MA(1) e ARMAX(0,0)(0,1) (posto 15, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 150mm, Turc).

a.3 Teste do periodograma cumulativo.

Este teste foi utilizado para verificar se a série de N resíduos ϵ_t , para $t=1, \dots, N$, de um determinado modelo, é independente, ou se apresenta algum tipo de periodicidade. Para tanto é calculado o periodograma cumulativo PC_i da série de resíduos através da expressão

$$PC_i = \left[\sum_{j=1}^i P(h_j) \right] / \sigma_{\epsilon}^2, \quad i=1, \dots, N \quad (132)$$

sendo $P(h_j)$ o periodograma de ϵ_t , dado por

$$P(h_j) = (2/N^2) \left[\left(\sum_{t=1}^N \epsilon_t \cdot \cos(2\pi h_j t) \right)^2 + \left(\sum_{t=1}^N \epsilon_t \cdot \sen(2\pi h_j t) \right)^2 \right] \quad (133)$$

onde $h_j = j/N$ representa a frequência. A seguir são plotados os valores de PC_i versus i , que, para uma série independente de resíduos, devem ficar dispostos em torno de uma linha reta que una os pontos (0;0) e (0,5;1). De outro modo, se a modelação não foi adequada para remover as periodicidades, estas serão evidenciadas por valores altos de $P(h_j)$, que, por sua vez, produzirão desvios em relação à linha reta. BOX & JENKINS (1976) sugerem a utilização da estatística de Smirnov-Kolmogorov para testar a significância dos desvios em relação à linha reta, traçando linhas limites de probabilidade, entre as quais os desvios são considerados insignificantes. Seguindo esta sugestão, são traçadas em cada teste as linhas limites de probabilidade, para cada periodograma acumulado, aos níveis de probabilidade de 75% e 95%. A distância destas linhas à linha reta teórica é de $\pm K_\alpha / (N')^{1/2}$, sendo $N' = (N-2)/2$ ou $N' = (N-1)/2$ para N par ou ímpar, respectivamente. Os valores de K_α adotados foram $K_{95} = 1,36$ e $K_{75} = 1,02$. Se o número de valores plotados que ultrapassam as linhas limites ultrapassa $\alpha.N$, então a série de resíduos apresenta alguma periodicidade e o modelo ajustado é considerado inadequado.

A seguir serão mostrados os periodogramas cumulativos, para os resíduos dos três modelos ajustados aos dados do posto 15, com $CA = 150\text{mm}$ e evapotranspiração estimada pelo método de Turc, da mesma maneira como foram caracterizados no teste do correlograma.

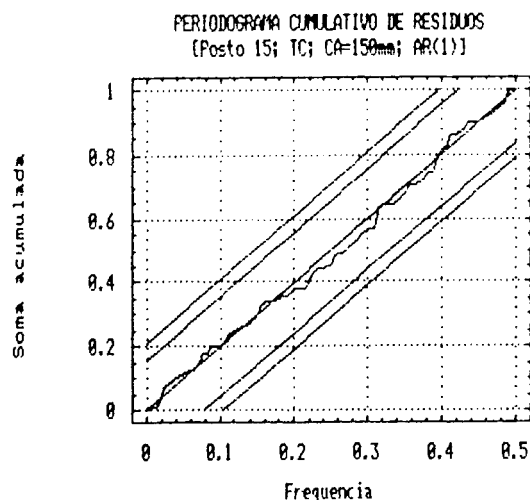


FIGURA 25 - Periodograma cumulativo dos resíduos do modelo AR(1) (posto 15, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 150mm, Turc).

GRAFICO DE PROBAB. NORMAL DE RESIDUOS
 [Posto 15; TC; CA=150mm; AR(1)]

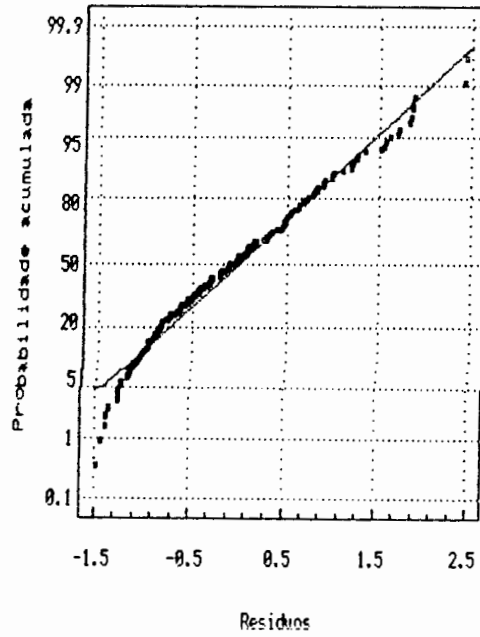


GRAFICO DE PROB. NORMAL DE RESIDUOS
 [Posto 15; TC; CA=150mm; MA(1)]

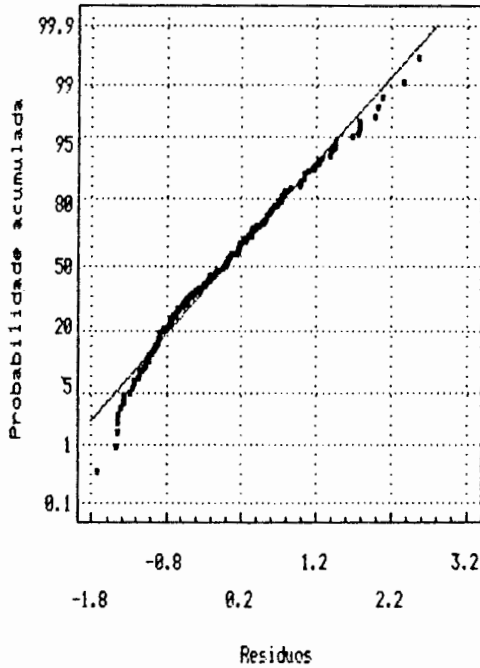


GRAFICO DE PROB. NORMAL DE RESIDUOS
 [Posto 15; TC; CA=150mm; ARMAX(0,0)(0,1)]

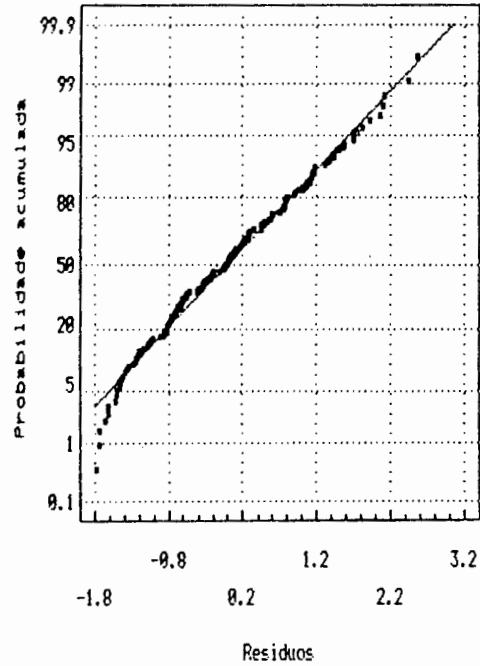


FIGURA 27 - Gráficos de probabilidade normal dos resíduos dos modelos AR(1), MA(1) e ARMAX(0,0)(0,1) (posto 15, Capacidade de Armazenamento de água no solo de 150mm, Turc).

O teste de Smirnov-Kolmogorov foi utilizado neste estudo mais como um teste auxiliar, visto que, em termos de confiabilidade, não pode competir com os outros dois testes empregados.

b.3 Teste de assimetria da normalidade.

Este teste de normalidade baseia-se no fato de que o coeficiente de assimetria de uma variável normalmente distribuída é igual a zero. O coeficiente de assimetria de uma dada série temporal x_t , para $t = 1, \dots, N$, pode ser estimado através da relação

$$a^* = (1/N) \cdot \sum_{t=1}^N (x_t - \bar{\mu})^3 / \left[(1/N) \cdot \sum_{t=1}^N (x_t - \bar{\mu})^2 \right]^{3/2} \quad (135)$$

onde $\bar{\mu}$ é a média amostral. Se a série possui distribuição normal, então a^* segue uma distribuição normal assintótica, com média zero e variância $6/N$. Dessa forma, os limites de a^* a um nível de probabilidade $(1-\alpha)$ podem ser definidos por:

$$[-u_{1-\alpha/2} \cdot (6/N)^{1/2} ; u_{1-\alpha/2} \cdot (6/N)^{1/2}] \quad (136)$$

onde $u_{1-\alpha/2}$ é o valor x para $1-\alpha/2$ da distribuição normal padrão. Assim sendo, se o valor de a^* fica dentro dos limites definidos, a hipótese de normalidade não é rejeitada, caso contrário é rejeitada. O teste é considerado suficientemente preciso para $N > 150$, sendo, portanto, adequado às séries envolvidas neste estudo, que possuem $N \geq 156$.

b.4 Teste de qui-quadrado.

Este teste verifica a hipótese de uma dada série temporal x_t , para $t = 1, \dots, N$, sendo N o tamanho da amostra, ser normalmente distribuída, com média $\bar{\mu}$ e desvio padrão σ . A série é ordenada em ordem decrescente, em k intervalos de classe, cuja probabilidade é igual a $1/k$. Da tabela de probabilidade normal são obtidos os valores u_1, u_2, \dots, u_{k-1} , correspondentes às probabilidades acumuladas $1/k, 2/k, \dots, (k-1)/k$, dessa forma os valores no domínio de x que determinam os intervalos de classe serão $x_1' = \bar{\mu} + \sigma u_1, x_2' = \bar{\mu} + \sigma u_2, x_{k-1}' = \bar{\mu} + \sigma u_{k-1}$. A frequência absoluta, ou o número de pontos, da série amostral ordenada que cai dentro do intervalo i é denominada N_i , para $i = 1, \dots, k$, enquanto o número esperado de pontos em cada intervalo é de N/k . A par destes fatos, pode ser calculada a estatística

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k [(N_i - N/k)^2 / (N/k)] \quad (137)$$

que segue uma distribuição de qui-quadrado, com $k-2$ graus de liberdade. Dessa forma, pode ser obtido, de tabelas de qui-quadrado, o valor de $\chi^2_{1-\alpha}(k-2)$, para um dado nível α de probabilidade. Se o valor de χ^2 for menor do que $\chi^2_{1-\alpha}(k-2)$ a hipótese de normalidade da

série amostral não é rejeitada. Caso contrário, a hipótese é rejeitada.

c. Definição do modelo

Foi necessário estabelecer, para cada uma das séries originais de AFT, qual o melhor modelo entre aqueles considerados adequados, ou seja, entre aqueles que passaram pelos testes de independência e de normalidade. Para proceder tal escolha foram eleitos como termos de comparação a habilidade dos modelos em preservar as características estatísticas das séries originais e a parcimônia quanto ao número de parâmetros que cada modelo requer.

c.1 Preservação das características estatísticas.

Segundo SALAS et al. (1985) o problema do grau de preservação das características estatísticas das séries temporais é uma das muitas questões que ainda não estão bem esclarecidas no campo da hidrologia estatística.

Neste estudo houve uma maior preocupação com a preservação das características das séries históricas que apresentam menores variações amostrais, como a média e o desvio padrão e uma preocupação menor, com a preservação daquelas características que apresentam maiores variações amostrais, como, por exemplo, os valores extremos.

Na verdade, para cada modelo, a habilidade de preservação das características estatísticas foi avaliada comparando a média, o desvio padrão, a estrutura de correlação e o coeficiente de assimetria estimados para a série histórica com aqueles obtidos através das séries geradas. Esta avaliação, no entanto, não foi realizada de forma isolada, mas acompanhada de uma análise quanto ao número de parâmetros que cada modelo exige, buscando encontrar aquele que, com o menor número de parâmetros estimados, reproduza de forma conveniente as características das séries históricas. Isto quer dizer, em outras palavras, que o princípio da parcimônia, quanto ao número de parâmetros, foi considerado, sendo a seguir descritos os métodos empregados para avaliar a parcimônia dos modelos.

c.2 Parcimônia no número de parâmetros.

A parcimônia de um modelo quanto a seus parâmetros pode ser avaliada através de um índice que é, na verdade, a razão entre o tamanho da série histórica N e o número de parâmetros estimados no ajuste do modelo K . Tal índice pode ser expresso como

$$\delta = N/K . \quad (138)$$

SALAS et al. (1985) afirmam que um valor de δ inferior a 6 indica que o princípio básico da parcimônia foi violado e que o valor de δ deve ser de, no mínimo, 15. Estes autores demonstram, no entanto, que para séries de variáveis hidrológicas mensais, de tamanho típico, se o princípio de parcimônia for seguido com rigor, será difícil alcançar um nível adequado de reprodução das características estatísticas das séries e vice-versa.

O índice δ , neste estudo, foi um dos fatores de comparação entre modelos concorrentes e, devido ao tamanho relativamente pequeno das séries disponíveis, serviu como um dos indicadores de que os coeficientes autorregressivos e/ou de média móvel periódicos, bem como o emprego de séries de Fourier na estimação de parâmetros deveriam ser evitados.

O método mais significativo empregado na comparação direta entre modelos concorrentes, foi o chamado Critério de Informação de Aikake - AIC (Aikake Information Criterion), proposto por Aikake em 1974. Este método é uma formulação matemática que considera o princípio da parcimônia na construção do modelo e que pode ser expresso, na comparação entre modelos ARMA(p,q), ajustados para uma série de tamanho N, como:

$$AIC = N \ln(\hat{\sigma}_e^2) + 2(p+q) \quad (139)$$

em que $\hat{\sigma}_e^2$ é a variância estimada dos resíduos e $p+q$ é a soma dos coeficientes autorregressivos e de média móvel do modelo. Neste método o modelo que apresentar o menor valor de AIC é considerado o mais adequado.

3.6.4 Geração De Séries Sintéticas

a. A Rotina de geração.

A primeira etapa desenvolvida no processo de geração de séries sintéticas de AFT foi a geração de séries normais de valores randômicos, ou seja, séries de valores independentes, normalmente distribuídos, com média zero e variância unitária. A geração das séries randômicas foi efetuada mediante uso de programa computacional pré-estabelecido.

As séries randômicas obtidas foram submetidas aos testes de normalidade e independência, previamente descritos neste estudo, antes de serem utilizadas no processo de geração de séries sintéticas de AFT.

Após determinar o modelo mais apropriado para cada série histórica de AFT, com seus parâmetros devidamente estimados e testados e estando disponíveis as séries randômicas normais, o processo de geração das séries sintéticas foi efetivado segundo a seguinte rotina:

Os primeiros 48 valores gerados são então descartados, sendo a contagem da série reinicializada.

Como no início do processo de modelação foi efetuada uma operação de padronização dos dados, para tornar as séries estacionárias, com média zero e variância unitária, foi necessário proceder à operação inversa, na forma

$$y'_{v,\tau} = \sigma_{\tau} \cdot z'_{v,\tau} + \mu_{\tau} \quad (143)$$

onde $y'_{v,\tau}$ representa o valor de AFT sintético, para o ano v ($v= 1, \dots, 50$) e no mês τ e sendo μ_{τ} e σ_{τ} a média e o desvio padrão, respectivamente, da série original, para o mês τ correspondente.

Neste estudo foram geradas 10 séries de 50 anos, para a maioria das combinações de posto climatológico, capacidade de armazenamento e método de estimativa da evapotranspiração. Por este procedimento foram obtidos 500 valores gerados de AFT em cada mês do ano. Sobre estas séries de 500 valores gerados é que foi realizada a análise de frequência de AFT para cada mês.

Para ter uma idéia do efeito da extensão das séries geradas sobre o comportamento das frequências obtidas, foram geradas séries mais curtas em algumas combinações de posto climatológico e método de estimativa da evapotranspiração. A seguir serão apresentadas as combinações testadas, com as respectivas extensões das séries geradas.

- Posto 14 - método de Turc - 400 anos
- Posto 15 - método de Penman - 400 anos
- Posto 15 - método de Makkink - 400 anos
- Posto 7 - método de Blaney-Criddle - 300 anos
- Posto 12 - método de Blaney-Criddle - 300 anos
- Posto 14 - método de Thornthwaite - 300 anos
- Posto 14 - método de Turc - 200 anos
- Posto 15 - método de Turc - 200 anos

b. Análise da qualidade das séries geradas

A qualidade das séries geradas foi analisada comparando as suas características estatísticas com as da série original. As características comparadas foram a média, a variância, o coeficiente de assimetria e a estrutura correlacional.

Na tabela a seguir são apresentadas algumas das características estatísticas mencionadas, para as séries histórica e gerada de armazenamento final totalizado (ou saldo mensal de água),

como forma de ilustração do procedimento descrito. As séries empregadas são relativas ao posto 15, considerando uma capacidade de armazenamento de água no solo de 200mm e com evapotranspiração estimada pelo método de Turc.

TABELA 3 - Características estatísticas das séries histórica e gerada de Armazenamento Final Totalizado - posto 15; Turc; Capacidade de Armazenamento de água no solo de 200mm.

SERIE	HISTORICA	GERADA
Média	195,3	190,7
Variância	11 122,3	11 226,4
Desvio padrão	105,5	106,0
Coef. de assimetria	0,02	-0,16

Na Figura 28 podem ser observados os gráficos relativos às funções de autocorrelação (FAC) e de autocorrelação parcial (FACP) das séries histórica e gerada para a mesma situação, enquanto que na Figura 29 estas séries são mostradas, com os valores agrupados mês a mês. A análise destes resultados indica que, para esta situação, foi obtido um modelo que consegue reproduzir as características estatísticas da série original com bastante eficiência.

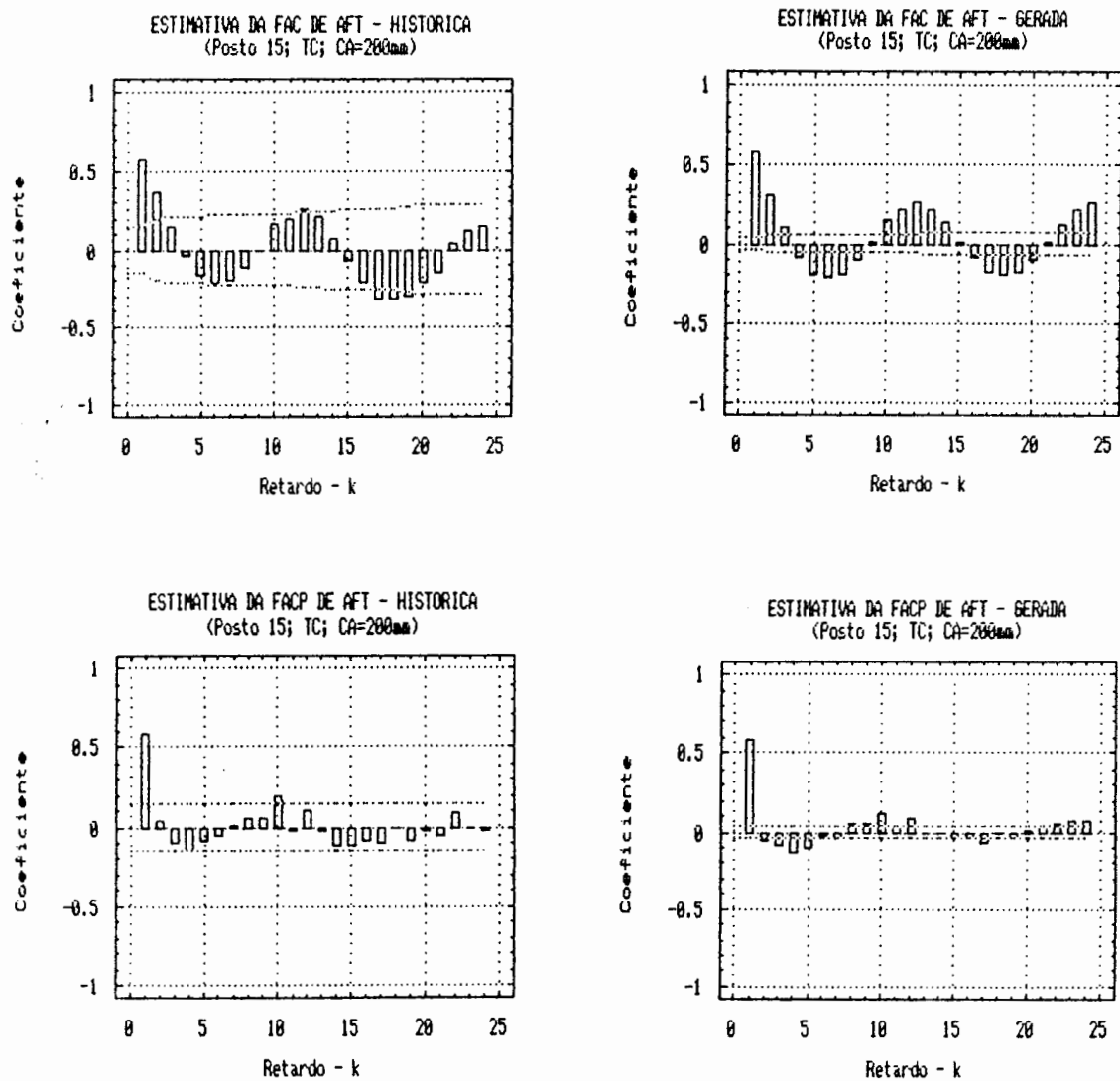


FIGURA 28 - Gráficos das funções de autocorrelação (FAC) e de autocorrelação parcial (FACP), para as séries histórica e gerada de Armazenamento Final Totalizado - posto 15; Turc; Capacidade de Armazenamento de água no solo de 200mm.

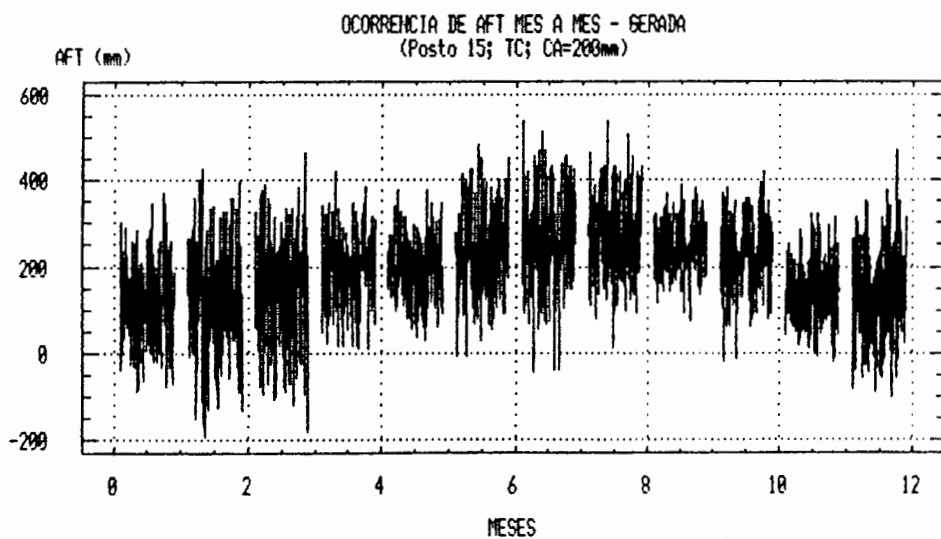
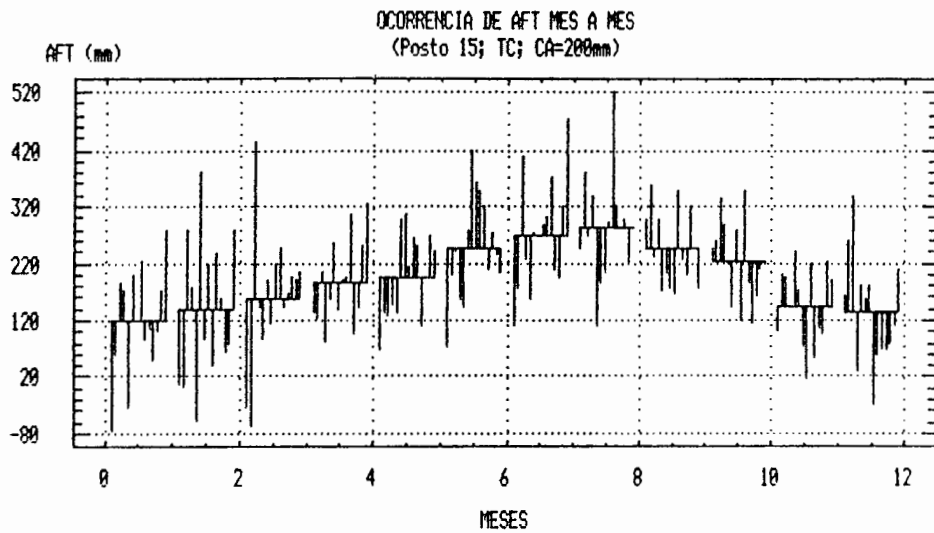


FIGURA 29 - Gráficos das séries histórica e gerada de Armazenamento Final Totalizado, com valores agrupados mês a mês - posto 15; Turc; Capacidade de Armazenamento de água no solo de 200mm.

4. ANÁLISE DE FREQUÊNCIA

Considerando 4 valores de capacidade de armazenamento de água no solo para as 27 combinações de postos climatológicos e métodos de estimativa da evapotranspiração, foram geradas 108 diferentes séries de AFT. Como a análise de frequência de ocorrência de determinados níveis de AFT, para as séries geradas, deve ser feita a um nível mensal, cada série foi fracionada em 12 séries contendo os valores relativos a cada mês do ano. Dessa forma foi obtido um total de 1296 séries sintéticas de AFT, cada uma representando os valores gerados desta variável para cada mês do ano, considerando uma condição específica de posto climatológico, método de estimativa de evapotranspiração e capacidade de armazenamento de água no solo.

Cada série fracionada de AFT foi separada em intervalos de classe de 25mm, tendo o cuidado de forçar a coincidência do valor zero com uma das divisões entre intervalos. Dessa forma todas as séries foram analisadas dentro de um padrão comum de fracionamento.

Após a separação dos valores de AFT em intervalos de classe, foram calculadas as frequências de ocorrência de AFT em cada classe, ou seja, a razão entre o número de ocorrências de AFT em cada classe e o número total de valores de AFT. A seguir foram tabulados estes valores e determinados a frequência acumulada de AFT até o limite superior de cada intervalo, que consiste na informação objeto deste estudo.

A apresentação das frequências de AFT obtidas para cada mês, sob a forma de tabelas, seria pouco prática e proveitosa, em virtude do seu elevado número (1296). Para tornar a apresentação dos resultados mais objetiva foram elaborados gráficos que relacionam o armazenamento final totalizado (AFT em milímetros), a capacidade de armazenamento (CA em milímetros) e a frequência acumulada (em %). Nestes gráficos os valores de AFT são apresentados no eixo das ordenadas, os valores de CA no eixo das abscissas e os valores de frequência acumulada aparecem como linhas de igual frequência, ou isolinhas de frequência. Os gráficos foram agrupados por posto climatológico e método de estimativa da evapotranspiração.

Para ilustrar estes procedimentos são apresentadas a seguir as tabelas de frequência acumulada de AFT, obtidas para o mês de dezembro, no posto 15, para cada capacidade de armazenamento considerada, tendo sido a evapotranspiração estimada pelo método de Turc. Logo a seguir é apresentado o gráfico de AFTxCAxFREQUÊNCIA correspondente.

TABELA 4 - Frequência acumulada de Armazenamento Final Totalizado, no mês de dezembro, para a série gerada para o posto 15, com Capacidade de Armazenamento de água no solo de 50mm e evapotranspiração estimada pelo método de Turc.

Classe	Limite Inferior	Limite Superior	Frequência Relativa	Frequência Rel. Acum.
	abaixo de	-150,01	0,015	0,015
1	-150,01	-125,00	0,035	0,050
2	-125,01	-100,00	0,055	0,105
3	-100,01	-75,00	0,055	0,160
4	-75,01	-50,00	0,100	0,260
5	-50,01	-25,00	0,065	0,325
6	-25,01	0,00	0,105	0,430
7	0,01	25,00	0,135	0,565
8	25,01	50,00	0,130	0,695
9	50,01	75,00	0,100	0,795
10	75,01	100,00	0,070	0,865
11	100,01	125,00	0,045	0,910
12	125,01	150,00	0,030	0,940
13	150,01	175,00	0,025	0,965
	acima de 175,00		0,035	1,000

TABELA 5 - Frequência acumulada de Armazenamento Final Totalizado, no mês de dezembro, para a série gerada para o posto 15, com Capacidade de Armazenamento de água no solo de 100mm e evapotranspiração estimada pelo método de Turc.

Classe	Limite Inferior	Limite Superior	Frequência Relativa	Frequência Rel. Acum.
	abaixo de	-125,01	0,020	0,020
1	-125,01	-100,00	0,040	0,060
2	-100,01	-75,00	0,065	0,125
3	-75,01	-50,00	0,055	0,180
4	-50,01	-25,00	0,075	0,255
5	-25,01	0,00	0,065	0,320
6	0,01	25,00	0,130	0,450
7	25,01	50,00	0,100	0,550
8	50,01	75,00	0,105	0,655
9	75,01	100,00	0,120	0,775
10	100,01	125,00	0,070	0,845
11	125,01	150,00	0,055	0,900
12	150,01	175,00	0,030	0,930
13	175,01	200,00	0,025	0,955
	acima de 200,00		0,005	1,000

TABELA 6 - Frequência acumulada de Armazenamento Final Totalizado, no mês de dezembro, para a série gerada para o posto 15, com Capacidade de Armazenamento de água no solo de 150mm e evapotranspiração estimada pelo método de Turc.

Classe	Limite Inferior	Limite Superior	Frequência Relativa	Frequência Rel. Acum.
	abaixo de	-100,01	0,000	0,020
1	-100,01	-75,00	0,035	0,055
2	-75,01	-50,00	0,045	0,100
3	-50,01	-25,00	0,055	0,155
4	-25,01	0,00	0,065	0,220
5	0,01	25,00	0,080	0,300
6	25,01	50,00	0,100	0,400
7	50,01	75,00	0,070	0,470
8	75,01	100,00	0,120	0,590
9	100,01	125,00	0,090	0,680
10	125,01	150,00	0,110	0,790
11	150,01	175,00	0,070	0,860
12	175,01	200,00	0,045	0,905
13	200,01	225,00	0,030	0,935
14	225,01	250,00	0,015	0,950
15	250,01	275,00	0,005	0,955
	acima de 275,00		0,005	1,000

TABELA 7 - Frequência acumulada de Armazenamento Final Totalizado, no mês de dezembro, para a série gerada para o posto 15, com Capacidade de Armazenamento de água no solo de 200mm e evapotranspiração estimada pelo método de Turc.

Classe	Limite Inferior	Limite Superior	Frequência Relativa	Frequência Rel. Acum.
	abaixo de	-75,01	0,000	0,025
1	-75,01	-50,00	0,010	0,035
2	-50,01	-25,00	0,035	0,070
3	-25,01	0,00	0,040	0,110
4	0,01	25,00	0,050	0,160
5	25,01	50,00	0,080	0,240
6	50,01	75,00	0,085	0,325
7	75,01	100,00	0,080	0,405
8	100,01	125,00	0,070	0,475
9	125,01	150,00	0,115	0,590
10	150,01	175,00	0,090	0,695
11	175,01	200,00	0,095	0,790
12	200,01	225,00	0,065	0,855
13	225,01	250,00	0,040	0,895
14	250,01	275,00	0,035	0,930
15	275,01	300,00	0,020	0,950
	acima de 300,00		0,050	1,000

AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15//TC/DEZ

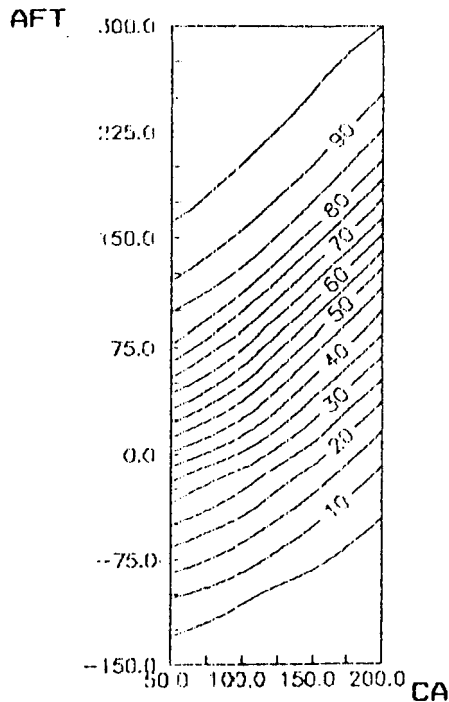


FIGURA 30 - Gráfico de Armazenamento Final Totalizado, CA, FREQUENCIA para o posto 15, com evapotranspiração estimada pelo método de Turc, no mês de dezembro.

As isolinhas de frequência foram obtidas pela interpolação dos valores contidos nas tabelas e a sua elaboração não só torna a apresentação dos resultados mais prática e objetiva, como também aumenta o nível de informação fornecida, visto que torna possível extrapolar os resultados, para valores de capacidade de armazenamento diferentes daqueles empregados no estudo.

Através dos gráficos de AFTxCAxFREQUENCIA torna-se fácil relacionar os valores de AFT com outros itens relacionados, como as probabilidades de ocorrência de déficits e excessos hídricos.

4.1 GRAFICOS DE AFT, CA, FREQUENCIA E DEFICIT HIDRICO.

O conceito de déficit hídrico varia, como já foi visto, de acordo com o objetivo e o enfoque específico de cada estudo. Em termos de agricultura irrigada é usual adotar um esquema no qual a irrigação tem início, a partir do momento em que o nível de umidade no solo decresce até um valor próximo, porém, superior aquele em que a cultura apresenta considerável queda de produtividade. Como a sensibilidade à deficiência de água difere entre as culturas, é natural que o conteúdo de água no solo, considerado como limite para a ocorrência de déficit hídrico, também varie. Dessa forma, um estudo de ocorrência de déficit hídrico, realizado para uma cultura específica, ou um nível único de armazenamento de água no solo, abaixo do qual seja considerada a ocorrência de déficit hídrico, pode ser inadequado para uma outra cultura, ou outro nível de ocorrência de déficit.

Muitos estudos que procuram estimar a freqüência de ocorrência de déficits hídricos, em termos agrícolas, se limitam a estabelecer os níveis de probabilidade para os quais pode ser esperada a ocorrência do déficit, sem, no entanto, estabelecer as intensidades do mesmo. Outros, ainda, estimam as intensidades dos déficits, porém, estabelecem que o seu valor máximo é igual à diferença entre o nível de armazenamento a partir do qual o déficit ocorre e o limite inferior da capacidade de armazenamento.

Através dos gráficos de AFT,CA,FREQÜENCIA é possível estimar, não somente a probabilidade de ocorrência de déficits hídricos, como também as intensidades destes déficits, para diferentes níveis de probabilidade. Estas estimativas podem ser obtidas para valores de capacidade de armazenamento, resultantes de combinações de solo e planta que variem entre 50 e 200mm.

Como a variável AFT representa um valor potencial do armazenamento de água, resultante do balanço hídrico, é possível relacioná-la com a ocorrência de déficits hídricos, para qualquer que seja o nível de umidade fixado como indicador da ocorrência de déficit.

Para exemplificar a relação que pode ser estabelecida entre os gráficos de AFT,CA,FREQÜENCIA e a ocorrência de déficits hídricos, será mostrado a seguir um exemplo hipotético, onde será estimada a probabilidade de ocorrência de déficit hídrico e as intensidades deste déficit a um determinado nível de probabilidade, para duas situações de nível de referência de déficit e para uma capacidade de armazenamento de água igual a 100mm. Para tanto, será utilizado o gráfico de AFT,CA,FREQÜENCIA para o posto 15, com ET estimada pelo método de Turc, no mês de dezembro, mostrado na Figura 30.

Primeira situação.

Se for considerado que ocorre déficit hídrico, sempre que a quantidade de água armazenada no solo for inferior a 50% da capacidade de armazenamento, então, para uma capacidade de armazenamento igual a 100mm, ocorrerá déficit sempre que o armazenamento de água for inferior a 50mm.

Do gráfico de AFT,CA,FREQÜENCIA da Figura 30 é obtido o valor de 55% de probabilidade acumulada, para um valor de AFT igual a 50mm. Isto significa que existe 55% de probabilidade do armazenamento de água ficar abaixo ou, no máximo, igual a 50mm, o que caracteriza a ocorrência de déficit.

Deste mesmo gráfico são obtidos os valores de 35% e 20% de probabilidade acumulada, para valores de AFT de 0 e -50mm, respectivamente. Um valor de AFT igual a 0 significa, para a situação especificada, um déficit hídrico de 50mm, enquanto que um valor de AFT igual a -50mm significa um déficit hídrico de 100mm. Dessa forma, são estimadas deficiências potenciais de água iguais a 50 e 100mm, para níveis de probabilidade de 35% e 20%, respectivamente.

Outra maneira de explicar o significado dos valores acima estimados, seria dizendo que para evitar a ocorrência de déficit hídrico, a um nível de segurança de 65%, seria necessário prever o fornecimento, por irrigação, de uma lâmina adicional de 50mm de água. Enquanto que a um nível de segurança de 80% a lâmina a ser prevista, seria de 100mm.

Segunda situação.

Se for considerado que ocorre déficit hídrico, sempre que a quantidade de água armazenada no solo for inferior a 75% da capacidade de armazenamento, então, para uma capacidade de armazenamento igual a 100mm, ocorrerá déficit sempre que o armazenamento de água for inferior a 75mm.

Do gráfico de AFT,CA,FREQÜENCIA da Figura 30 é obtido o valor de 65% de probabilidade acumulada, para um valor de AFT igual a 75mm. Isto significa que existe 65% de probabilidade do armazenamento de água ficar abaixo ou, no máximo, igual a 75mm, o que caracteriza a ocorrência de déficit.

Deste mesmo gráfico são obtidos os valores de 35% e 20% de probabilidade acumulada, para valores de AFT de 0 e -50mm, respectivamente. Um valor de AFT igual a 0 significa, para a situação especificada, um déficit hídrico de 75mm, enquanto que um valor de AFT igual a -50mm significa um déficit hídrico de 125mm. Dessa forma, são estimadas deficiências potenciais de água iguais a 75 e 125mm, para níveis de probabilidade de 35% e 20%, respectivamente.

Outra maneira de explicar o significado dos valores acima estimados, seria dizendo que para evitar a ocorrência de déficit hídrico, a um nível de segurança de 65%, seria necessário prever o fornecimento, por irrigação, de uma lâmina adicional de 75mm de água. Enquanto que a um nível de segurança de 80% a lâmina a ser prevista, seria de 125mm.

4.2 GRAFICOS DE AFTXCAxFREQÜENCIA E EXCESSO HIDRICO.

A exemplo do que ocorre em relação aos estudos sobre déficits hídricos, muitos estudos que procuram estimar a freqüência de ocorrência de excessos hídricos, em termos agrícolas, se limitam a estabelecer os níveis de probabilidade para os quais pode ser esperada a ocorrência do excesso, sem, no entanto, estabelecer as intensidades do mesmo.

Da mesma forma como a variável AFT pode ser relacionada com a ocorrência de déficits hídricos, pode ser, também, relacionada com a ocorrência de excessos. Como exemplo, pode ser usado o gráfico de AFT,CA,FREQÜENCIA da Figura 30, que para uma capacidade de armazenamento de 100mm, fornece valores de 75% e 90% de probabilidade acumulada, quando os valores de AFT atingem 100 e 150mm, respectivamente.

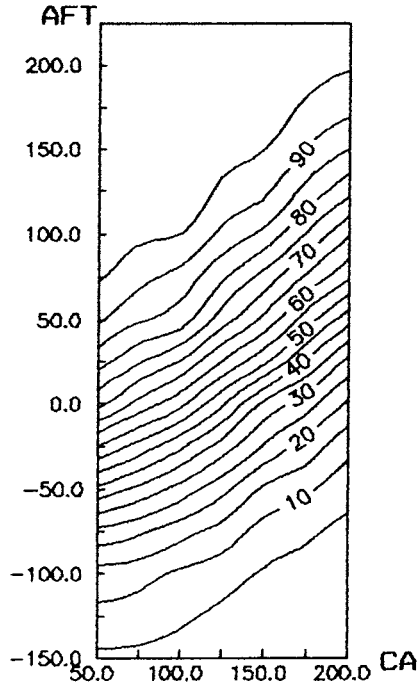
Os valores acima indicam que existe uma probabilidade de 25% de ocorrer excesso hídrico e uma probabilidade de 10% de que este excesso seja superior a 50mm, visto que, o valor de AFT é 50mm maior do que a capacidade de armazenamento.

4.3 APRESENTAÇÃO PARCIAL DOS GRAFICOS DE AFTxCAxFREQUENCIA

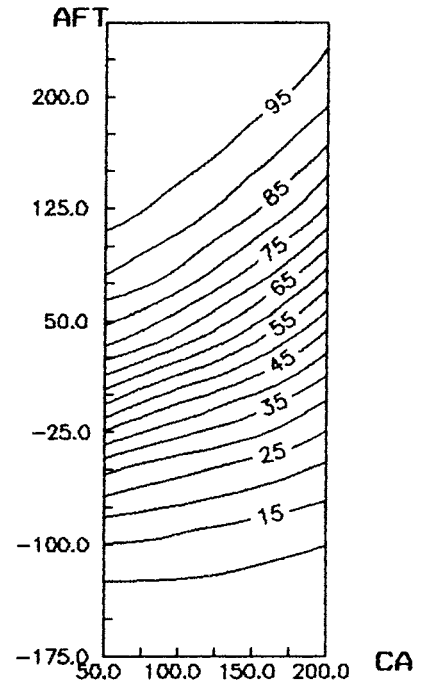
A seguir serão apresentados os gráficos de AFTxCAxFREQUENCIA para cada posto, para um dos métodos empregados na estimativa da evapotranspiração. Os demais resultados estão contidos no anexo correspondente.

4.3.1 GRAFICOS DE AFT_xCA_xFREQUENCIA PARA O POSTO 1,
COM EVAPOTRANSPIRAÇÃO ESTIMADA PELO METODO DE THORNTHWAITE.

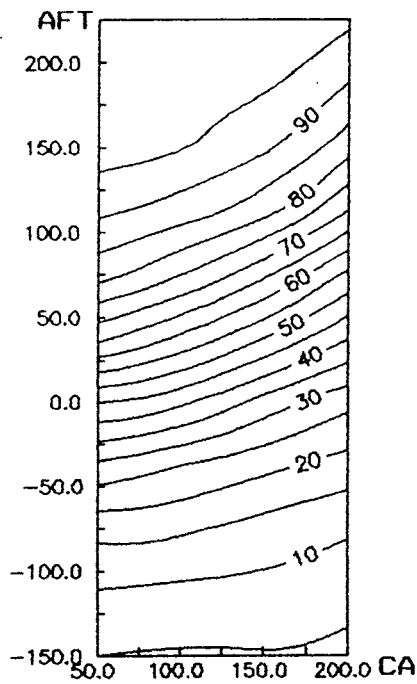
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 01/TH/JAN



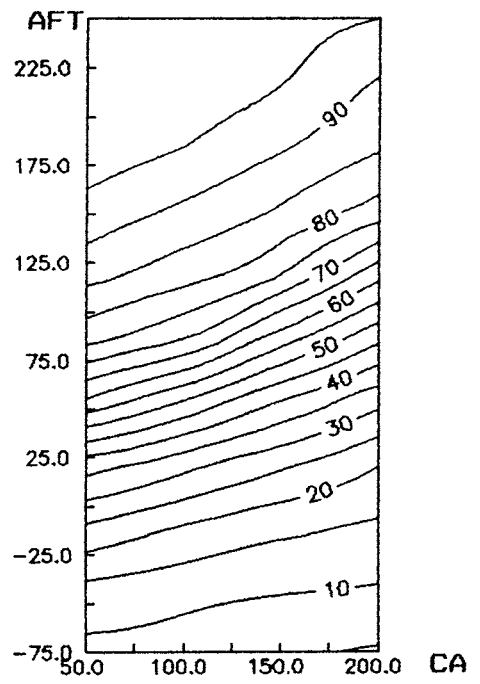
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 01/TH/FEV



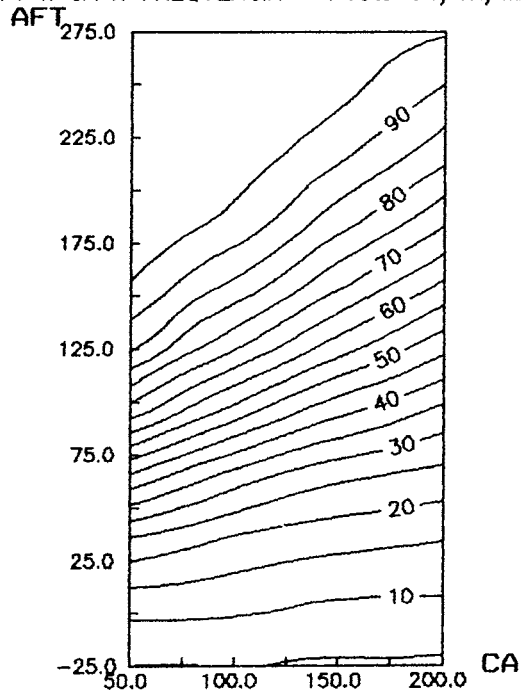
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 01/TH/MAR



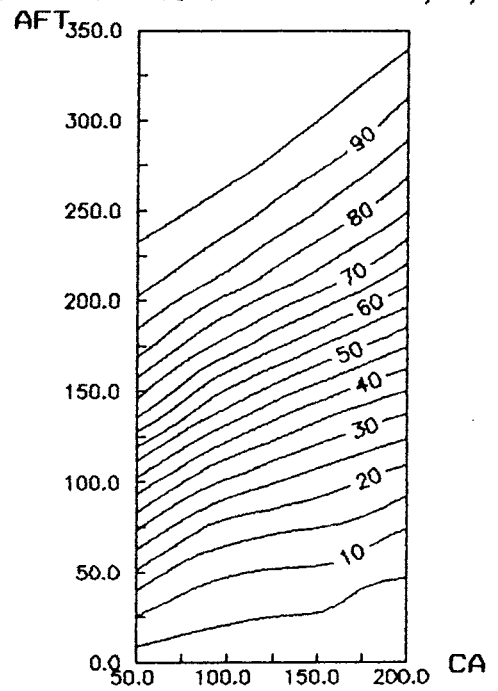
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 01/TH/ABR



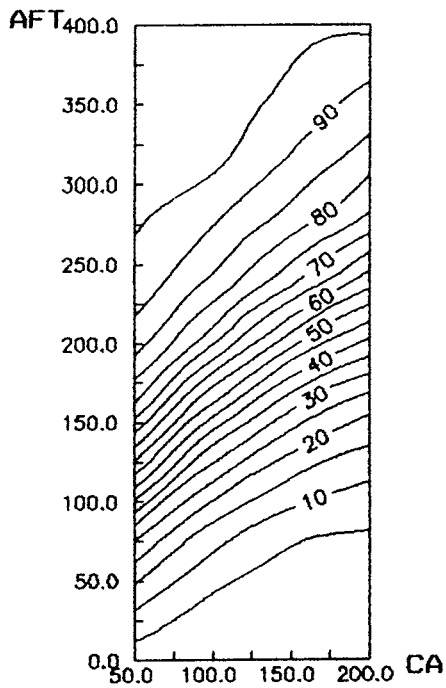
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 01/TH/MAI



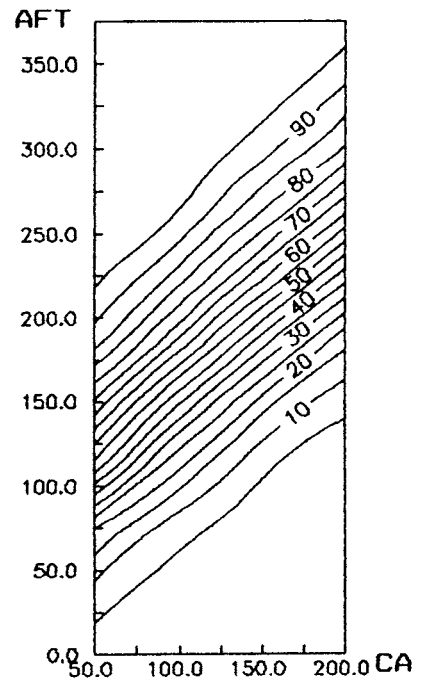
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 01/TH/JUN



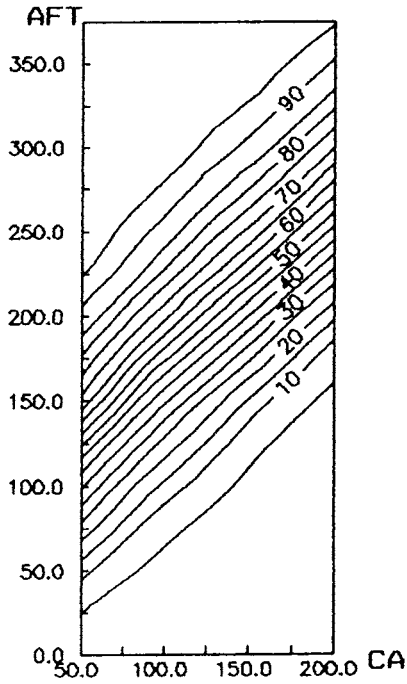
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 01/TH/JUL



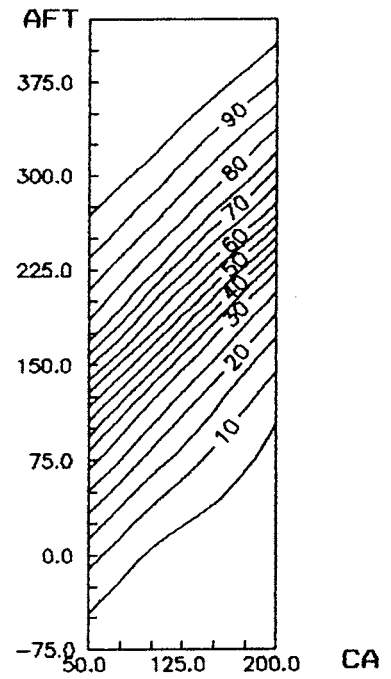
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 01/TH/AGO



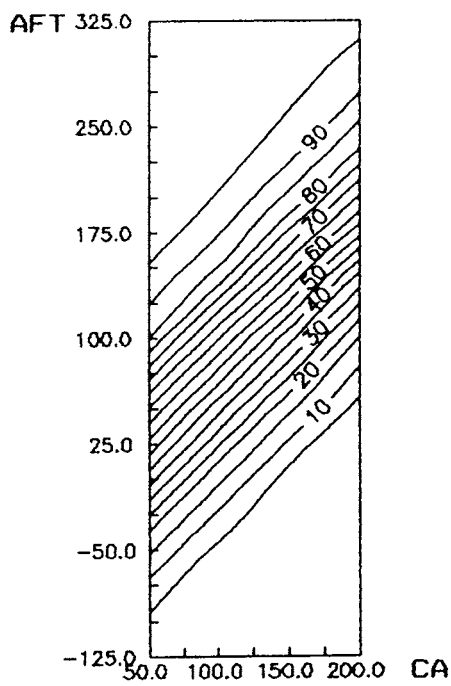
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 01/TH/SET



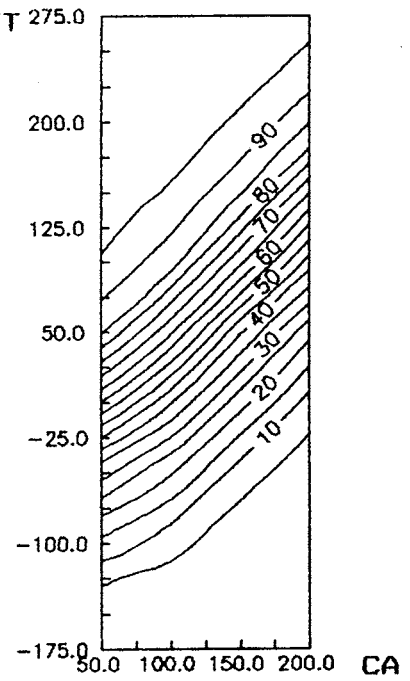
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 01/TH/OUT



AFT x CA x FREQUENCIA Posto 01/TH/NOV

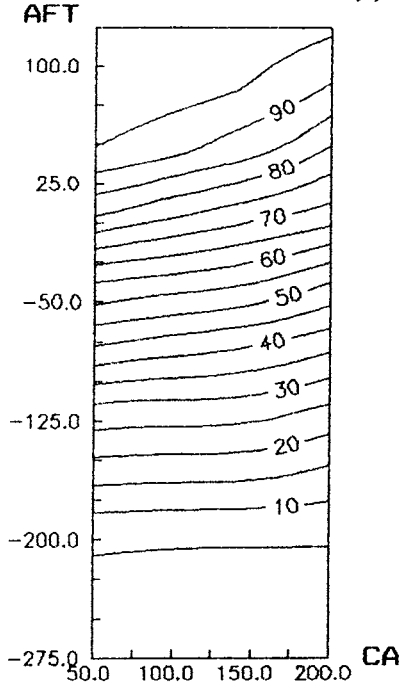


AFT x CA x FREQUENCIA Posto 01/TH/DEZ

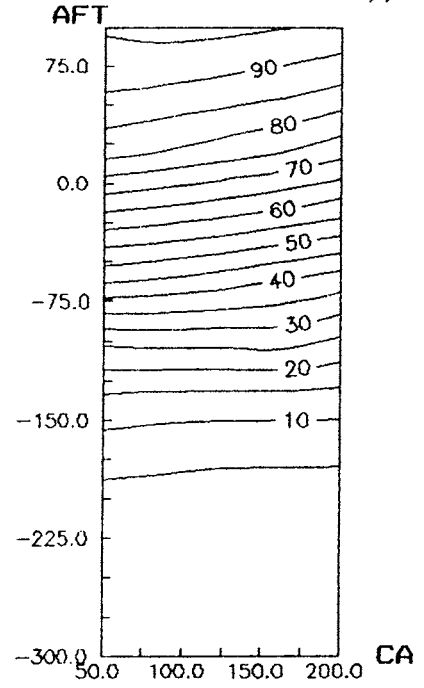


4.3.2 GRAFICOS DE AFT_xCA_xFREQÜENCIA PARA O POSTO 2,
COM EVAPOTRANSPIRAÇÃO ESTIMADA PELO METODO DE BLANEY-CRIDDLE.

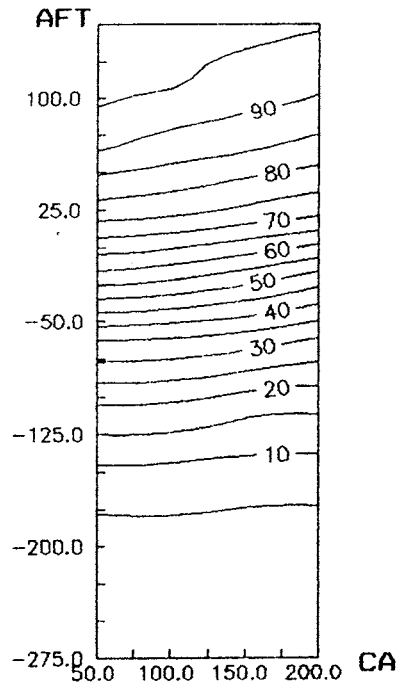
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 02//BC/JAN



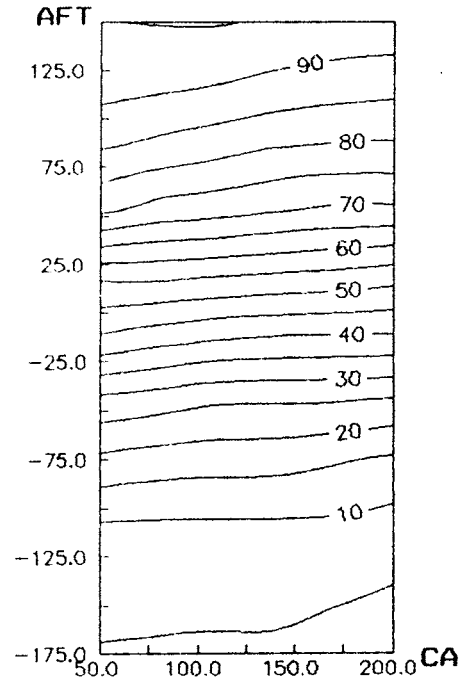
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 02//BC/FEV



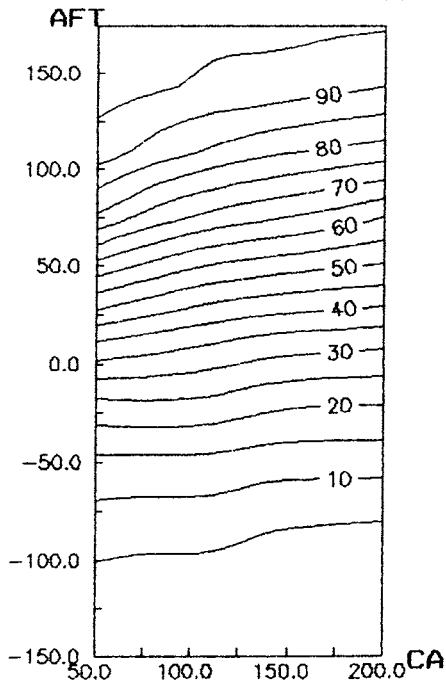
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 02//BC/MAR



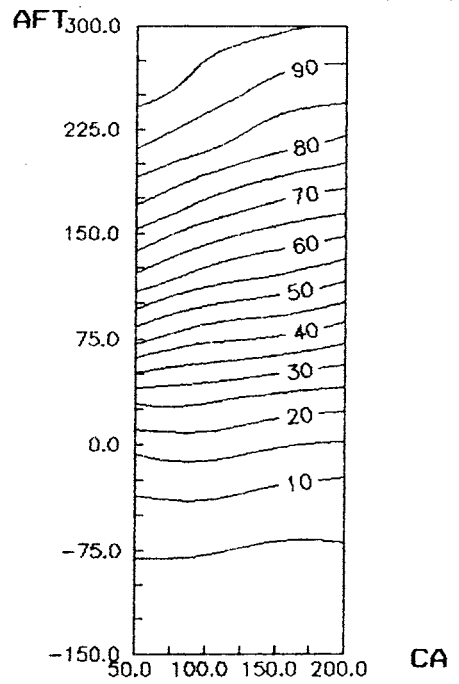
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 02//BC/ABR



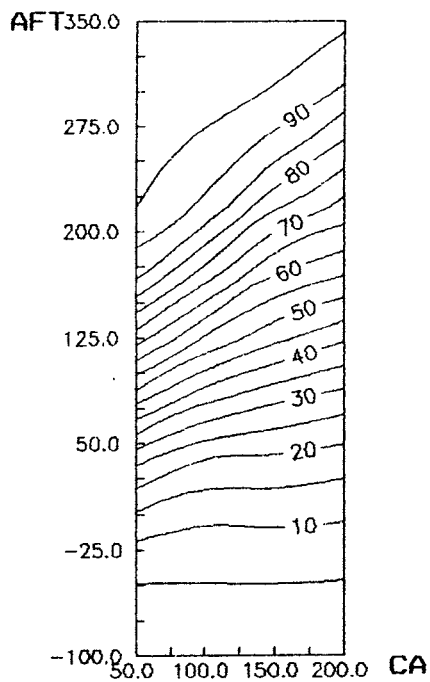
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 02//BC/MAI



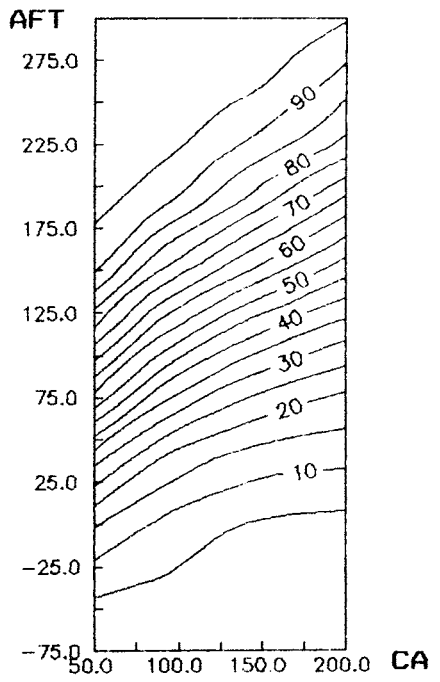
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 02//BC/JUN



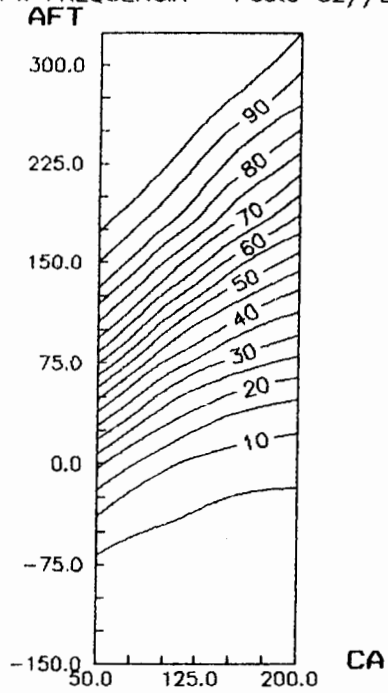
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 02//BC/JUL



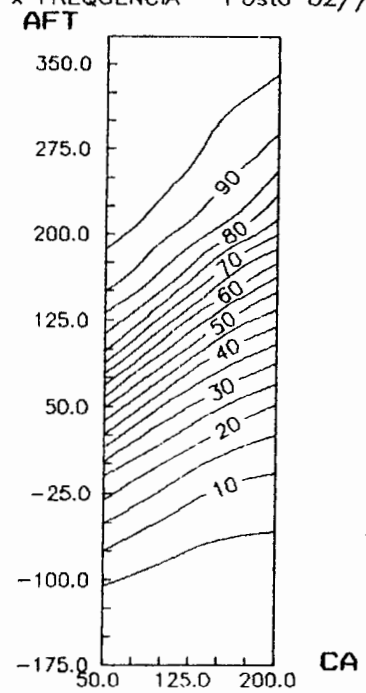
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 02//BC/AGO



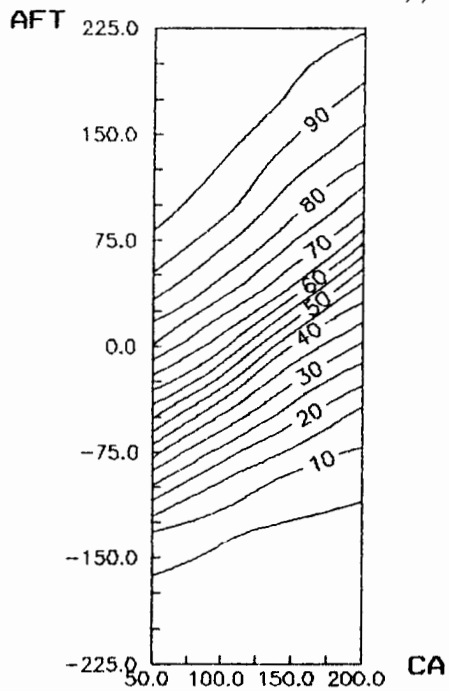
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 02//BC/SET



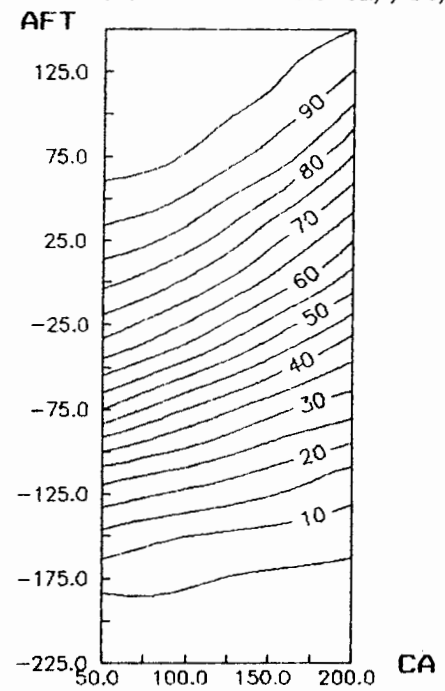
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 02//BC/OUT



AFT x CA x FREQUENCIA Posto 02//BC/NOV

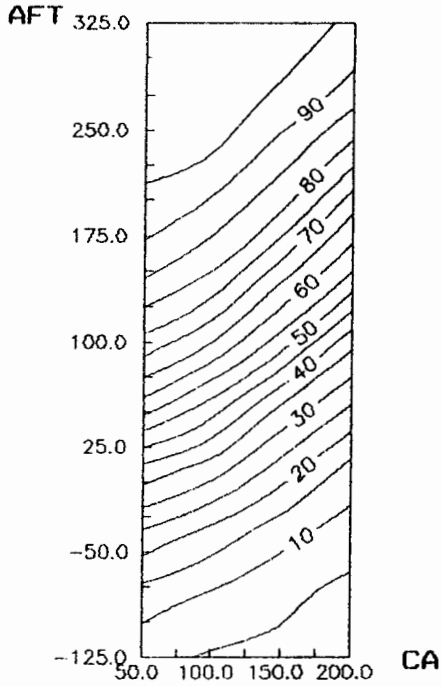


AFT x CA x FREQUENCIA Posto 02//BC/DEZ

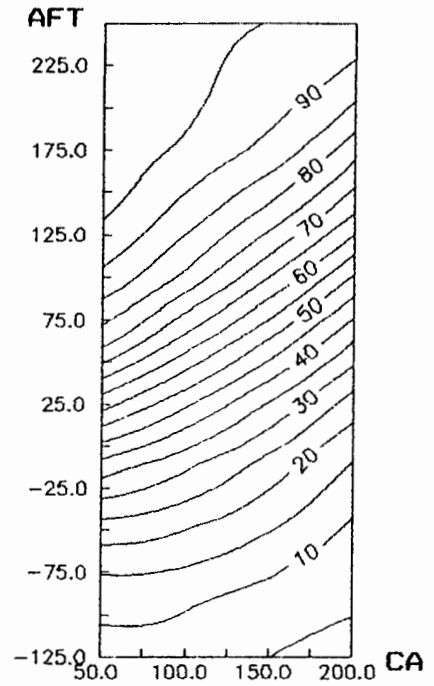


4.3.3 GRAFICOS DE AFT_xCA_xFREQUENCIA PARA O POSTO 6,
COM EVAPOTRANSPIRAÇÃO ESTIMADA PELO METODO DE THORNTHWAITTE.

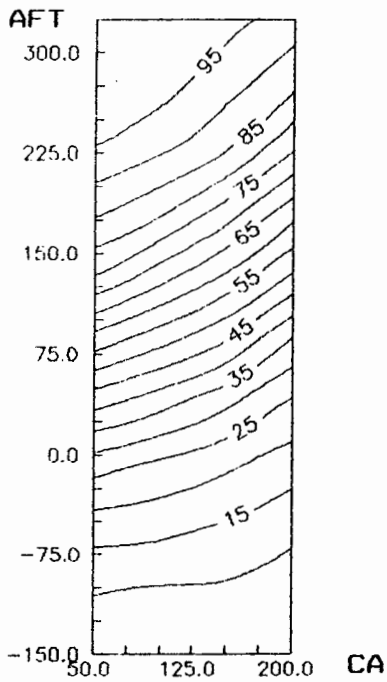
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 06//TH/JAN



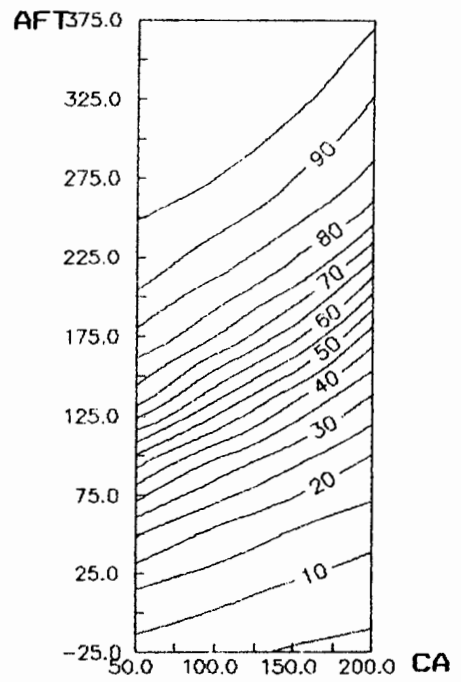
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 06//TH/FEV



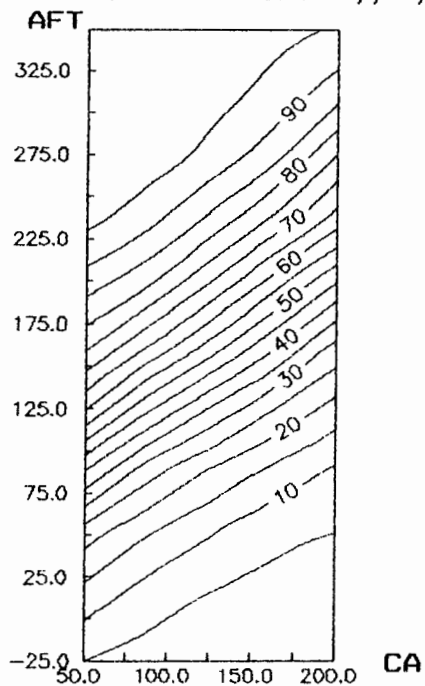
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 06//TH/MAR



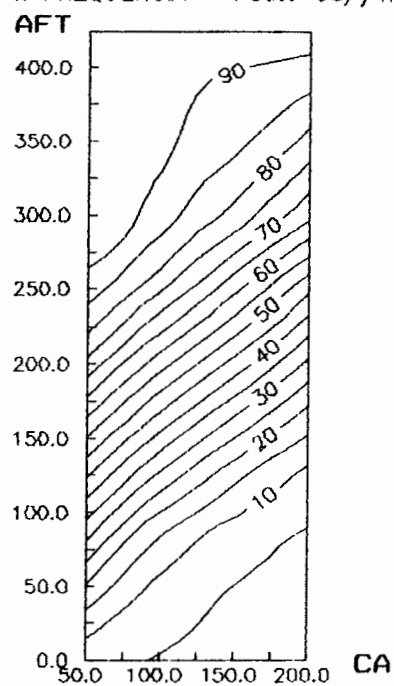
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 06//TH/ABR



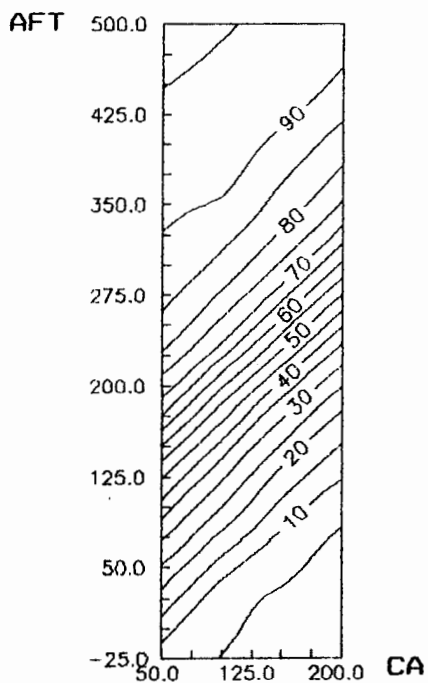
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 06//TH/MAI



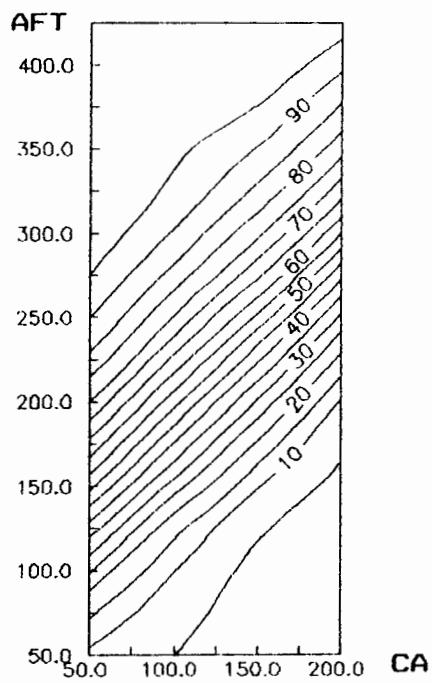
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 06//TH/JUN



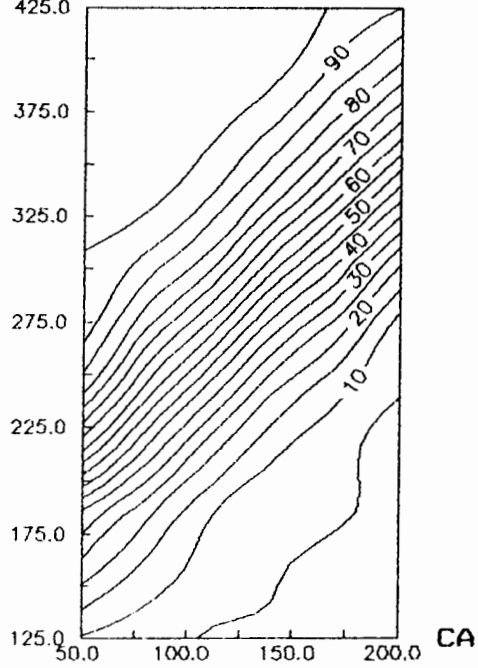
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 06//TH/JUL



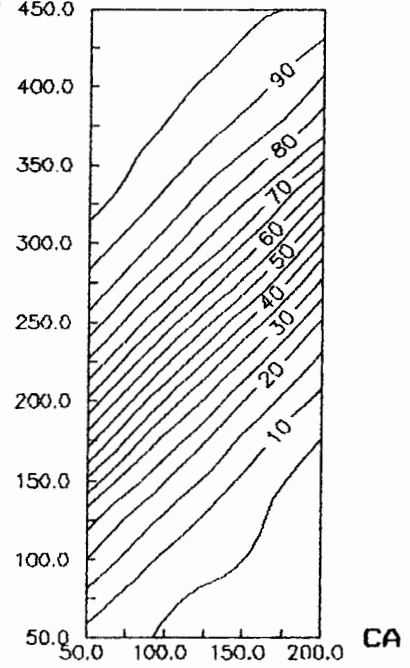
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 06//TH/AGO



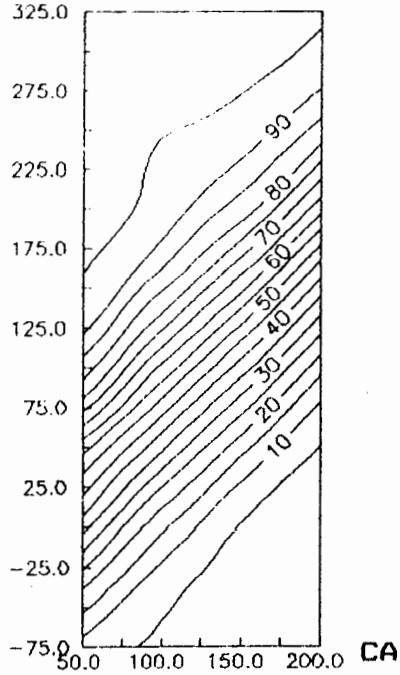
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 06//TH/SET
AFT 425.0



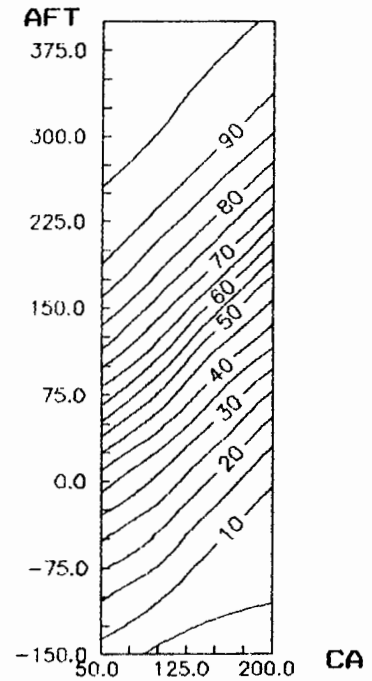
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 06//TH/OUT
AFT 450.0



AFT x CA x FREQUENCIA Posto 06//TH/NOV
AFT 325.0

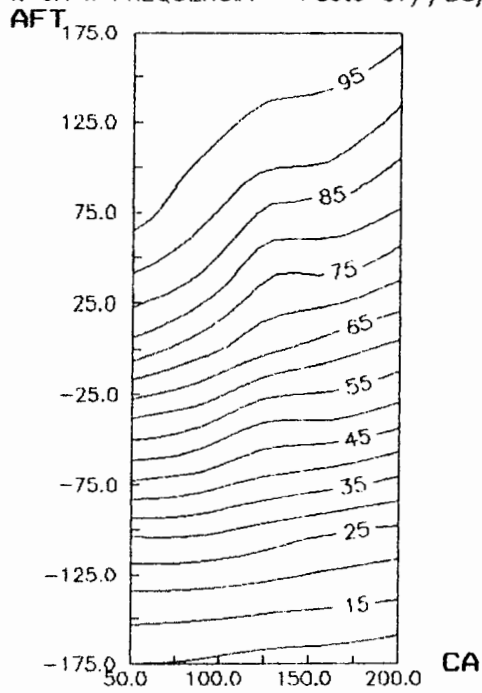


AFT x CA x FREQUENCIA Posto 06//TH/DEZ
AFT 375.0

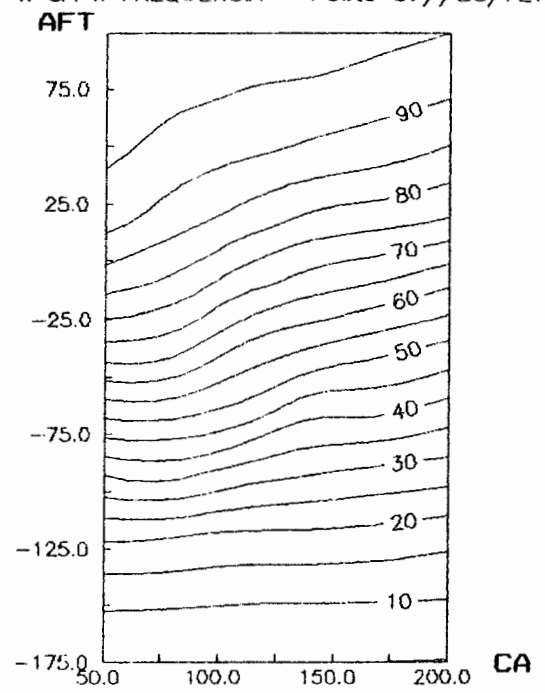


4.3.4 GRAFICOS DE AFT_xCA_xFREQUENCIA PARA O POSTO 7,
COM EVAPOTRANSPIRAÇÃO ESTIMADA PELO METODO DE BLANEY-CRIDDLE.

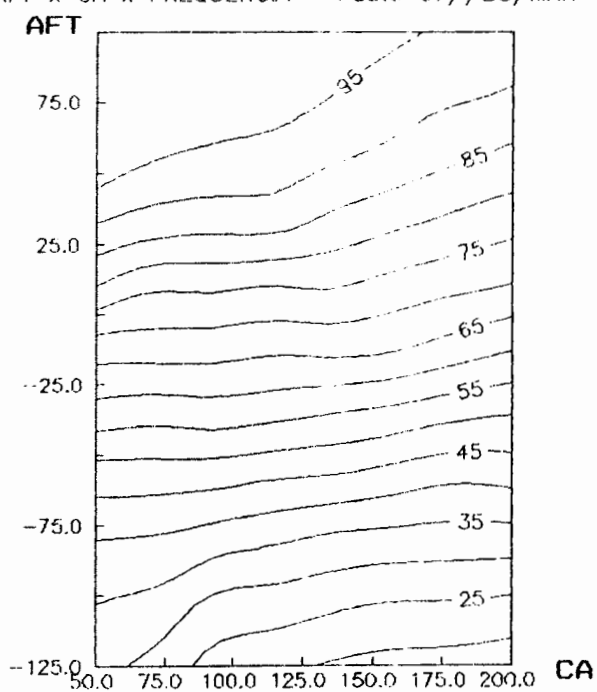
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 07//BC/JAN



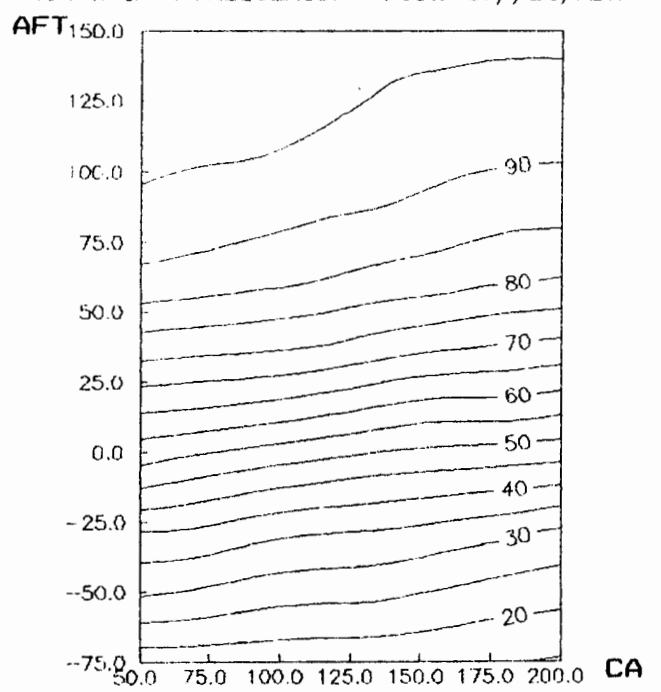
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 07//BC/FEV



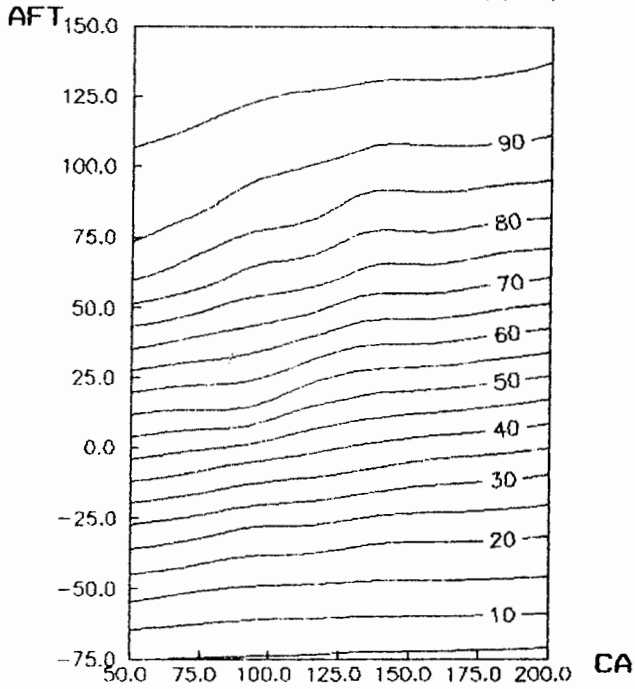
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 07//BC/MAR



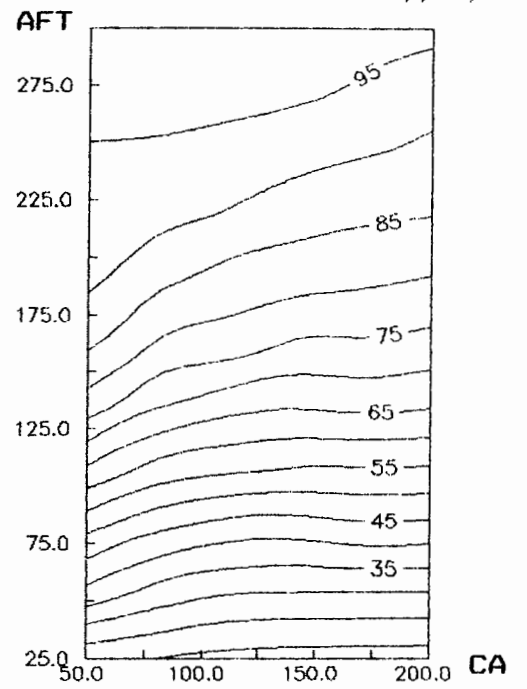
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 07//BC/ABR



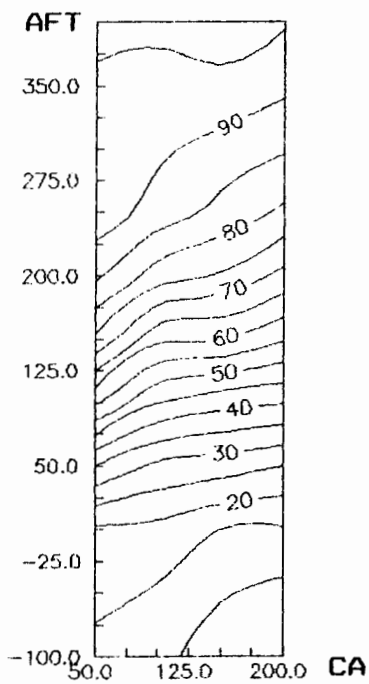
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 07//BC/MAI



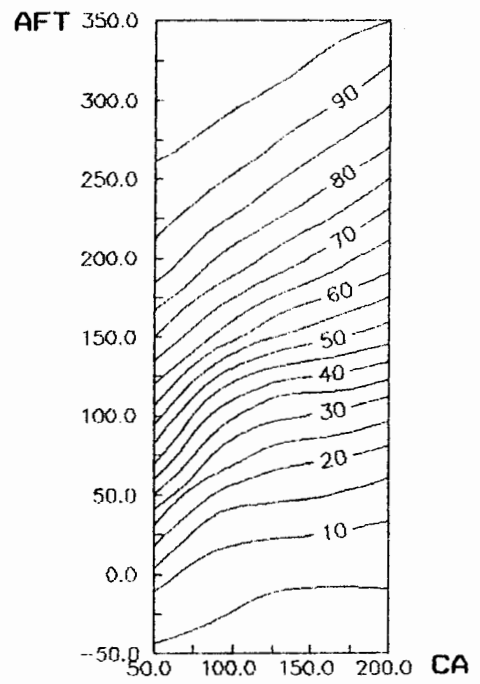
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 07//BC/JUN



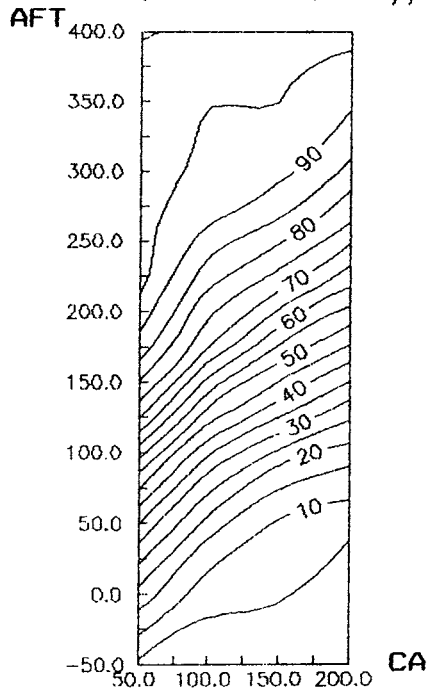
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 07//BC/JUL



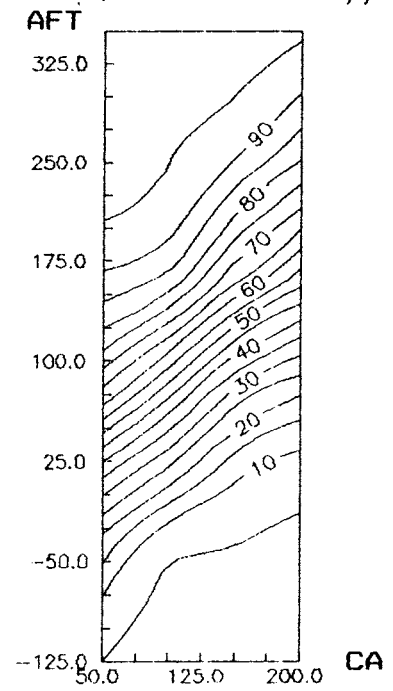
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 07//BC/AGO



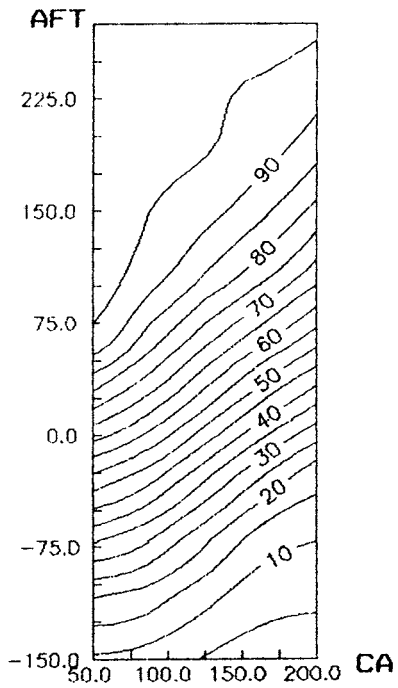
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 07//BC/SET



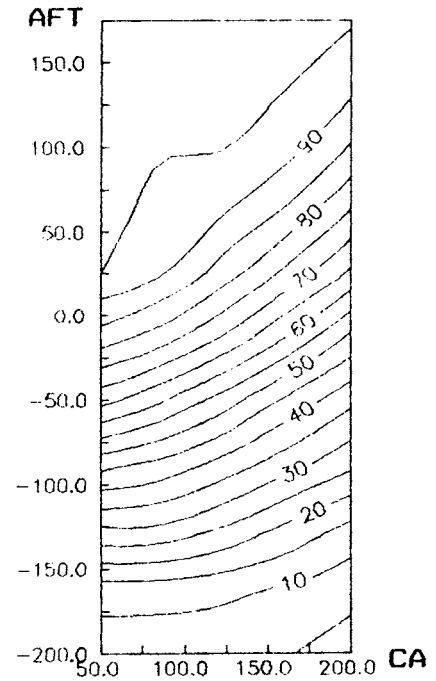
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 07//BC/OUT



AFT x CA x FREQUENCIA Posto 07//BC/NOV

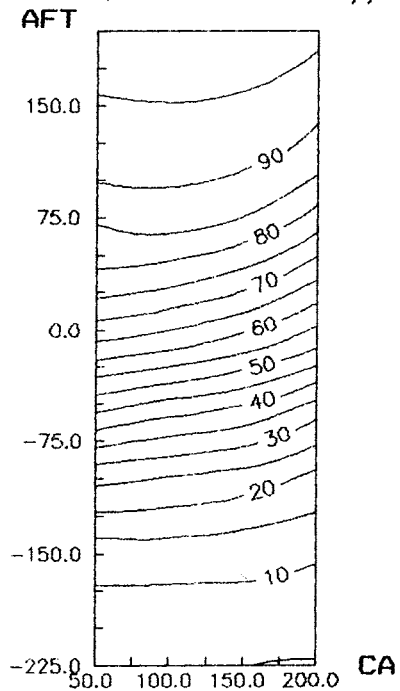


AFT x CA x FREQUENCIA Posto 07//BC/DE7

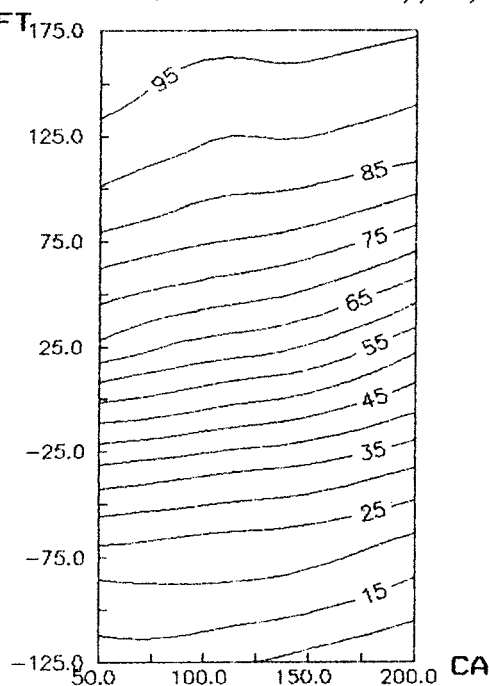


4.3.5 GRAFICOS DE AFT, CA, FREQUENCIA PARA O POSTO 12,
COM EVAPOTRANSPIRAÇÃO ESTIMADA PELO METODO DE MAKKINK.

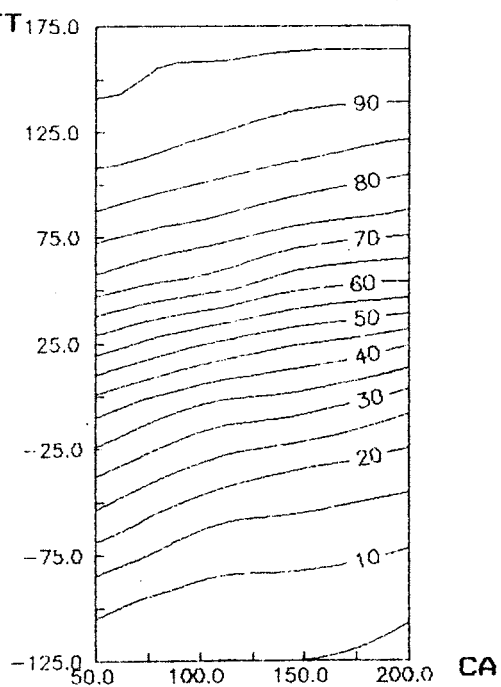
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12//MK/JAN



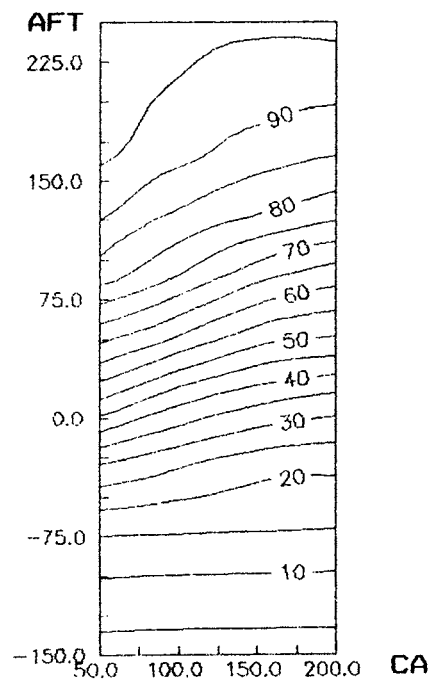
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12//MK/FEV



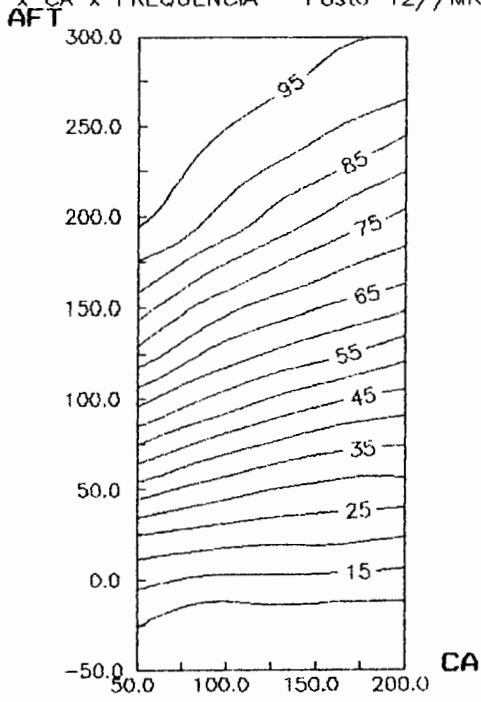
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12//MK/MAR



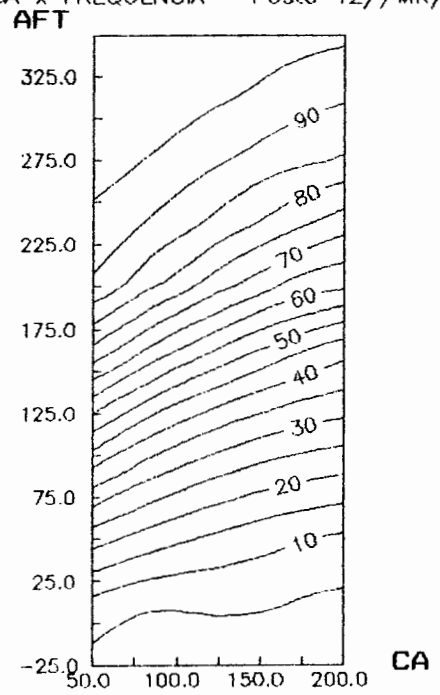
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12//MK/ABR



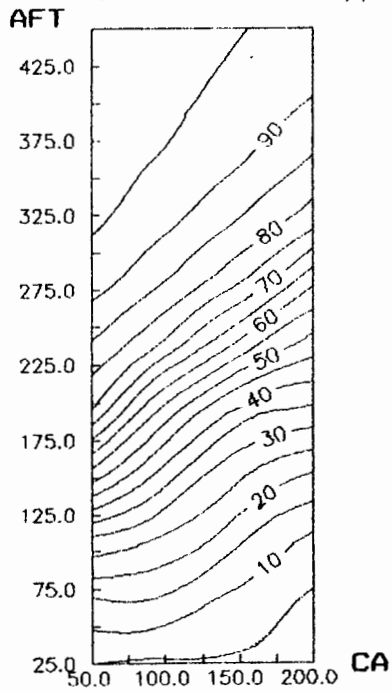
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12//MK/MAI



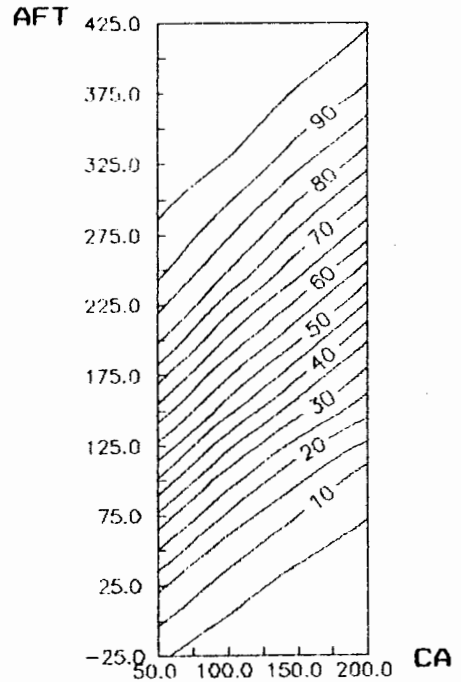
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12//MK/JUN



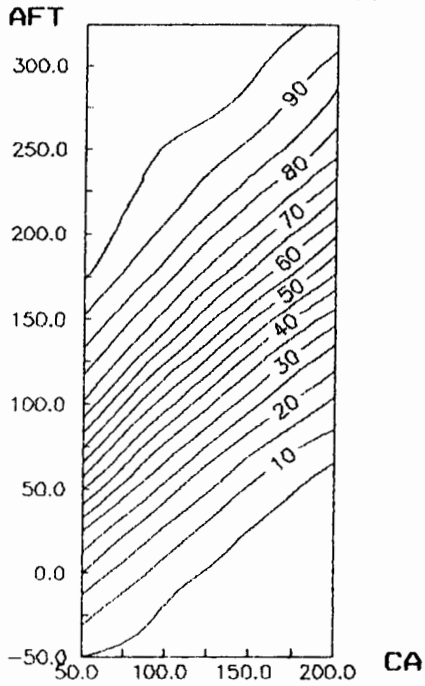
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12//MK/JUL



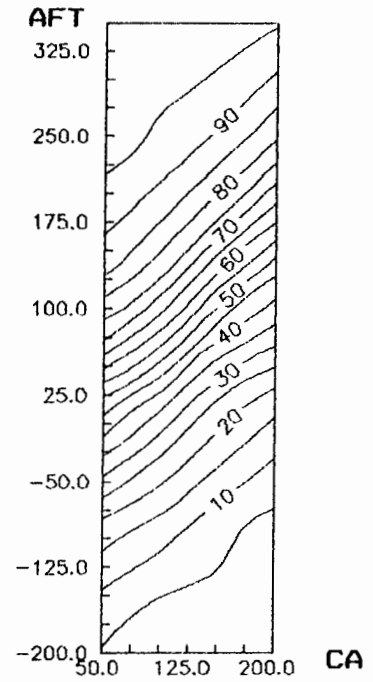
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12//MK/AGO



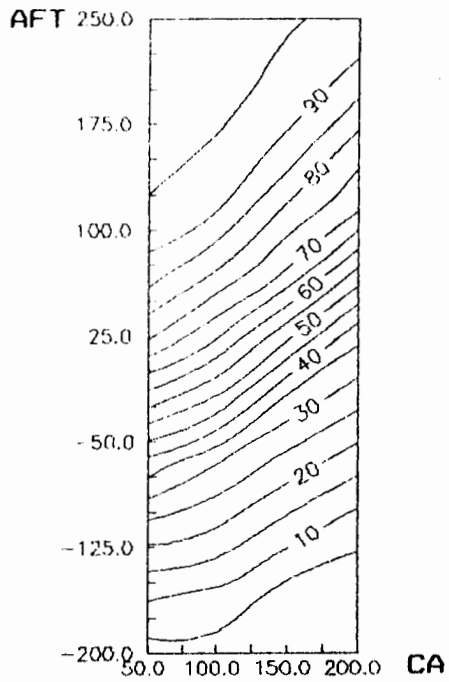
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12//MK/SET



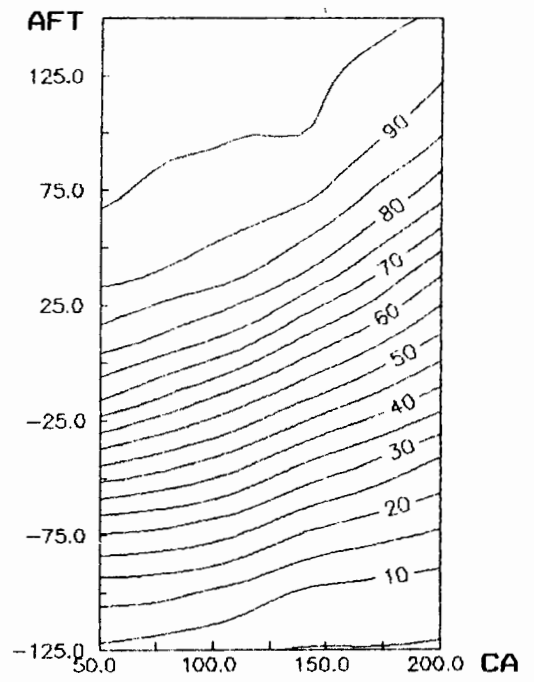
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12//MK/OUT



AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12//MK/NOV

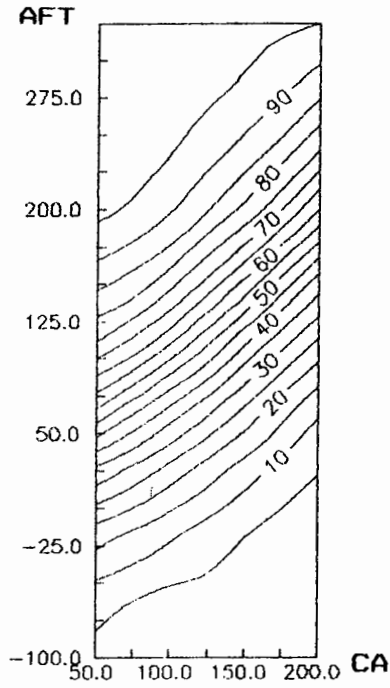


AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12//MK/DEZ

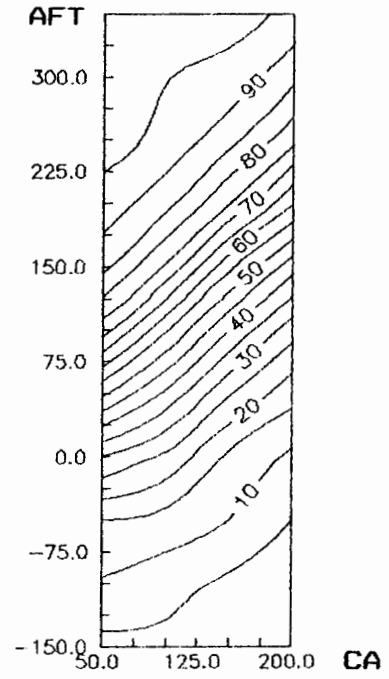


4.3.6 GRAFICOS DE AFT_xCA_xFREQÜENCIA PARA O POSTO 13,
COM EVAPOTRANSPIRAÇÃO ESTIMADA PELO METODO DE THORNTHWAITE.

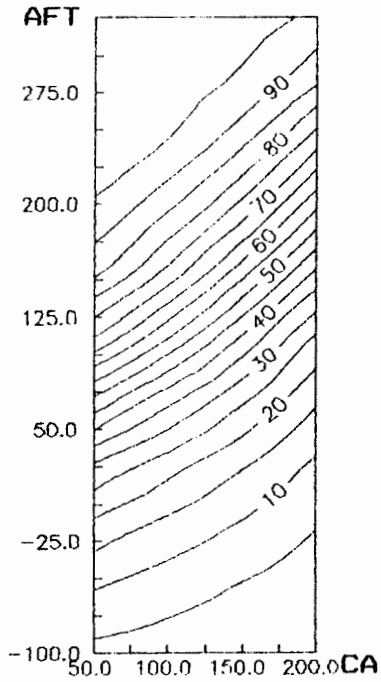
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 13//TH/JAN



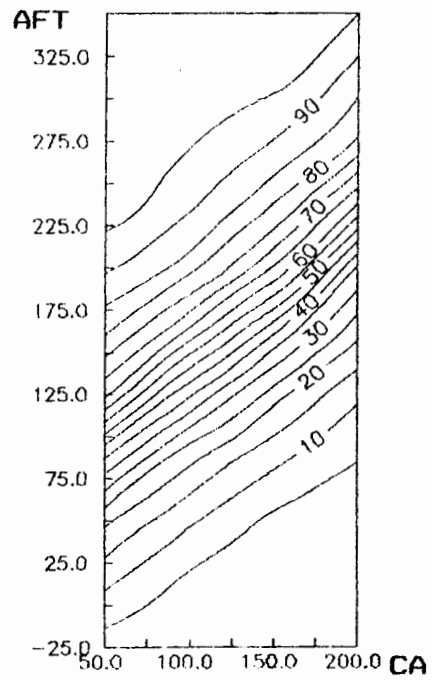
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 13//TH/FEV



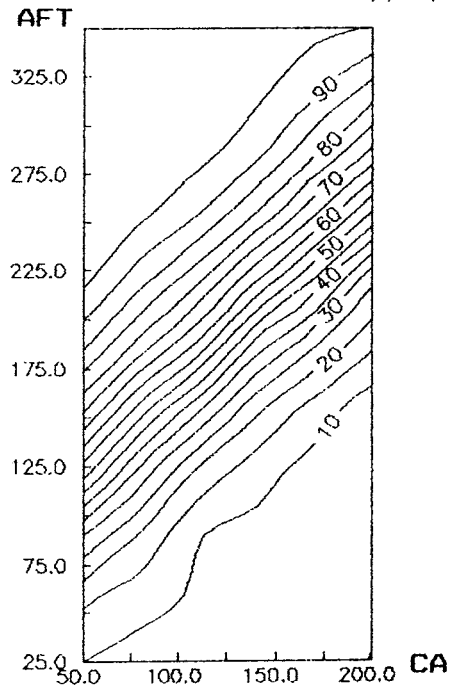
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 13//TH/MAR



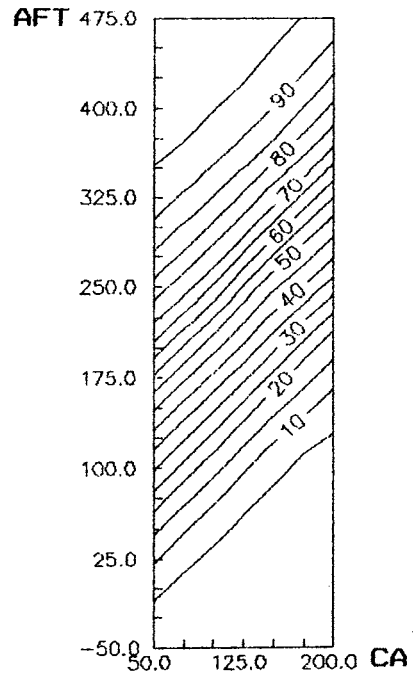
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 13//TH/ABR



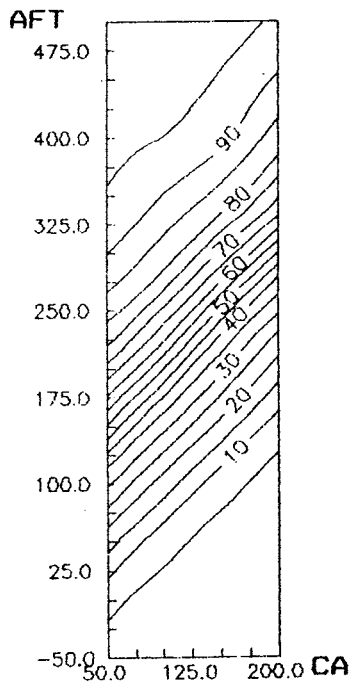
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 13//TH/MAI



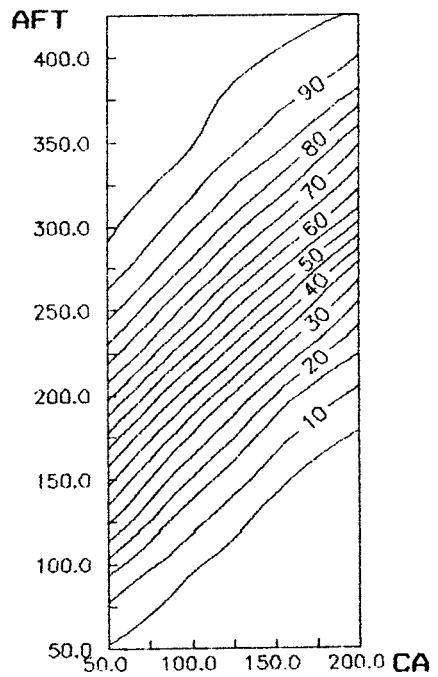
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 13//TH/JUN



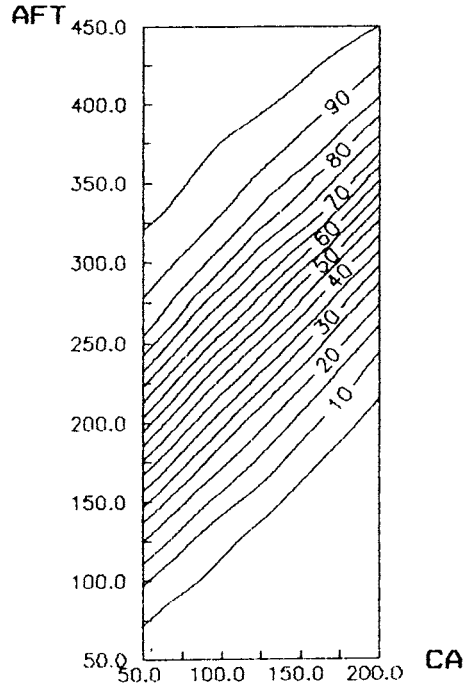
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 13//TH/JUL



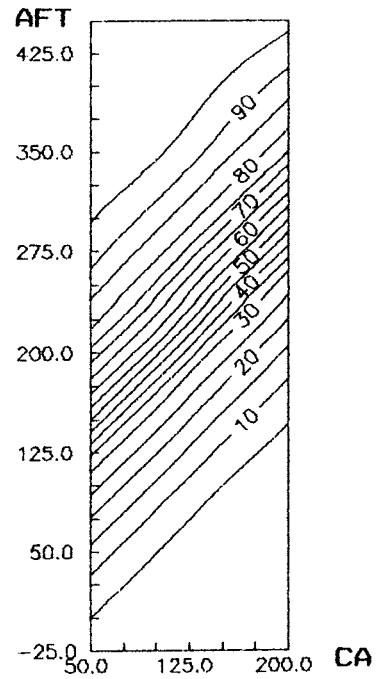
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 13//TH/AGO



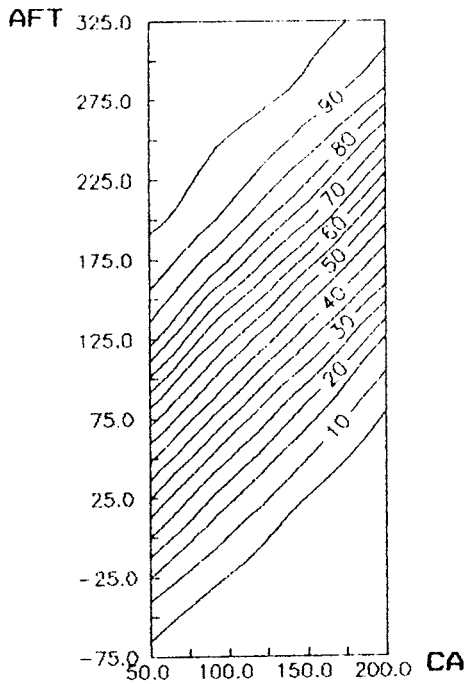
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 13//TH/SET



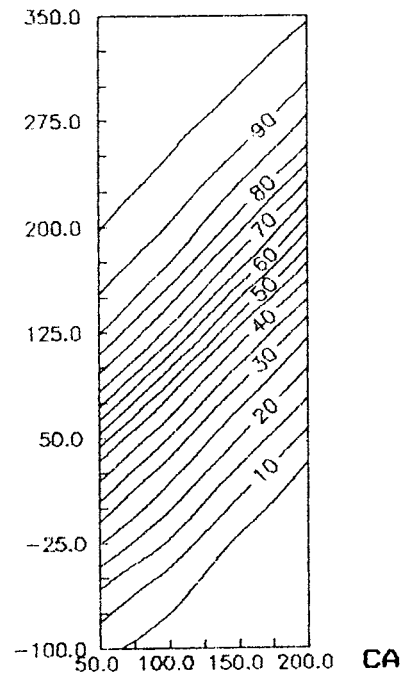
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 13//TH/OUT



AFT x CA x FREQUENCIA Posto 13//TH/NOV

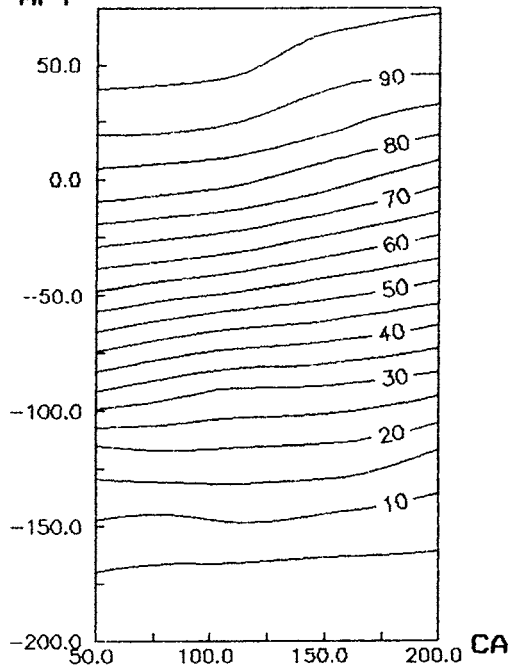


AFT x CA x FREQUENCIA Posto 13//TH/DEZ

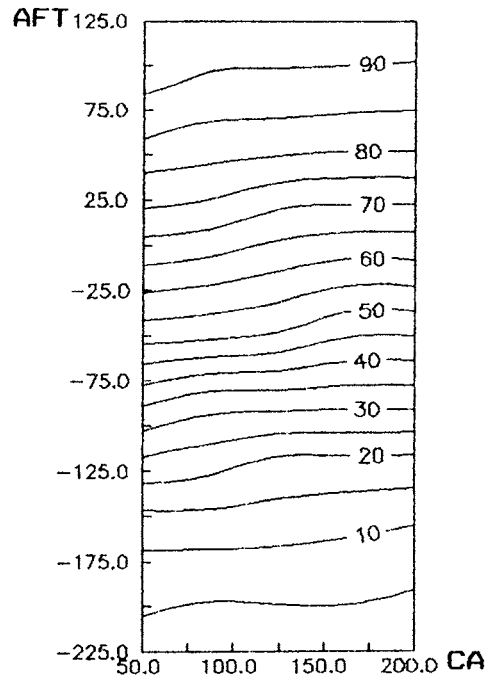


4.3.7 GRAFICOS DE AFT_xCAxFREQÜENCIA PARA O POSTO 14,
COM EVAPOTRANSPIRAÇÃO ESTIMADA PELO METODO DE PENMAN.

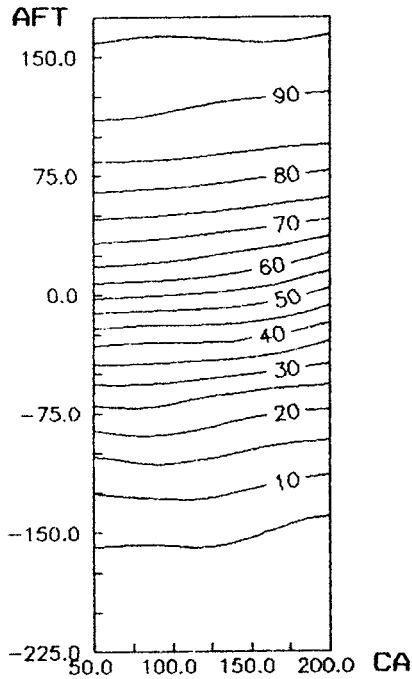
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14//PN/JAN



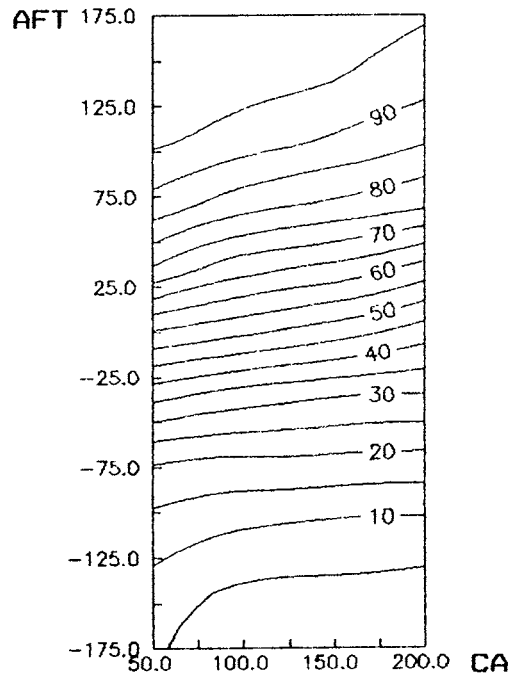
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14//PN/FEV



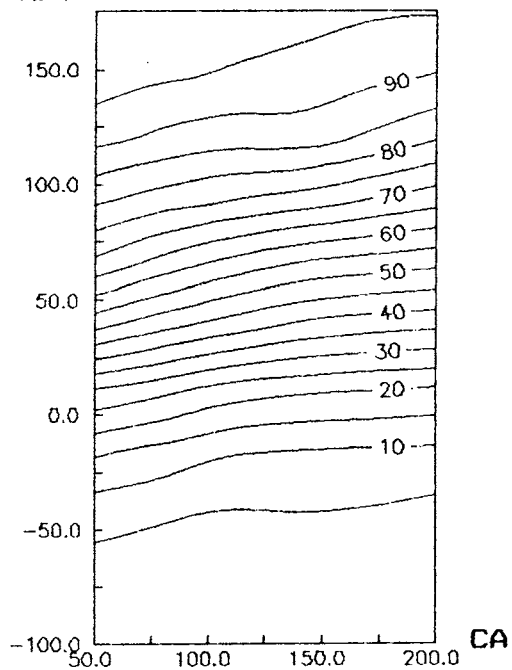
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14//PN/MAR



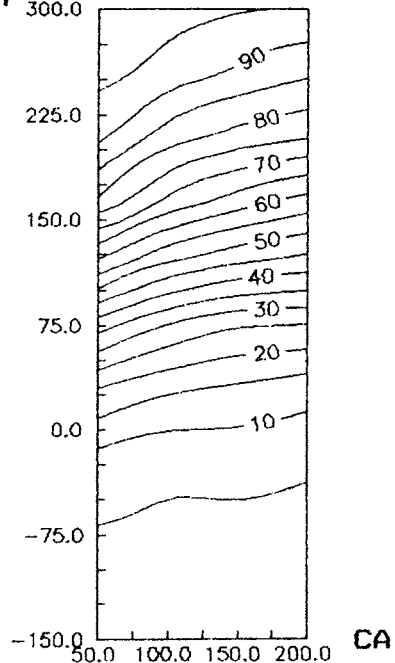
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14//PN/ABR



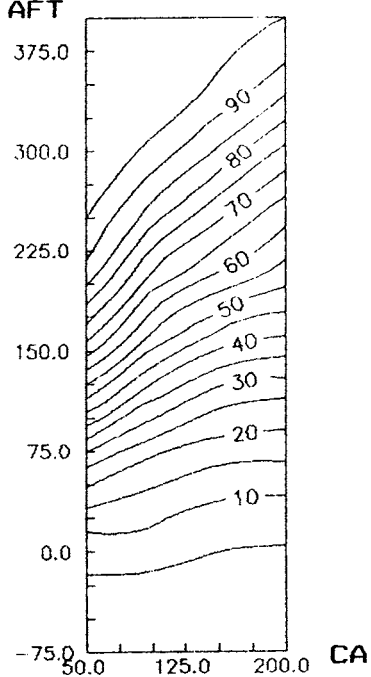
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14//PN/MAI



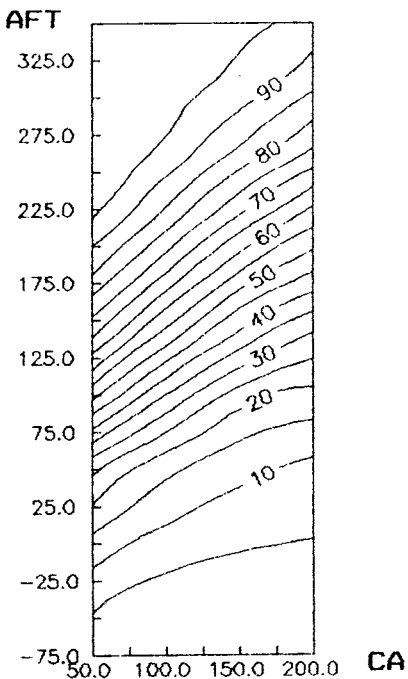
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14//PN/JUN



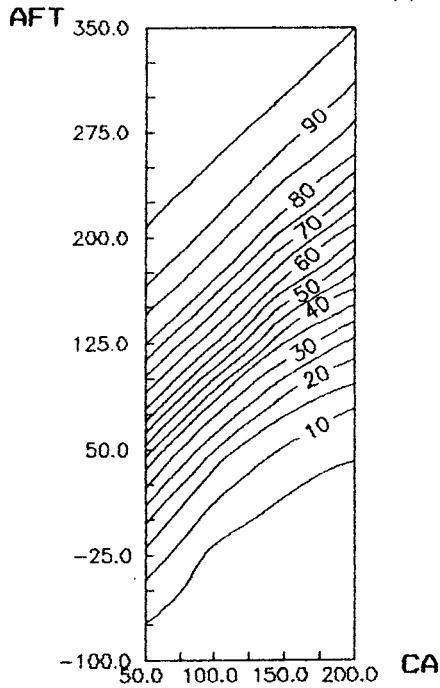
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14//PN/JUL



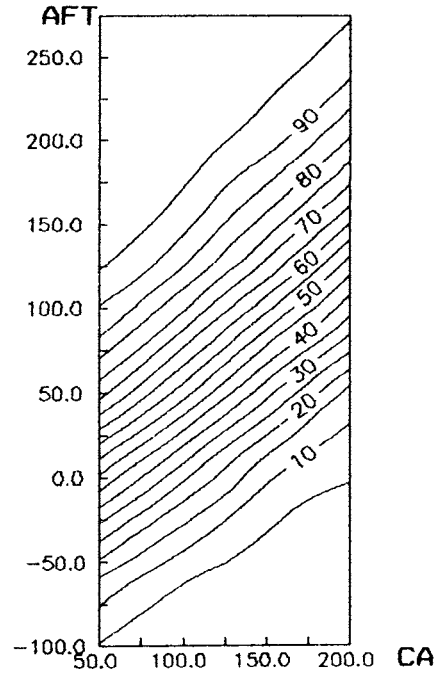
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14//PN/AGO



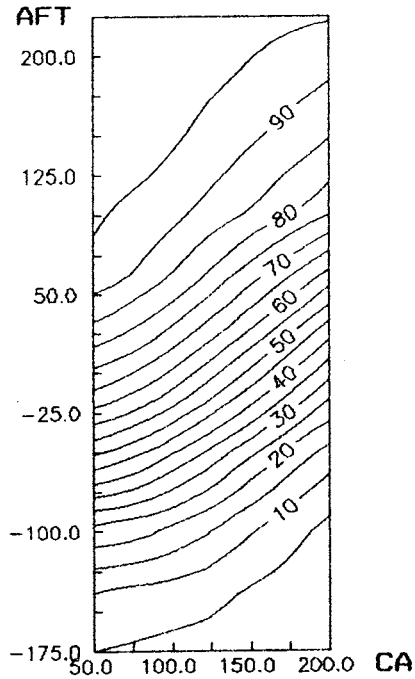
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14//PN/SET



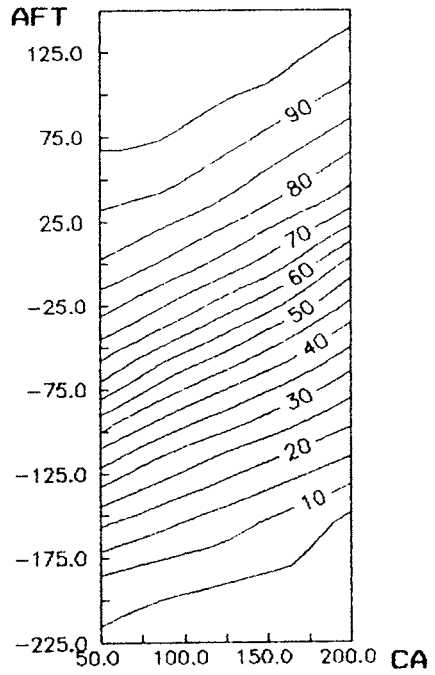
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14//PN/OUT



AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14//PN/NOV

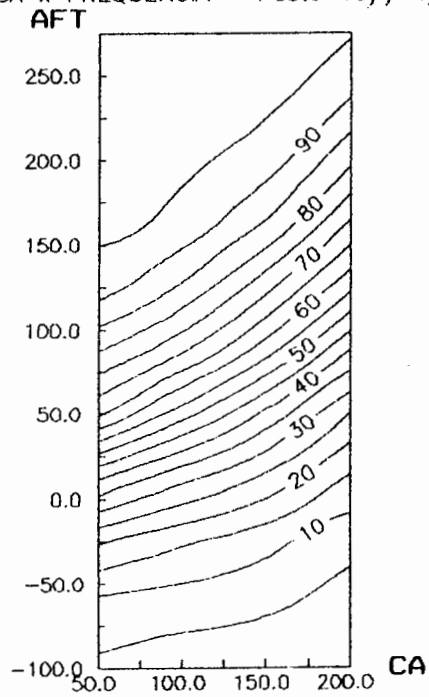


AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14//PN/DEZ

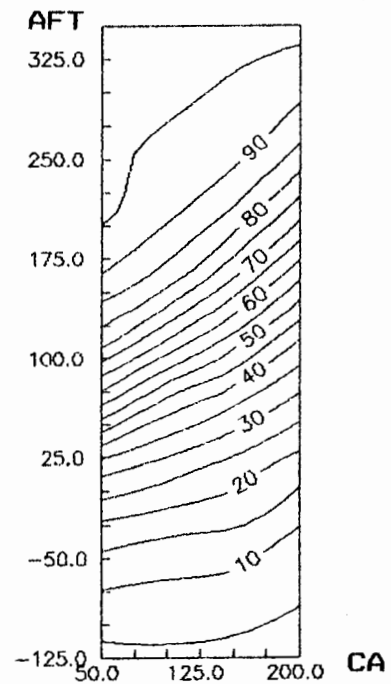


4.3.8 GRAFICOS DE AFT_xCA_xFREQUENCIA PARA O POSTO 15,
COM EVAPOTRANSPIRAÇÃO ESTIMADA PELO METODO DE TURC.

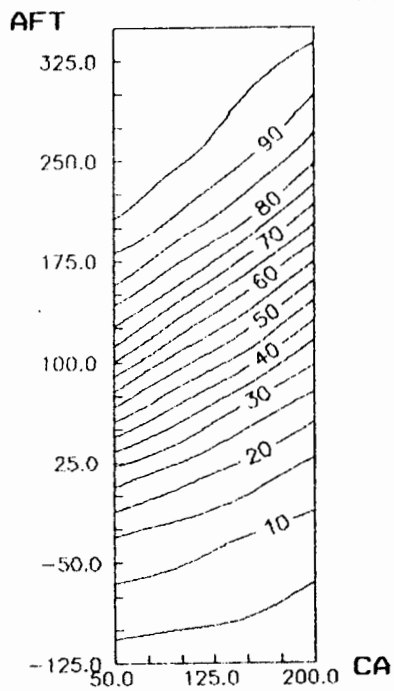
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15//TC/JAN



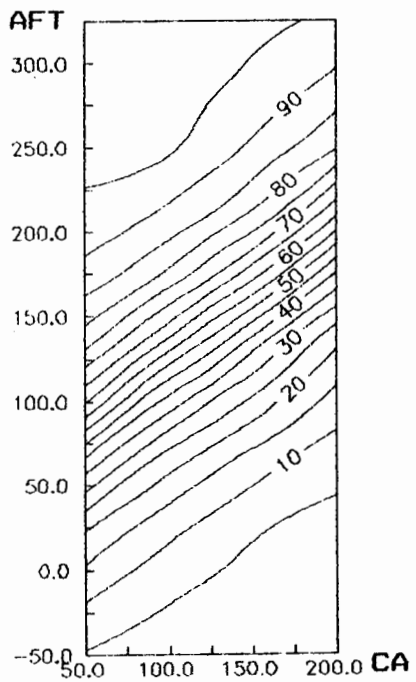
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15//TC/FEV



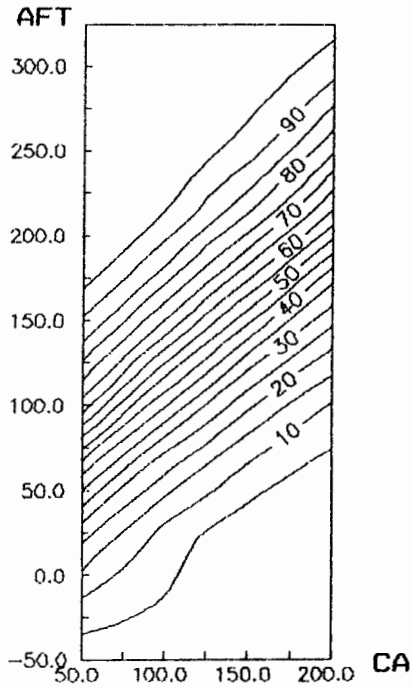
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15//TC/MAR



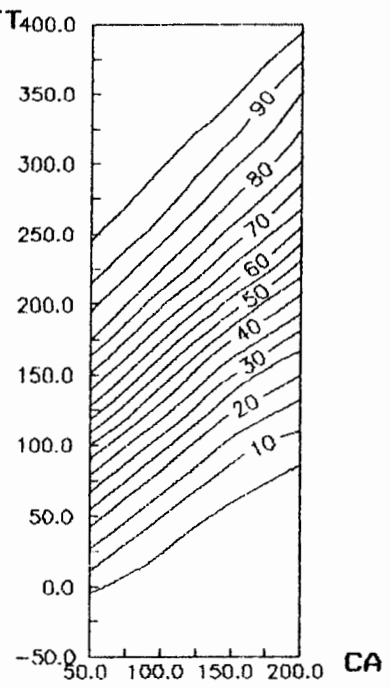
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15//TC/ABR



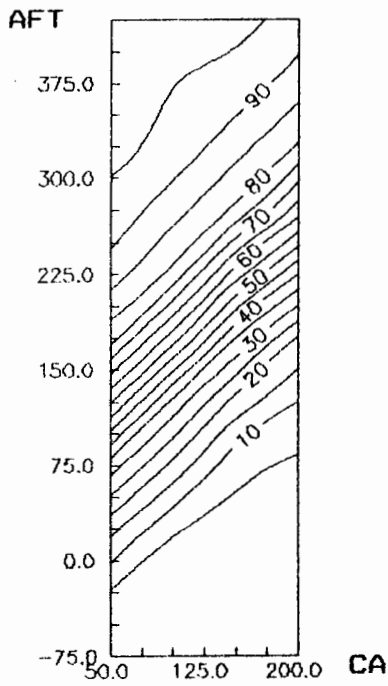
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15//TC/MAI



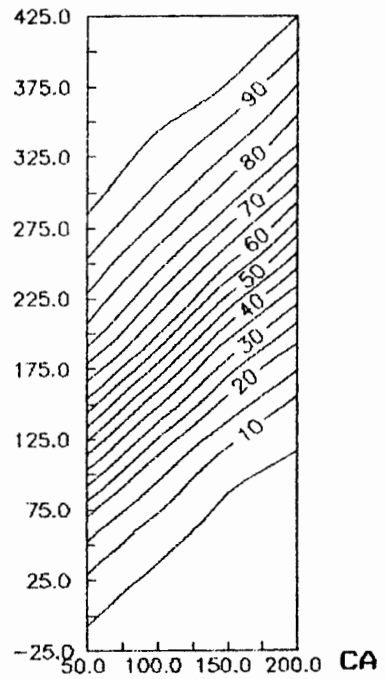
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15//TC/JUN



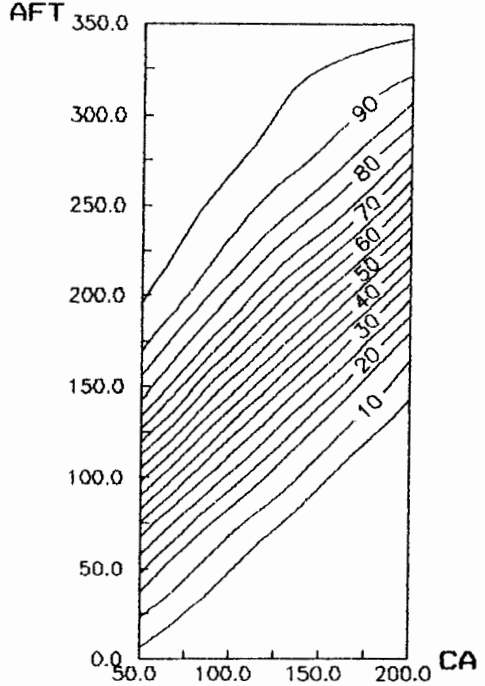
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15//TC/JUL



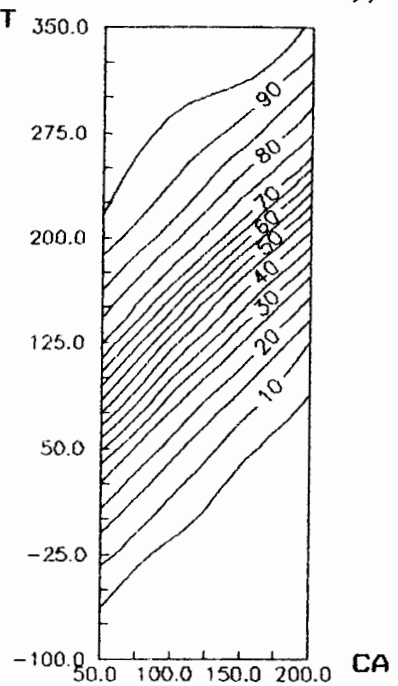
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15//TC/AGO



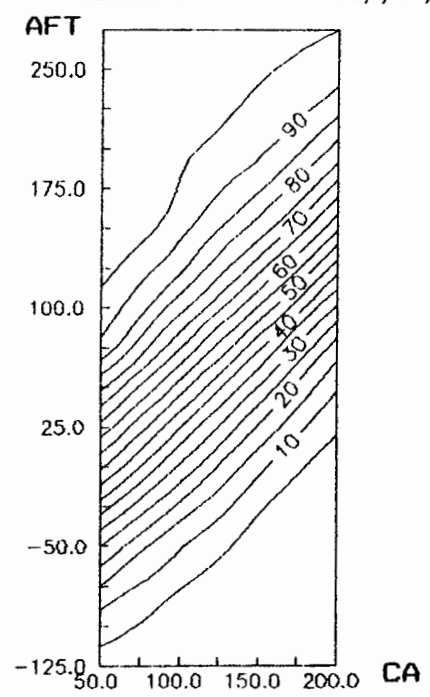
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15//TC/SET



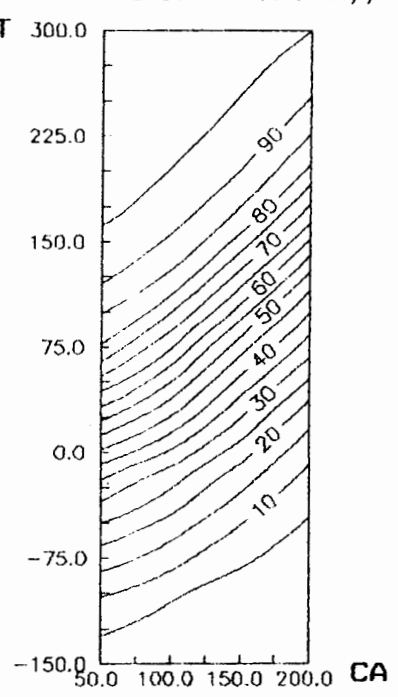
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15//TC/OUT



AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15//TC/NOV



AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15//TC/DEZ



5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.

Os dados disponíveis da região estudada permitiram uma grande variedade de combinações dos principais fatores que são considerados em trabalhos desta espécie. A seguir são apresentadas as conclusões e recomendações derivadas dos estudos realizados.

- Para algumas séries geradas os gráficos de frequência acumulada apresentam distorções e instabilidades, nas regiões inferior e/ou superior, que correspondem às frequências de valores extremos. Estas distorções, em geral, surgem para as faixas de frequência acumulada superiores a 90% e inferiores a 10%.
- A modelação e análise de frequência da variável AFT é mais flexível do que a análise de séries de déficits e excessos hídricos, pois não é afetada por fatores como a maior ou menor sensibilidade de diferentes culturas aos níveis de água disponível.
- A variável AFT pode ser relacionada com a ocorrência de déficits hídricos, para qualquer nível de esgotamento da capacidade de armazenamento, tomado como referência de déficit. Sendo que os gráficos de $AFT \times CA \times FREQUENCIA$ podem ser utilizados não só para indicar a probabilidade de ocorrência de déficits e excessos hídricos, mas também para indicar as intensidades dos mesmos, para diferentes níveis de probabilidade, visto que os valores de AFT não são restritos pelos limites inferior e superior da capacidade de armazenamento considerada.
- Na grande maioria das situações os modelos autorregressivos de primeira ordem AR(1), apresentaram o melhor desempenho na modelação dos processos.
- Nas situações em que os modelos de melhor desempenho não foram os AR(1), foi constatado um desempenho superior dos modelos sazonais em relação aos não sazonais.
- A capacidade de armazenamento, na grande maioria dos casos, foi o fator de maior peso sobre o desempenho dos modelos testados, sendo que com o seu aumento, aumenta a possibilidade

de uso de um modelo diferente do AR(1), em razão do aumento da memória do processo.

- A forma geral dos gráficos de AFT×CA×FREQUÊNCIA é menos afetada pelo tipo de modelo empregado em sua geração do que pela qualidade de ajuste do mesmo.
- O tamanho das séries históricas também não afetou a forma geral dos gráficos de AFT×CA×FREQUÊNCIA obtidos a partir das séries geradas.
- Não foi possível estabelecer relações entre os métodos de estimativa da evapotranspiração e o tipo de modelo que apresenta melhor qualidade de ajuste.
- A metodologia proposta neste estudo se mostrou exequível e bastante apropriada, de forma que é recomendável a sua utilização em outras situações semelhantes.
- Como forma de dar seguimento ao estudo aqui relatado são sugeridas as seguintes alternativas de pesquisa:
 - empregar modelos estocásticos na avaliação de variações de conteúdo de umidade no solo medidas por métodos diretos e verificar a viabilidade do emprego destes modelos, para fins não só de geração de valores, mas também para a previsão de valores futuros;
 - verificar a viabilidade do emprego de modelos de desagregação para avaliar a variação do conteúdo de umidade em períodos mais curtos, partindo de períodos mensais;
 - desenvolver trabalhos semelhantes ao aqui relatado, com a incorporação de modelos multivariados, para dar às informações um caráter regional de maior relevância.

6. BIBLIOGRAFIA

- ABBOITIZ, M.; LABADIE, J.; HERMANN, O. 1986. Stochastic soil moisture estimation and forecasting for irrigated fields. Water Resources Research, Washington, 22(2):180-90.
- ANDO, Y.; MUSLAKE, K.; TAKAMASI, I. 1983. Modeling of hidrologic process in small natural hillslope basin, based on the synthesis of partial hydrological relationships. Journal of Hydrology, Amsterdam, 64:311-37.
- BARRIOS, J. & LEOBEL, G. 1971. Determinação rápida das limitações de umidade para as culturas no estado do Rio Grande do Sul - Brasil. In: II SEMINARIO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO, Porto Alegre, 1971. Anais. 1971.
- BEARD, L. 1967. Simulation of daily streamflow. In: INTERNATIONAL HYDROLOGY SYMPOSIUM, Anais. Fort Collins. Paper 78.
- BELTRAME, L.; TAYLOR, J.; CAUDURO, F. 1979. Probabilidade de ocorrência de déficits e excessos hídricos em solos do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. 79f.
- BERLATO, M. 1976. Análise de alguns elementos componentes do agroclima do estado do Rio Grande do Sul. Diss. Mestr. Instituto Interamericano de Ciências Agrícolas - OEA. Turrialba. 130p.
- BERLATO, M. & MOLION, L. 1981. Evaporação e evapotranspiração. Instituto de Pesquisas Agropecuárias - IPAGRO. Porto Alegre. 95p. (IPAGRO. Boletim Técnico, 7).
- BOX, G. & JENKINS, G. 1976. Time series analysis: forecasting and control. San Francisco. Holden-Day. ed. rev. 575p.
- BRAS, R. & CORDOVA, J. 1981. Intraseasonal water allocation in deficit irrigation. Water Resources Research, Washington, 17(4):866-74, Aug.
- BRAS, R. & RODRIGUEZ-ITURBE, I. 1985. Random functions and hydrology. Addison. Wesley Publishing Company. U.S.A.

- BRASIL. 1971. Zoneamento agroclimático do Rio Grande do Sul. Ministério da Agricultura, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Pelotas. 90p. (Circular, 50, v.1).
- BRASIL. 1973. Levantamento de reconhecimento dos solos do Rio Grande do Sul. Ministério da Agricultura, Divisão de Pesquisas Pedológicas. Recife. 43p.
- BRASIL. 1980. Programa de homogeneização de dados: chuvas e vazões (1). Departamento Nacional de Aguas e Energia Elétrica, Divisão de Controle de Recursos Hídricos. Brasília. 86p.
- BRASIL. 1985. Determinação da evapotranspiração potencial decendial de Dourados, MS, por meio de métodos indiretos. Ministério da Agricultura, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Dourados. 35p. (EMBRAPA. UEPAE Dourados. Documentos, 16).
- BURIOL, G. et alii. 1977. Balanco hídrico seriado do Rio Grande do Sul. Santa Maria, UFSM. 216p.
- BURNASH, R. & FERRAL, R. 1973. Generalized hydrologic modeling, a key to drought analysis. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM IN HYDROLOGY, 2., Fort Collins, 1972. Anais. Fort Collins, Water Resources Publication, 1973.
- CAICEDO, N.; BELTRAME, L.F.; CAUDURO, F.A. 1988. Variação temporal e espacial da evapotranspiração média mensal. In: VIII CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, Florianópolis, 1988. Anais. v.2., 1053-68.
- CAMARGO, A. 1966. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. Secretaria da Agricultura - SP, Instituto Agronômico. Boletim 161. Campinas. 60p.
- CAMPOS, J. 1983. Um critério de seca agrícola e sua aplicação no estado do Ceará. Fortaleza, Universidade Federal do Ceará. 68p. (Boletim Técnico. Recursos Hídricos, n.1).
- CERVERA, J. & ARIAS, D. 1981. A perspective study of droughts in Mexico. Journal of Hydrology, Amsterdam, 51:41-55.
- CHOW, V. 1964. Handbook of applied hydrology. Mc. Graw Hill, New York.
- CLARKE, R. 1973. A review of some mathematical models used in hydrology with observations on their calibration and use. Journal of Hydrology, Amsterdam, 19:1-20.

- CORDOVA, J. & BRAS, R. 1981. Physically based probabilistic model of infiltration, soil moisture and actual evapotranspiration. Water Resources Research, Washington, 17(1):93-106, Feb.
- CRUCIANI, D. 1983. A drenagem na agricultura. 2.ed. São Paulo, Nobel. 337p.
- DORFMAN, R. 1977. Critérios de avaliação de alguns métodos de cálculo da evapotranspiração potencial. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curso de Pós-Graduação em Hidrologia Aplicada. 130f. Diss. Mestr. Hidrologia Aplicada.
- DORFMAN, R. 1982. The value of water-soil-plant information in irrigation: a deterministic approach. Haifa, Technion. 2v.
- DORFMAN, R. 1986. Planning of irrigation systems under conditions of scarce data. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. 114p.
- DORFMAN, R. 1989. Hidrologia agrícola: problemas e soluções. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, FA - IPH. Porto Alegre. 198p.
- DRACUP, J.; LEE, K.; PAULSON, E.Jr. 1980a. On the definition of droughts. Water Resources Research, Washington, 16(2):297-302, Apr.
- DRACUP, J.; LEE, K.; PAULSON, E.Jr. 1980b. On the statistical characteristics of droughts events. Water Resources Research, Washington, 16(2):289-96, Apr.
- ELETRONBRAS. 1978. Método para cálculo do balanço hídrico. Rio de Janeiro. 170p.
- FAO. 1987. Irrigation water needs. Irrigation water management, Training manual, 3. Roma.
- FIERING, M. & JACKSON, B. 1971. Synthetic hydrology. Monograph 1, American Geophysical Union. Washington.
- GUPTA, V. & DUCKSTEIN, L. 1975. A stochastic analysis of extreme droughts. Water Resources Research, Washington, 11(2):221-8, Apr.
- HARGREAVES, G. 1973. Disponibilidade e deficiência de umidade para a produção agrícola no Ceará, Brasil. s.l., Utah State University.
- HAVENS, A. 1954. Drought and agriculture. Weatherwise, U.S. Weather Bureau. 7, 51-55, 68.

- HERSHFIELD, D.; BRAKENSICK, D.; COMER, G. 1973. Some measures of agricultural drought. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM IN HYDROLOGY, 2., Fort Collins, 1972. Anais. Fort Collins, Water Resources Publication, 1973.
- HIEZ, G. & RANCAN, L. 1983. Aplicação do método do vetor regional no Brasil. In: V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HIDRICOS. Anais. v2.
- INCRA. 1973. Levantamento e avaliação de recursos naturais, sócio-econômicos e institucionais do Rio Grande do Sul. Brasília. 6v.
- JENSEN, M. 1974. Consumptive use of water and irrigation water requirements. Comm. irrig. water requ., Irrigation and Drainage Division, ASCE. 215p.
- JESUS, R. et alii. 1985. Homogeneização de séries de chuvas. In: VI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HIDRICOS, São Paulo, 1984. Anais. 3v. 381-90.
- KISIEL, C. 1969. Time series analysis of hydrologic data. Advances in hydroscience, New York, Academic Press, 5:1-119.
- KLAR, A. 1987. Relações água-solo-planta. Brasília, ABEAS. 106p. (ABEAS. Curso de Engenharia de Irrigação. Módulo 3. Parte A).
- KOTODA, K. 1986. Estimation of river basin evapotranspiration. Environmental Research Center Papers, Environmental Research Center. The University of Tsukuba. Tsukuba. (8). 66p.
- KOTTEGODA, N. 1980. Stochastic water resources technology. The Macmillan Press Ltd. London. 384p.
- LANNA, A.; BELTRAME, L.F.; LOUZADA, J.A.; COTRIM, S.L.; VEZZINI, F.M. (-). Comparação entre modelos diário e mensal de balanço hídrico para estimativa de necessidades de irrigação. Minuta de trabalho a ser apresentado no IX CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM.
- MATTOS, C. 1980. Uso de dados climatológicos na estimativa do número de dias úteis para implantação de culturas de verão. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curso de Pós-Graduação em Hidrologia Aplicada. 95f. Diss. Mestr. Hidrol. Aplicada.
- MILLAR, A. 1978. Drenagem de terras agrícolas: bases agronômicas. São Paulo. 276p.
- MOTA, F. 1975. Meteorologia agrícola. São Paulo. Nobel. 380p.

- MOTA, F. 1980. Probabilidades das necessidades de irrigação em 20 combinações do binômio clima-solo no Rio Grande do Sul. Universidade Federal de Pelotas, Estação Agro-Climatológica. 86p. (Boletim técnico, 2).
- MOTA, F. et alii. 1970. Balanço hídrico no Rio Grande do Sul. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Rio de Janeiro, 5:1-27.
- NAKAGAWA, S. 1984. Study on evapotranspiration from pasture. Environmental Research Center Papers, Environmental Research Center. The University of Tsukuba. Tsukuba. (4). 87p.
- NICKS, A. & HARP, J. 1980. Stochastic generation of temperature and solar radiation data. Journal of Hydrology, Amsterdam, 48:1-17.
- PINTO, N. et alii. 1976. Hidrologia básica. São Paulo. Edgard Blücher. 278p.
- PORTO, R. 1986. Bases hidrológicas para projetos de irrigação. Brasília, ABEAS. (ABEAS. Curso de Elaboração de Projetos de Irrigação. Módulo 2).
- RICHARDSON, C. 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation. Water Resources Research, Washington, 17(1):182-90, Feb.
- SAAD, J. & SCALOPPI, E. 1988. Análise dos principais métodos climatológicos para estimativa da evapotranspiração. In: VIII CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, Florianópolis, 1988. Anais. v.2., 999-1021.
- SAINT-FOULC, J. 1968. El riego por aspersión. Barcelona, ETA. 252p.
- SALAS, J. et alii. 1985. Applied modeling of hydrologic time series. Water Resources Publications. Littleton. 484p.
- SALAS, J. & SMITH, R. 1978. Correlation functions of time series. In: Lecture notes, Computer Workshop in Statistical Hydrology. Colorado State University. Fort Collins.
- SAMANI, Z. & PESSARAKLI, M. 1986. Estimation potential crop evapotranspiration with minimum data in Arizona. Transactions of the ASAE, 29(2):522-24.
- SEDIYAMA, G. 1987. Necessidade de água para cultivos. Brasília, ABEAS. 143p. (ABEAS. Curso de Engenharia de Irrigação. Módulo 4).
- SEN, I. 1980. Regional drought and flood frequency analysis: theoretical consideration. Journal of Hydrology, Amsterdam, 46:265-79.

- SMART, G. 1983. Drought analysis and soil moisture prediction. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, New York. 109(2):251-61, June.
- THORNTHWAITE, C. & MATHER, J. 1955. The water balance. Publications in Climatology, 1(8). Centerton. 104p.
- VAN BAVEL, C. 1953. A drought criterion and its application in evaluating drought incidence and hazard. Agronomy Journal, Madison, 45:167-72.
- YEVJEVICH, V. 1967. An objective approach to definition and investigation of continental hydrological droughts. Hydrology Papers, Fort Collins, 23.
- YEVJEVICH, V. 1972. Stochastic Processes in hydrology. Water Resources Publications. Fort Collins.

7. INDICE REMISSIVO DA BIBLIOGRAFIA.

ABOITIZ et al. (1986)	15
ANDO et al. (1983)	8
BARRIOS & LEOBEL (1971)	47
BEARD (1967)	19
BELTRAME et al. (1979)	1, 8, 10, 11, 47, 50
BERLATO (1976)	52
BERLATO & MOLIION (1981)	52
BOX & JENKINS (1976)	17, 18, 19, 21, 30, 63, 68, 72, 79
BRAS & CORDOVA (1981)	15
BRAS & RODRIGUEZ-ITURBE (1985)	16, 19
BRASIL (1971)	52
BRASIL (1973)	47
BRASIL (1980)	35
BRASIL (1985)	51
BURIOI et al. (1977)	1, 11, 47
BURNASH & FERRAL (1973)	8
CAICEDO et al. (1988)	51
CAMARGO (1966)	50, 51
CAMPOS (1983)	6, 11, 12
CERVERA & ARIAS (1981)	14
CHOW (1964)	16
CLARKE (1973)	16
CORDOVA & BRAS (1981)	14
CRUCIANI (1983)	9
DORFMAN (1977)	49, 50, 51, 56
DORFMAN (1982)	13
DORFMAN (1986)	13
DORFMAN (1989)	48
DRACUP et al. (1980a)	8
DRACUP et al. (1980b)	14
ELETROBRAS (1978)	4
FAO (1987)	32, 48
FIERING & JACKSON (1971)	19
GUPTA & DUCKSTEIN (1975)	8, 13
HARGREAVES (1973)	11
HAVENS (1954)	7
HERSHFIELD et al. (1973)	8
HIEZ & RANCAN (1983)	41
INCRA (1973)	5, 47
JENSEN (1974)	49
JESUS et al. (1985)	41
KISIEL (1969)	12

KLAR (1987)	5, 6, 7
KOTODA (1986)	49
KOTTEGODA (1980)	17, 19, 30
LANNA et al. (-)	48
MATTOS (1980)	9
MILLAR (1978)	9
MOTA (1975)	50
MOTA (1980)	47
MOTA et al. (1970)	1, 10, 47
NAKAGAWA (1984)	49
NICKS & HARP (1980)	14
PINTO et al. (1976)	31
PORTO (1986)	48
RICHARDSON (1981)	15
SADD & SCALOPPI (1988)	49, 50, 51, 56
SAINT-FOULC (1968)	11
SALAS & SMITH (1978)	13
SALAS et al. (1985)	18, 19, 20, 22, 62, 68, 76, 83, 84
SAMANI & PESSARAKLI (1986)	56
SEDIYAMA (1987)	4, 52, 56
SEN (1980)	14
SMART (1983)	8, 10, 12, 15
THORNTHWAITTE & MATHER (1955)	10, 11
VAN BAVEL (1953)	10
YEVJEVICH (1967)	7, 8
YEVJEVICH (1972)	19

ANEXO

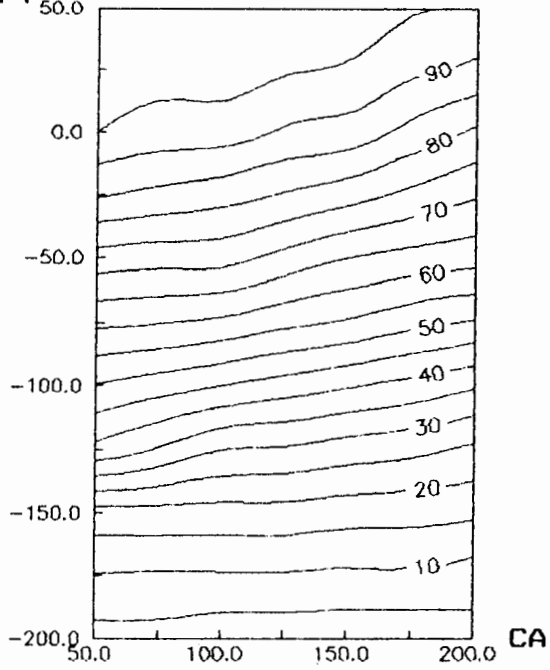
GRAFICOS DE AFT_xCA_xFREQUENCIA
PARA AS DEMAIS SITUAÇÕES ANALISADAS

INDICE DO ANEXO

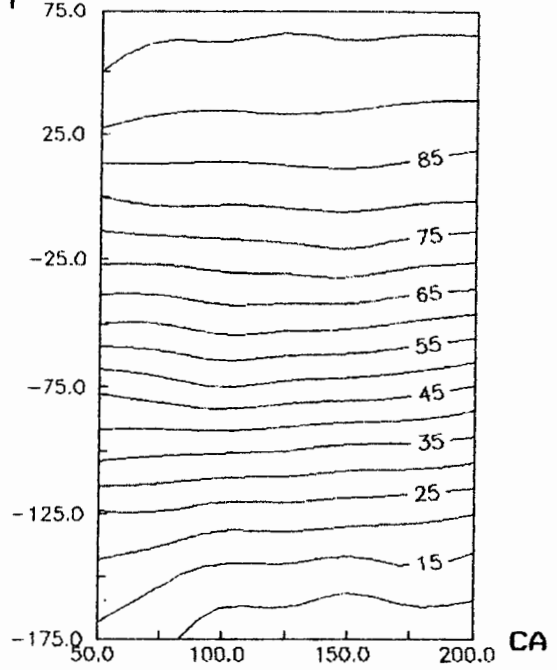
- Gráficos de AFT_xCA_xFREQÜENCIA para o posto 1,
com evapotranspiração estimada pelo
método de Blaney-CriddleA4
- Gráficos de AFT_xCA_xFREQÜENCIA para o posto 2,
com evapotranspiração estimada pelo
método de ThornthwaiteA7
- Gráficos de AFT_xCA_xFREQÜENCIA para o posto 6,
com evapotranspiração estimada pelo
método de Blaney-CriddleA10
- Gráficos de AFT_xCA_xFREQÜENCIA para o posto 7,
com evapotranspiração estimada pelo
método de ThornthwaiteA13
- Gráficos de AFT_xCA_xFREQÜENCIA para o posto 12,
com evapotranspiração estimada pelo
método de ThornthwaiteA16
- Gráficos de AFT_xCA_xFREQÜENCIA para o posto 12,
com evapotranspiração estimada pelo
método de Blaney-CriddleA19
- Gráficos de AFT_xCA_xFREQÜENCIA para o posto 12,
com evapotranspiração estimada pelo
método de HargreavesA22
- Gráficos de AFT_xCA_xFREQÜENCIA para o posto 12,
com evapotranspiração estimada pelo
método de TurcA25
- Gráficos de AFT_xCA_xFREQÜENCIA para o posto 13,
com evapotranspiração estimada pelo
método de Blaney-CriddleA28
- Gráficos de AFT_xCA_xFREQÜENCIA para o posto 14,
com evapotranspiração estimada pelo
método de ThornthwaiteA31

•Gráficos de AFT _x CA _x FREQÜENCIA para o posto 14, com evapotranspiração estimada pelo método de Blaney-Criddle	A34
•Gráficos de AFT _x CA _x FREQÜENCIA para o posto 14, com evapotranspiração estimada pelo método de Hargreaves	A37
•Gráficos de AFT _x CA _x FREQÜENCIA para o posto 14, com evapotranspiração estimada pelo método de Makkink	A40
•Gráficos de AFT _x CA _x FREQÜENCIA para o posto 14, com evapotranspiração estimada pelo método de Turc	A43
•Gráficos de AFT _x CA _x FREQÜENCIA para o posto 15, com evapotranspiração estimada pelo método de Thornthwaite	A46
•Gráficos de AFT _x CA _x FREQÜENCIA para o posto 15, com evapotranspiração estimada pelo método de Blaney-Criddle	A49
•Gráficos de AFT _x CA _x FREQÜENCIA para o posto 15, com evapotranspiração estimada pelo método de Penman	A52
•Gráficos de AFT _x CA _x FREQÜENCIA para o posto 15, com evapotranspiração estimada pelo método de Hargreaves	A55
•Gráficos de AFT _x CA _x FREQÜENCIA para o posto 15, com evapotranspiração estimada pelo método de Makkink	A58

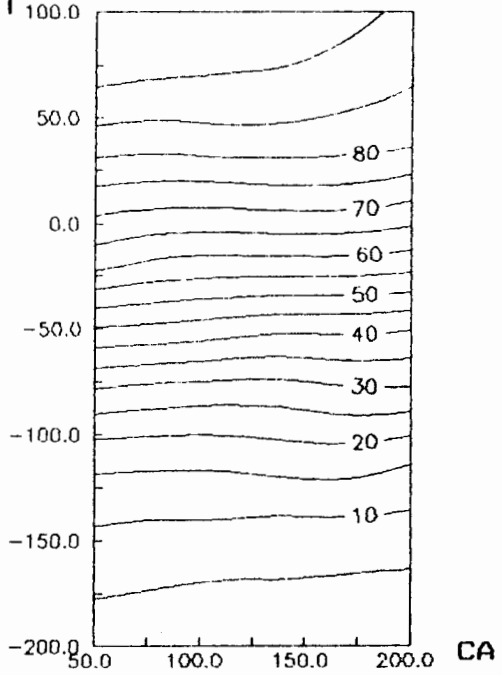
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 01//BC/JAN
AFT



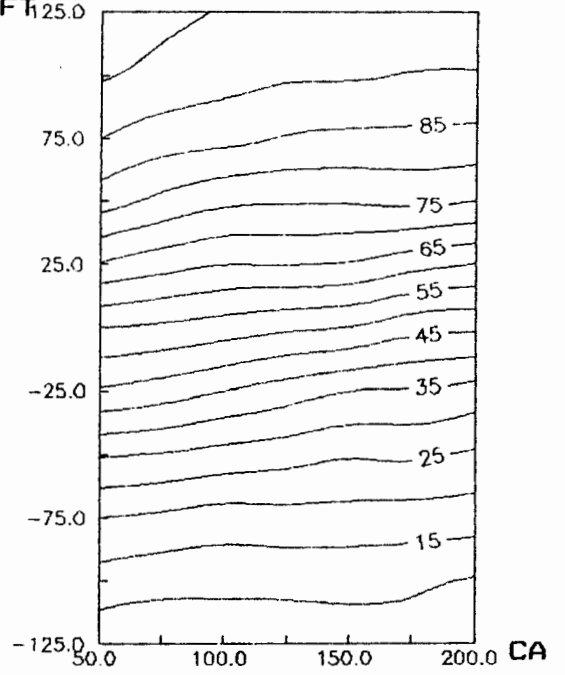
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 01//BC/FEV
AFT



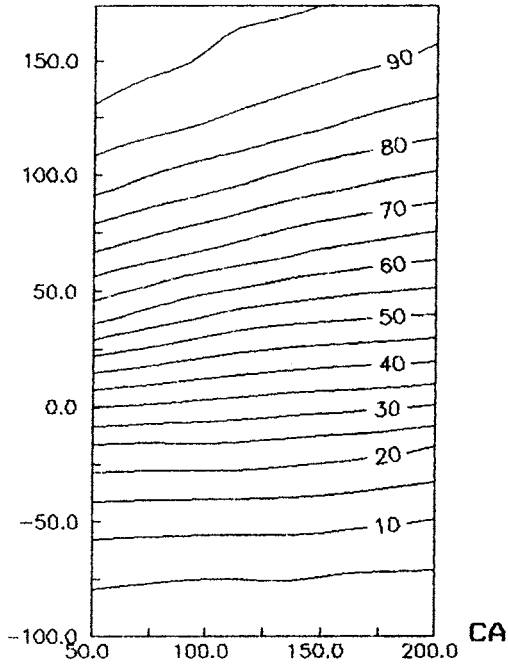
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 01//BC/MAR
AFT



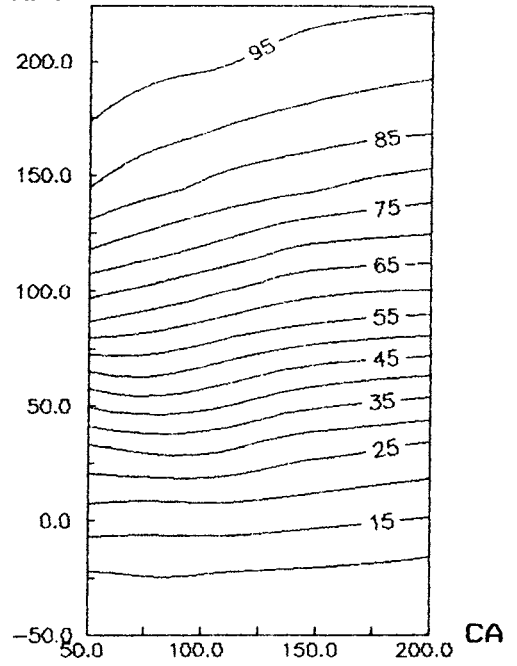
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 01//BC/ABR
AFT



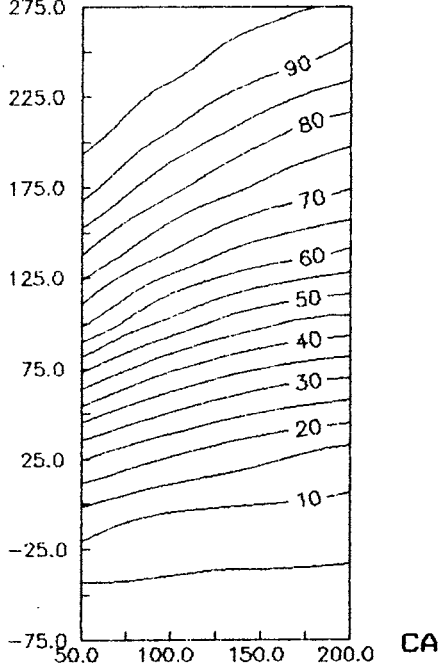
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 01//BC/MAI
AFT



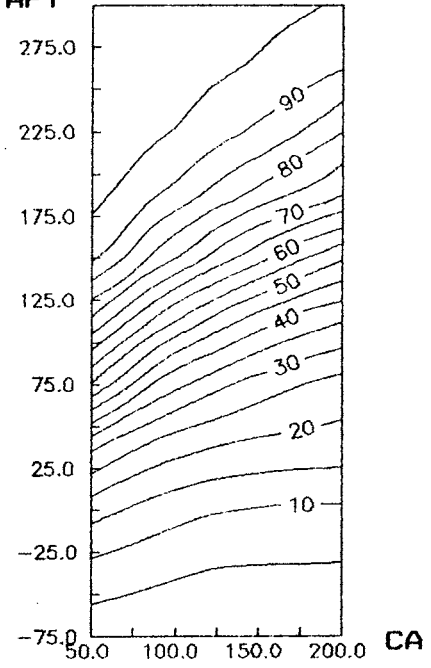
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 01//BC/JUN
AFT



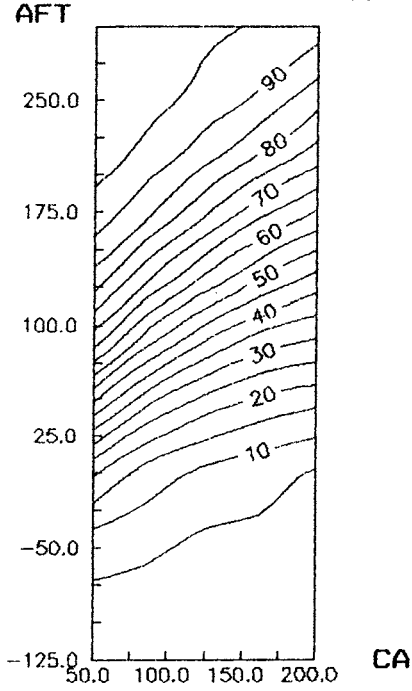
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 01//BC/JUL
AFT



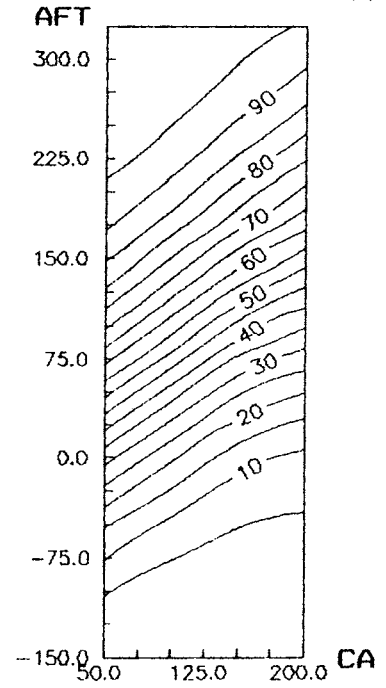
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 01//BC/AGO
AFT



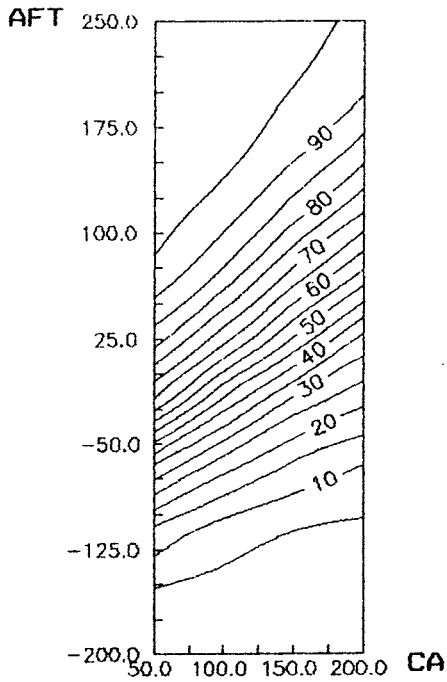
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 01//BC/SET



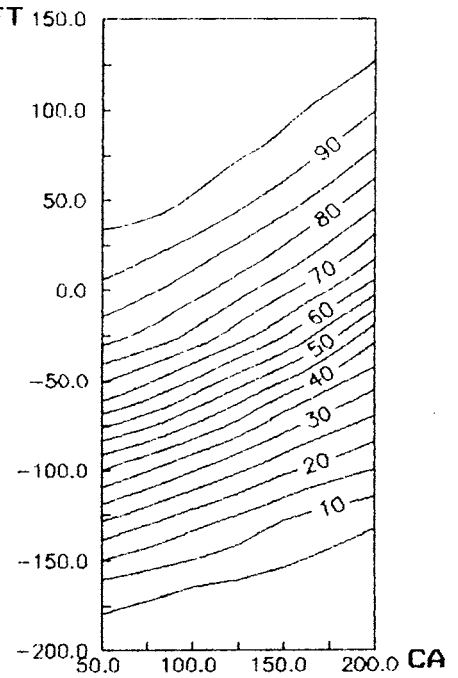
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 01//BC/OUT



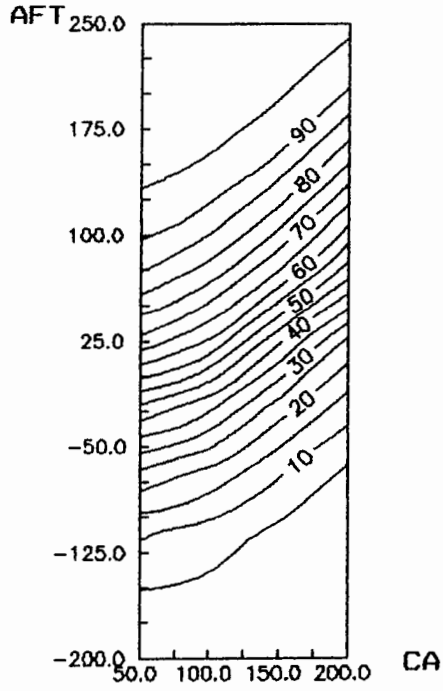
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 01//BC/NOV



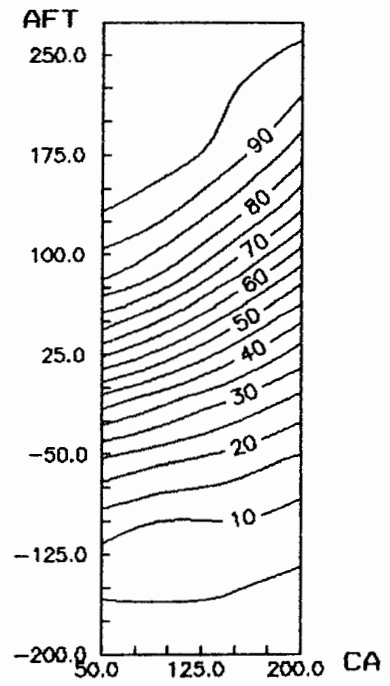
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 01//BC/DEZ



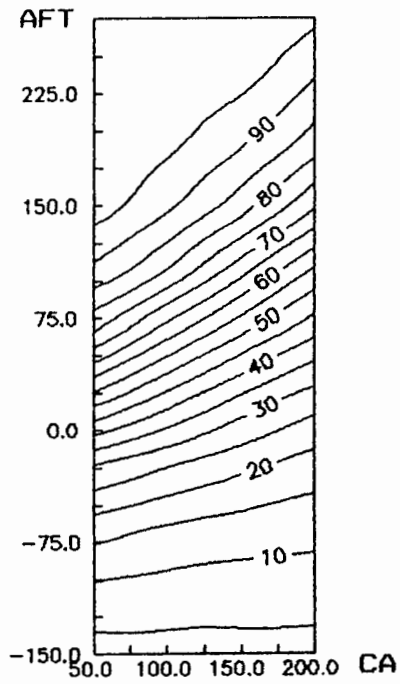
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 02/TH/JAN



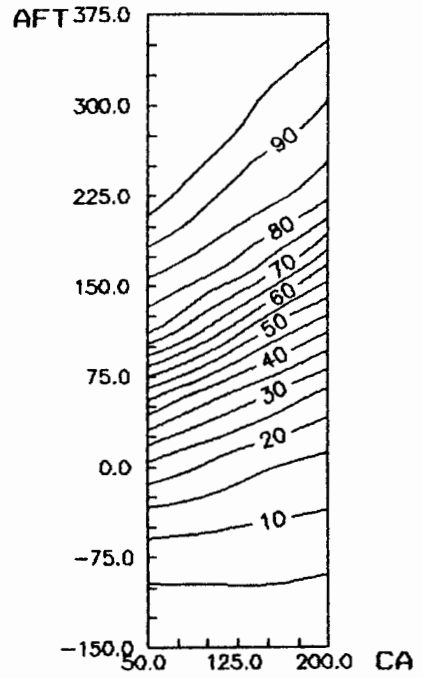
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 02/TH/FEV



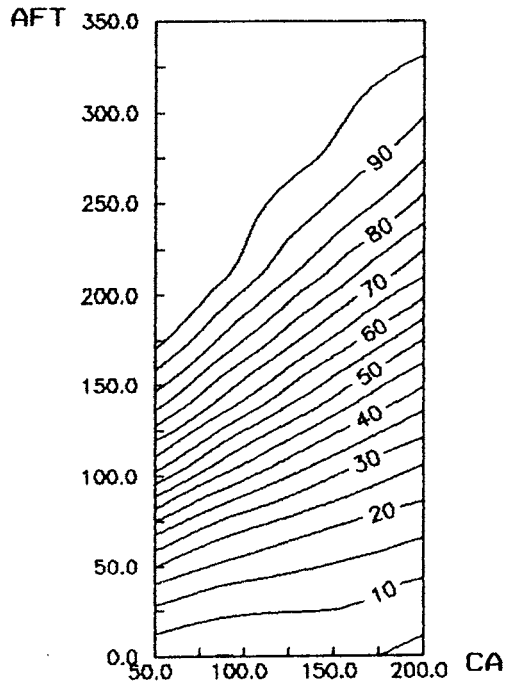
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 02/TH/MAR



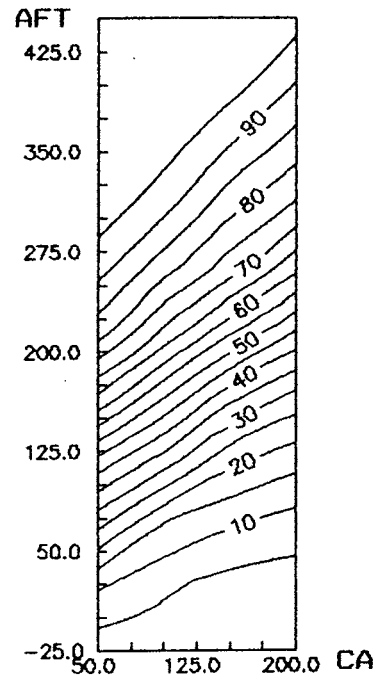
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 02/TH/ABR



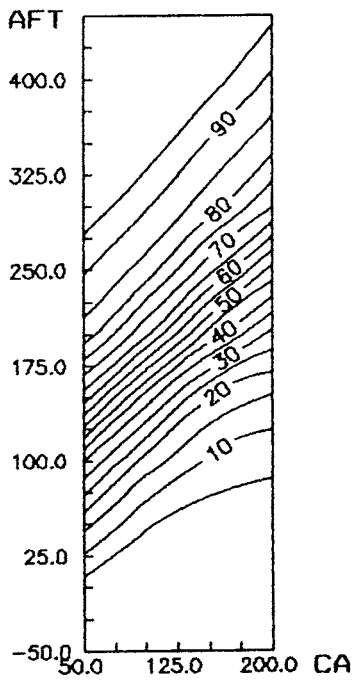
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 02/TH/MAI



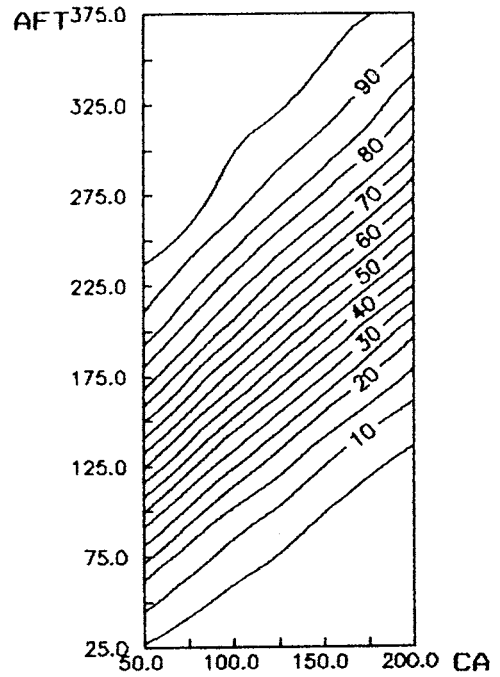
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 02/TH/JUN



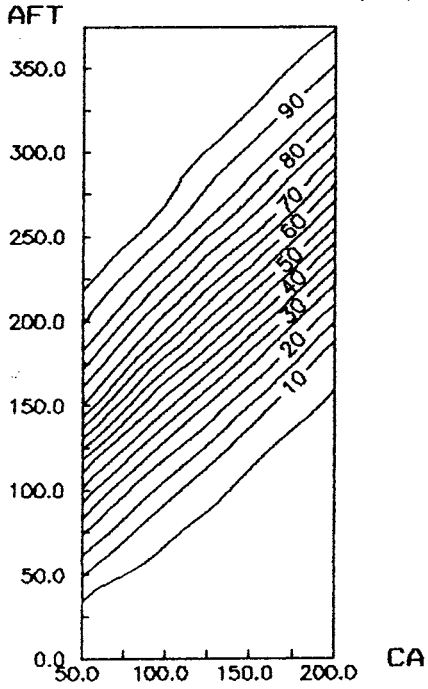
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 02/TH/JUL



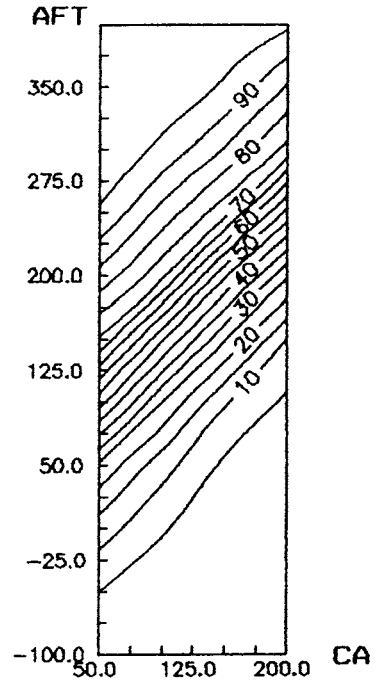
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 02/TH/AGO



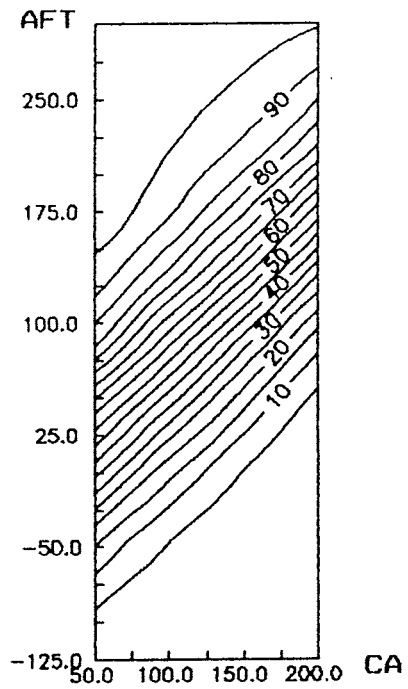
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 02/TH/SET



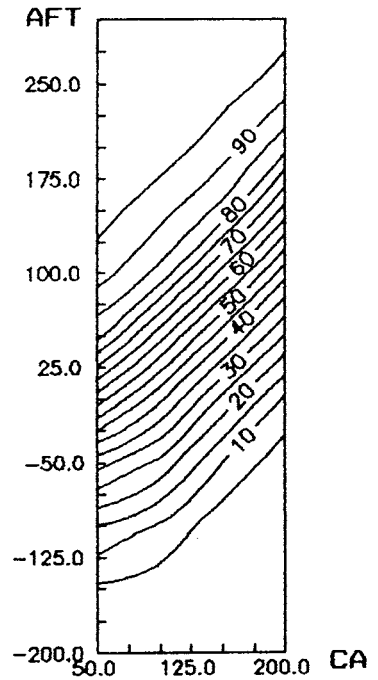
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 02/TH/OUT



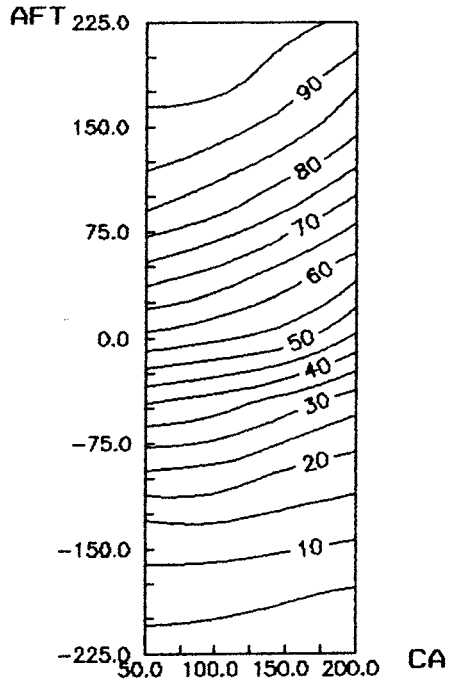
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 02/TH/NOV



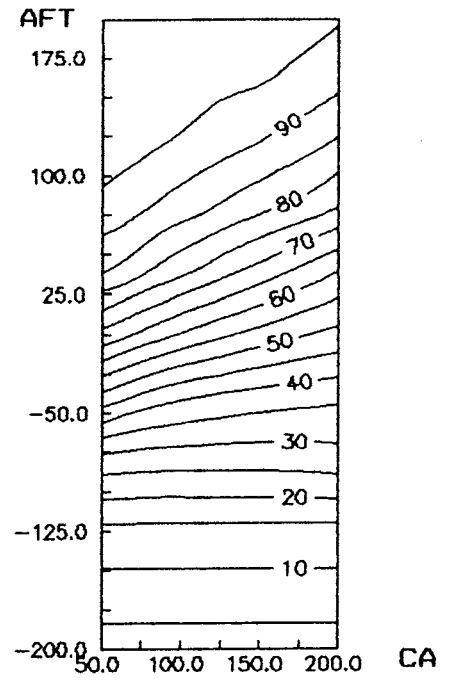
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 02/TH/DEZ



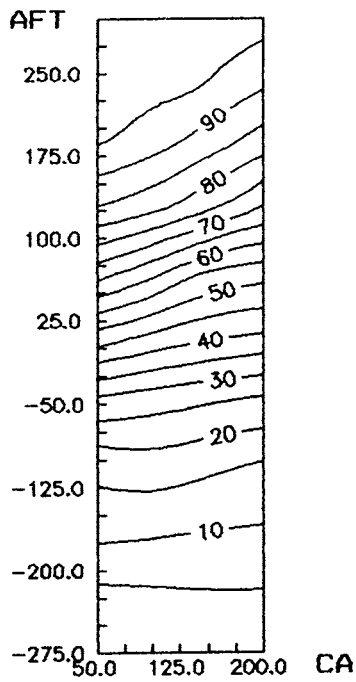
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 06/BC/JAN



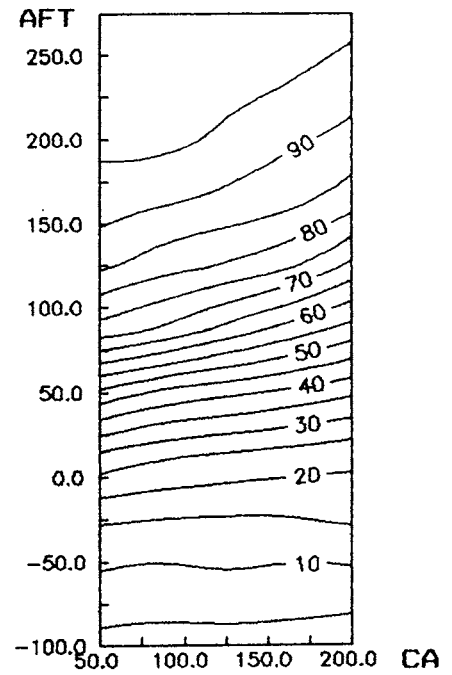
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 06/BC/FEV



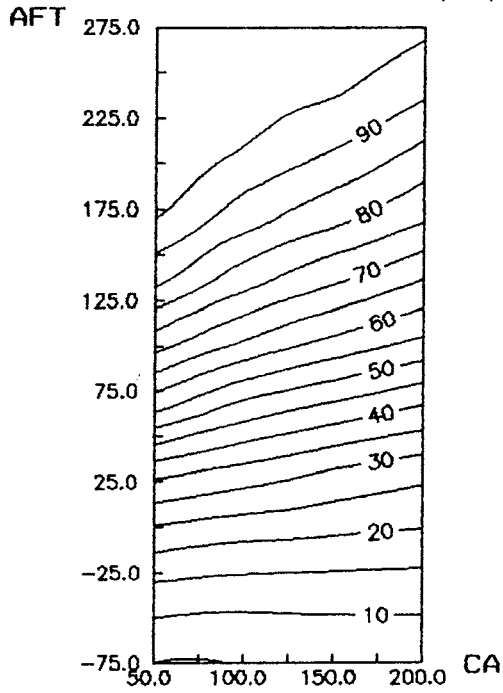
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 06/BC/MAR



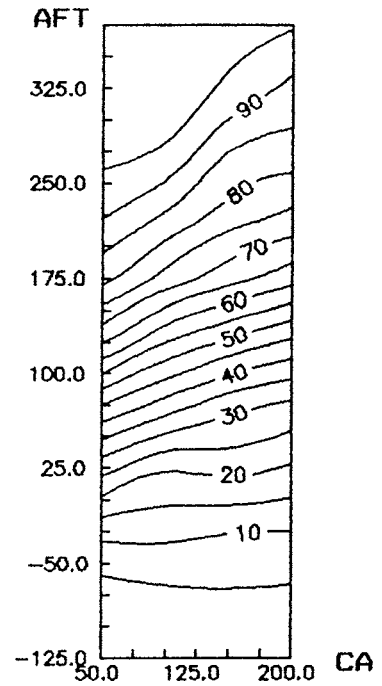
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 06/BC/ABR



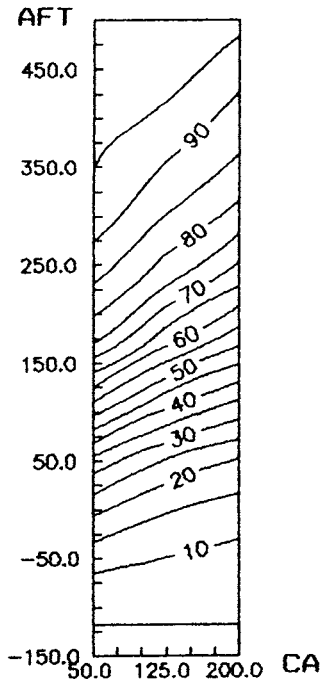
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 06/BC/MAI



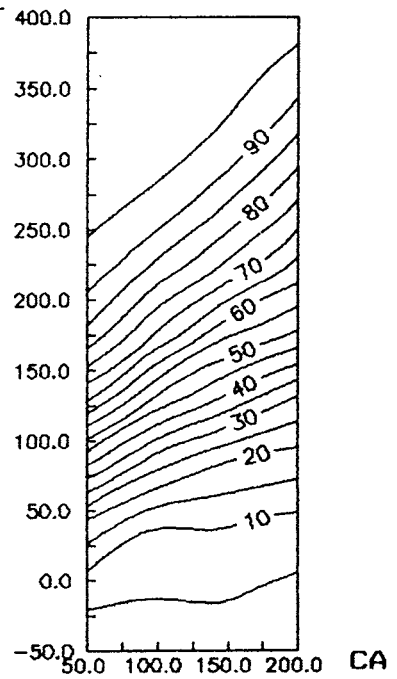
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 06/BC/JUN



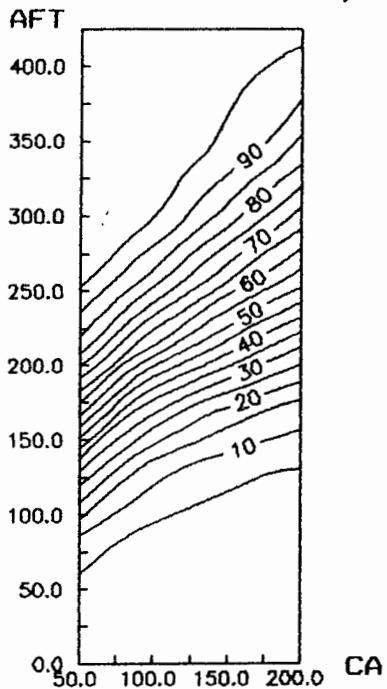
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 06/BC/JUL



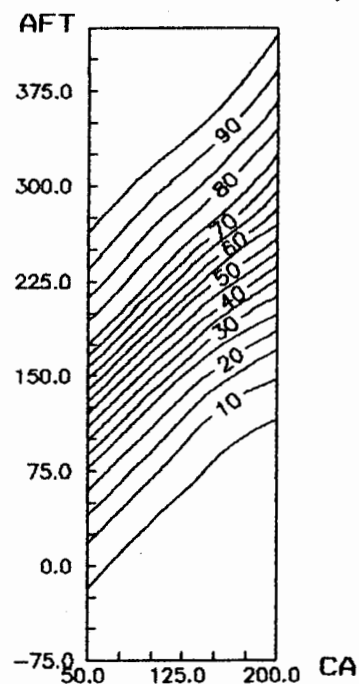
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 06/BC/AGO



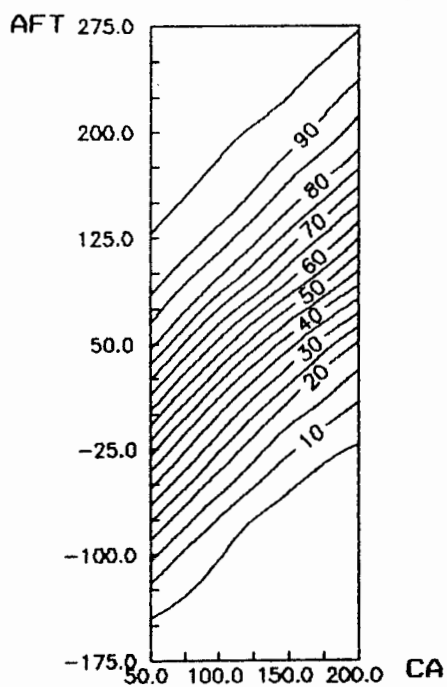
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 06/BC/SET



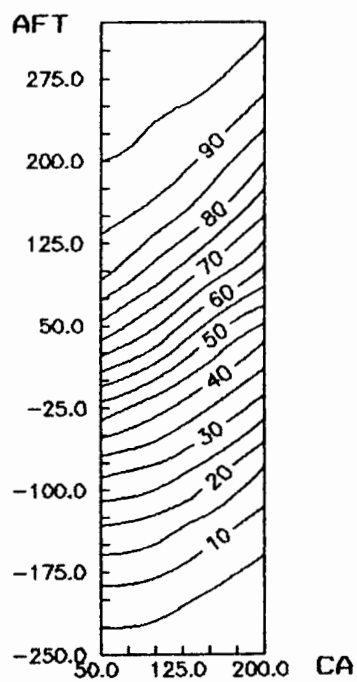
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 06/BC/OUT



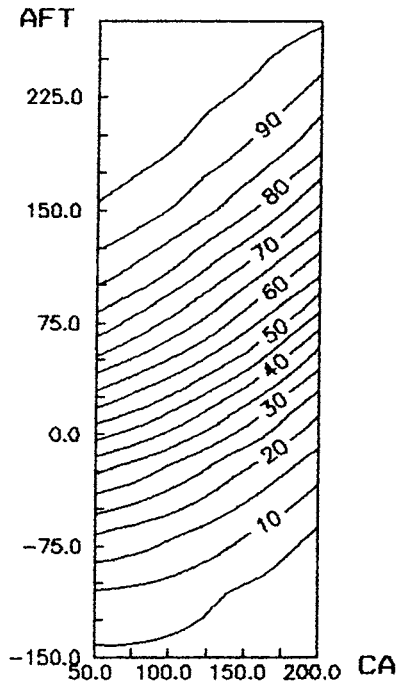
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 06/BC/NOV



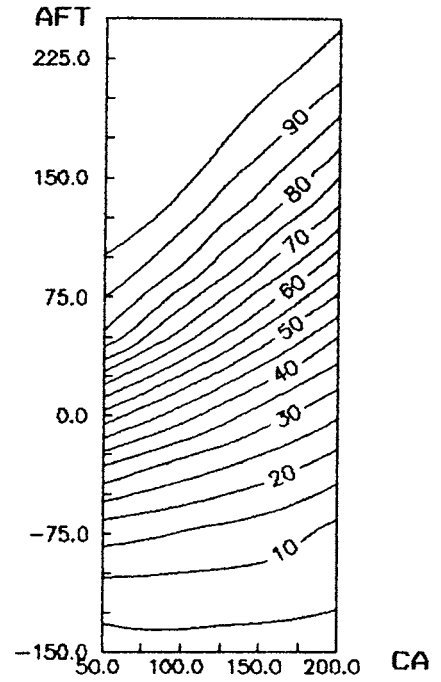
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 06/BC/DEZ



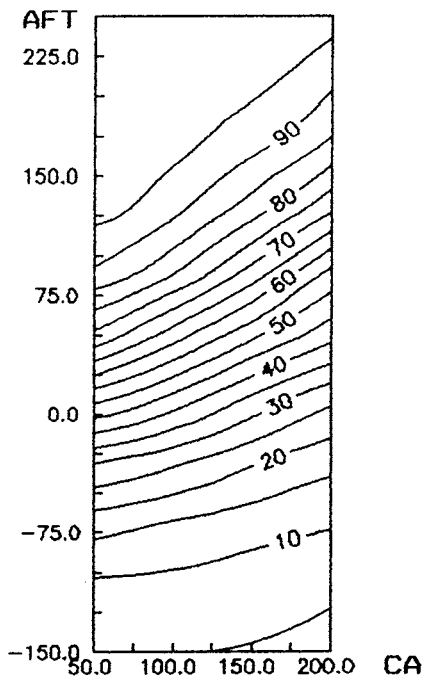
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 07/TH/JAN



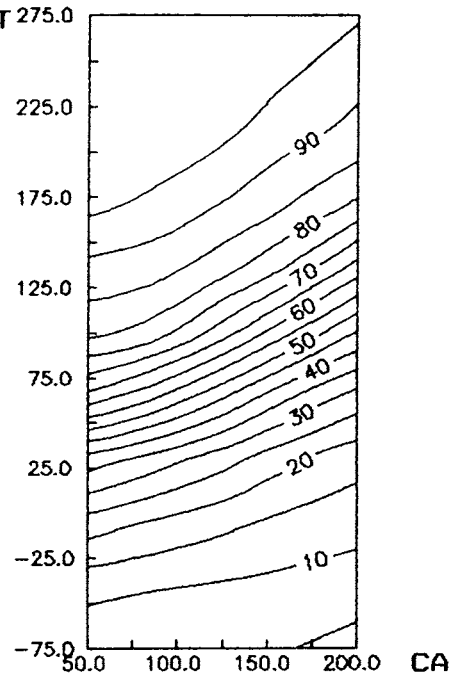
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 07/TH/FEV



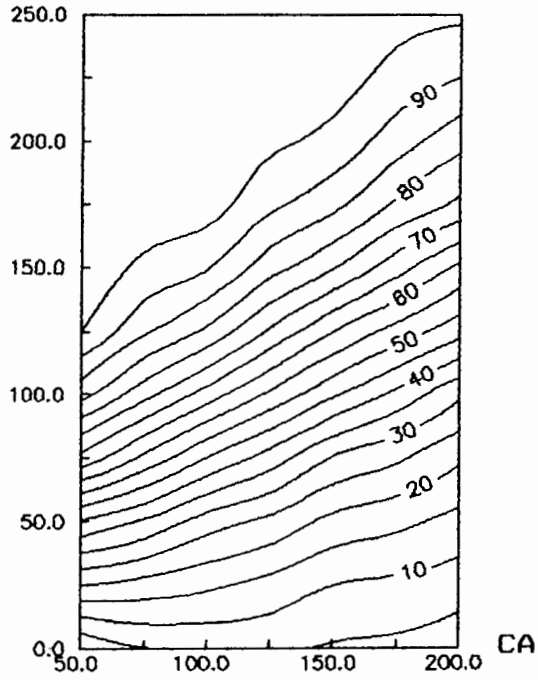
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 07/TH/MAR



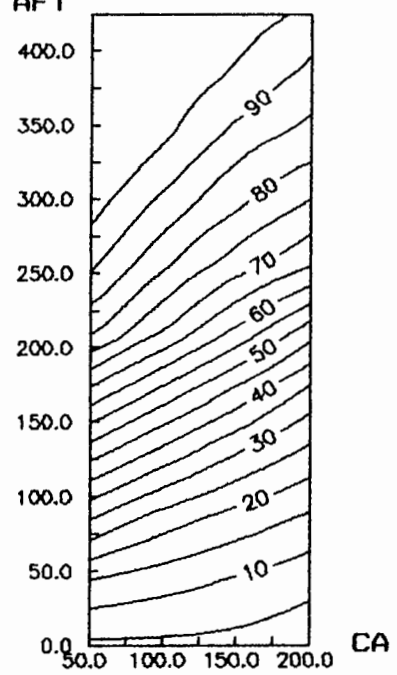
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 07/TH/ABR



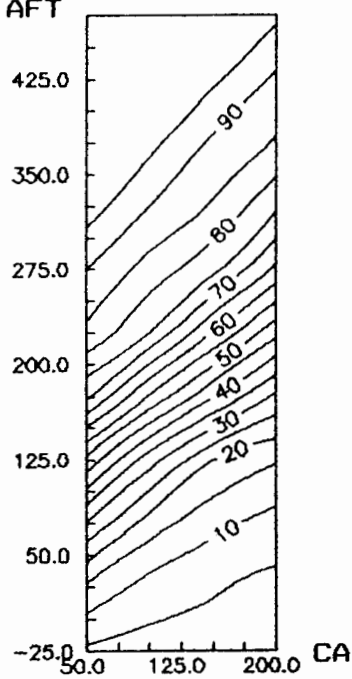
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 07/TH/MAI



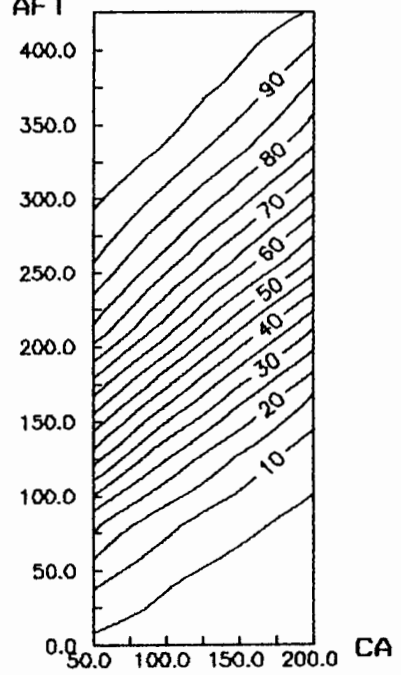
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 07/TH/JUN



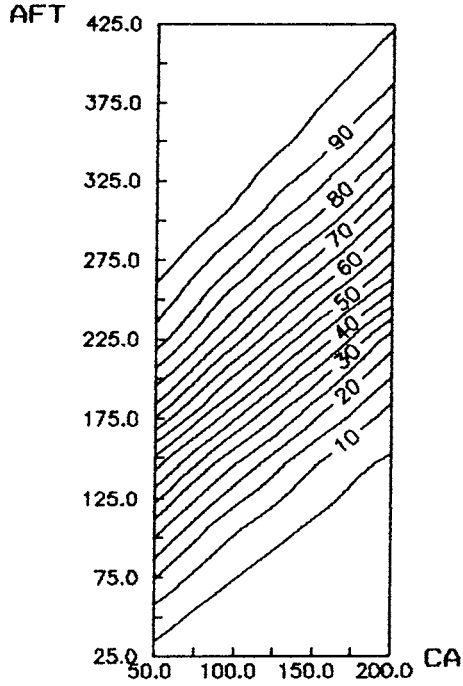
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 07/TH/JUL



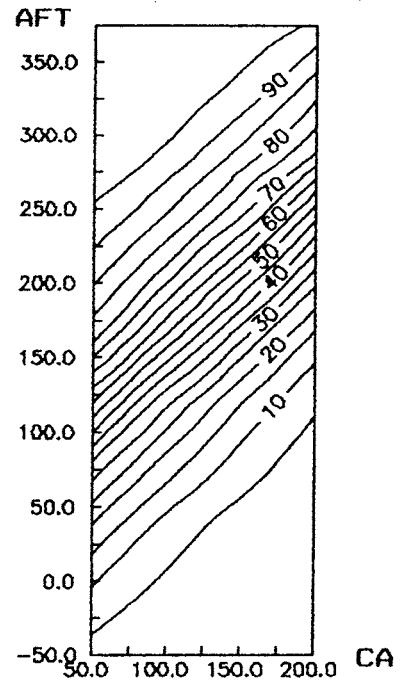
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 07/TH/AGO



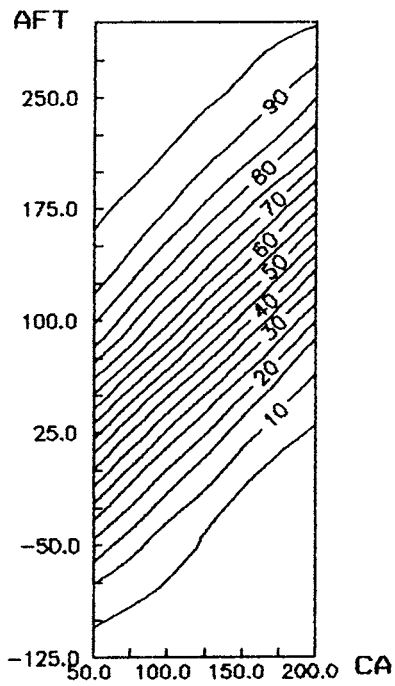
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 07/TH/SET



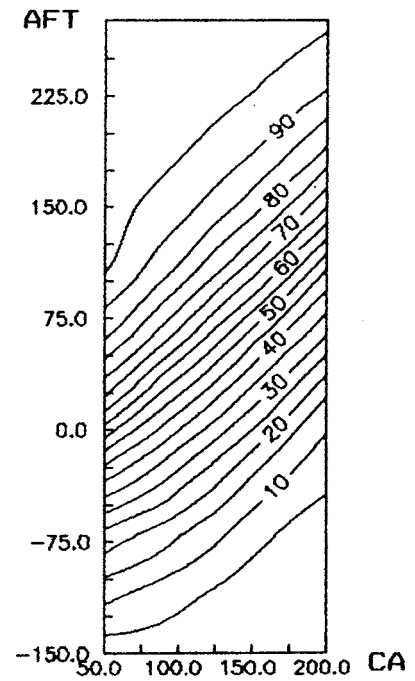
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 07/TH/OUT



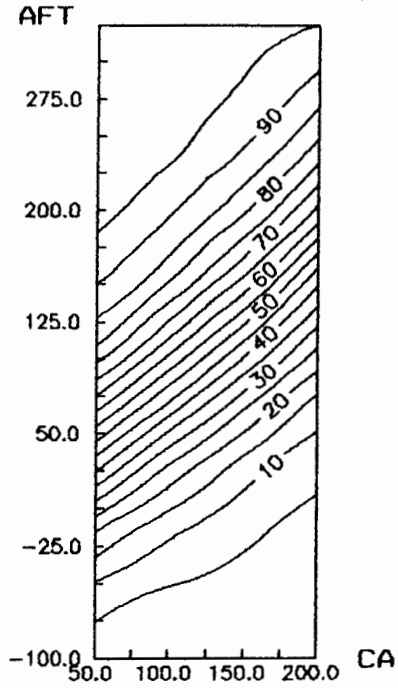
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 07/TH/NOV



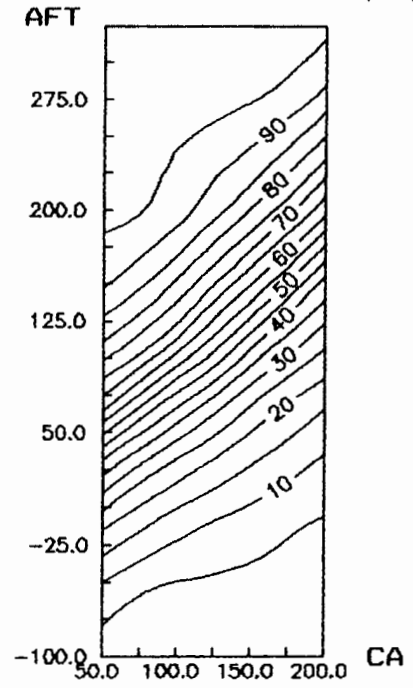
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 07/TH/DEZ



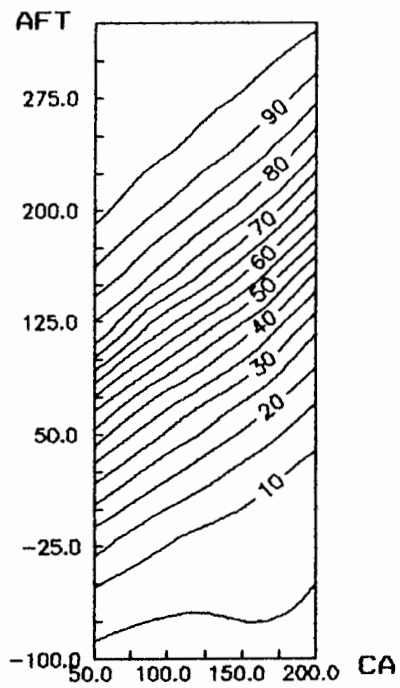
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/TH/JAN



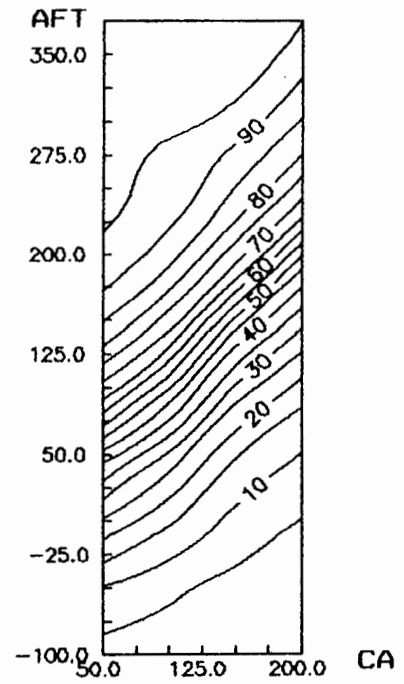
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/TH/FEV



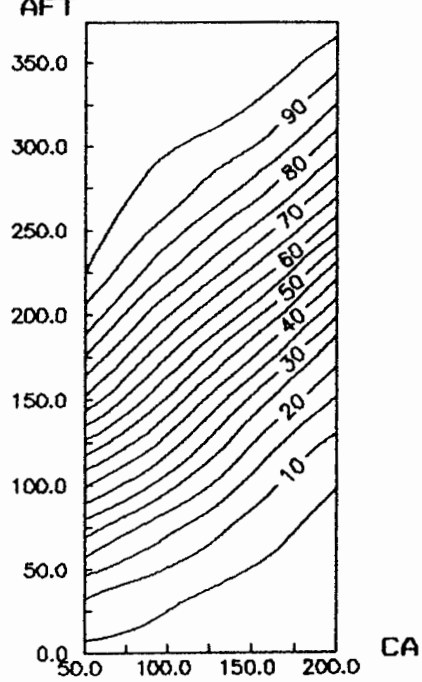
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/TH/MAR



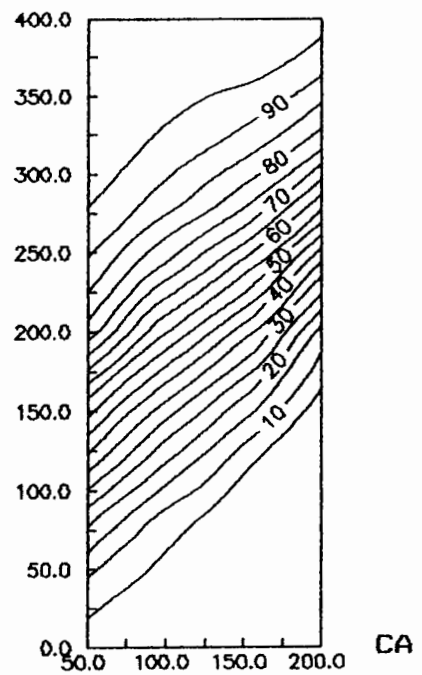
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/TH/ABR



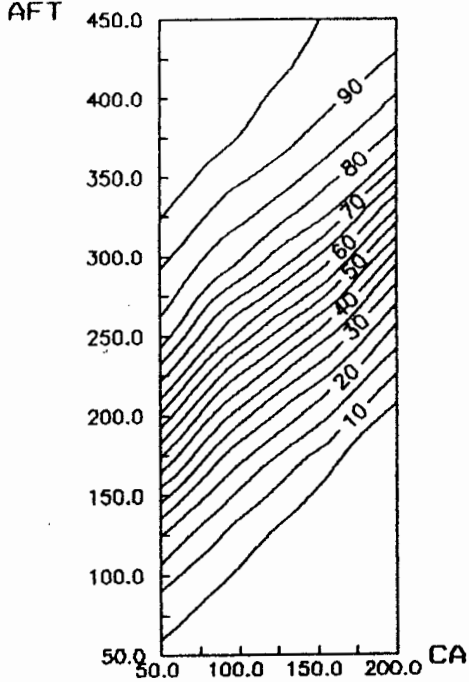
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/TH/MAI



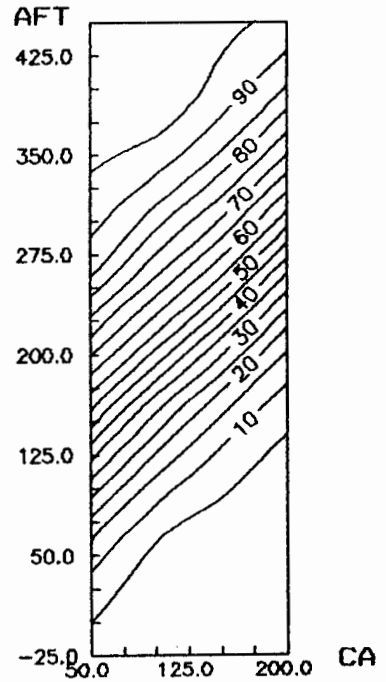
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/TH/JUN



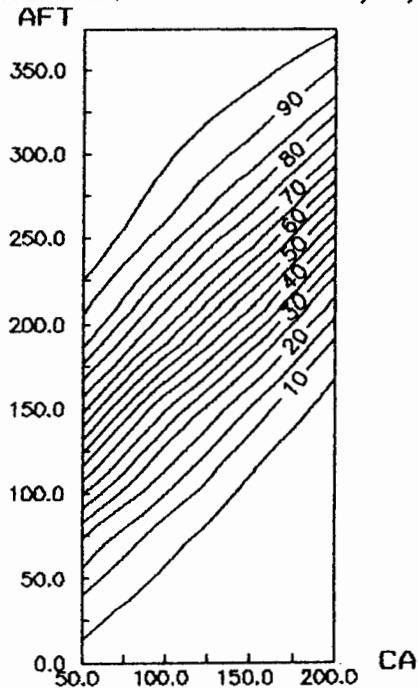
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/TH/JUL



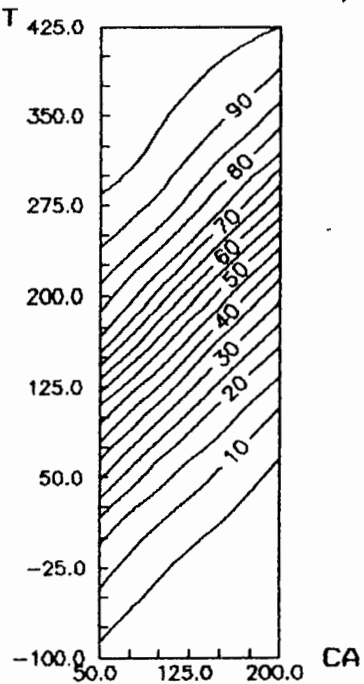
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/TH/AGO



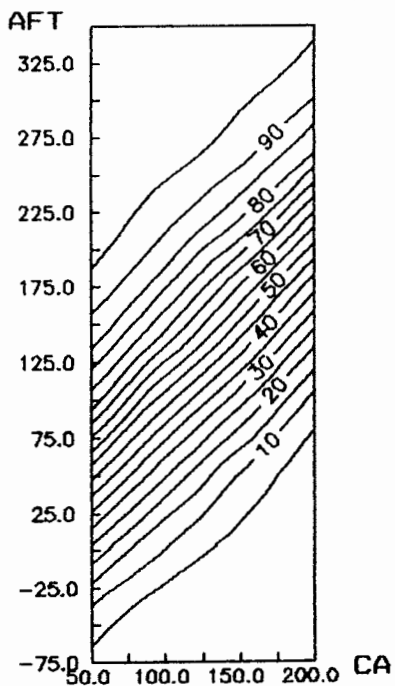
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/TH/SET



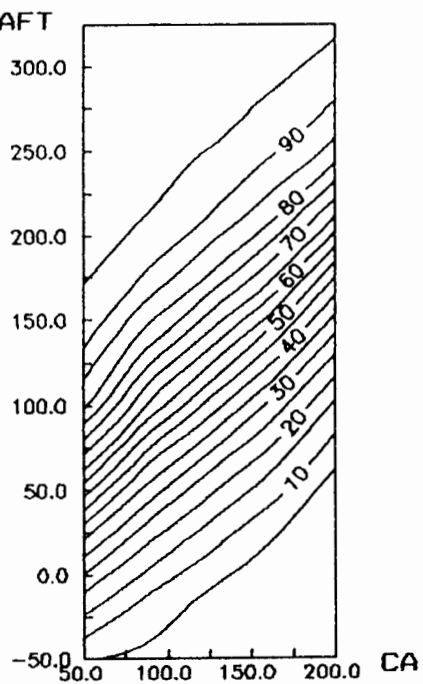
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/TH/OUT



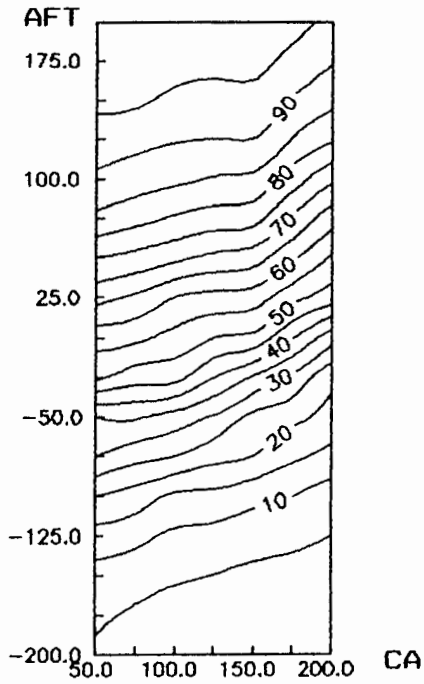
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/TH/NOV



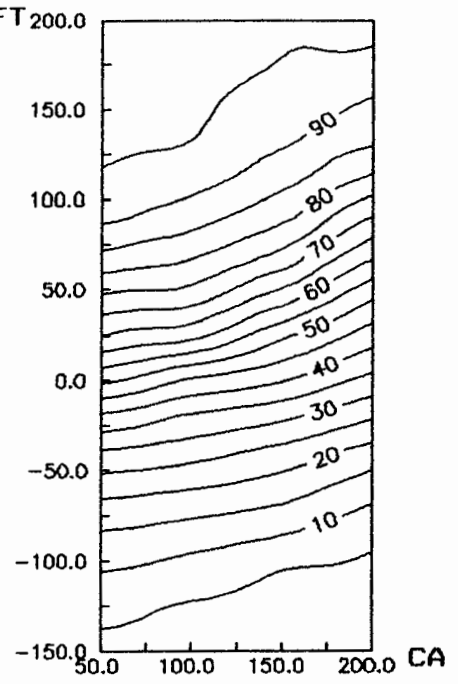
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/TH/DEZ



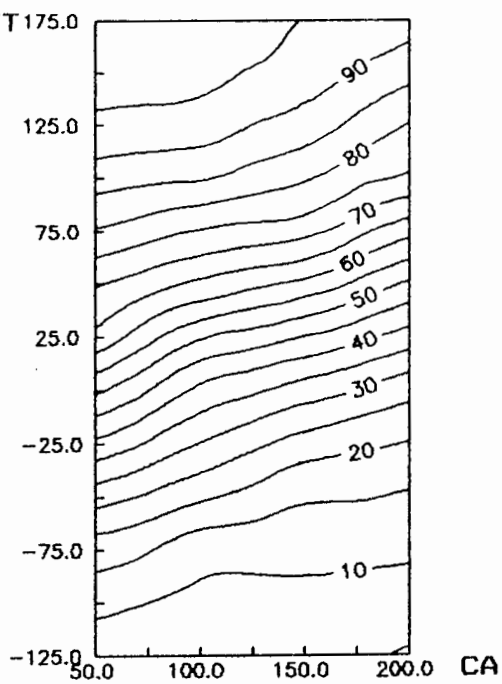
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/BC/JAN



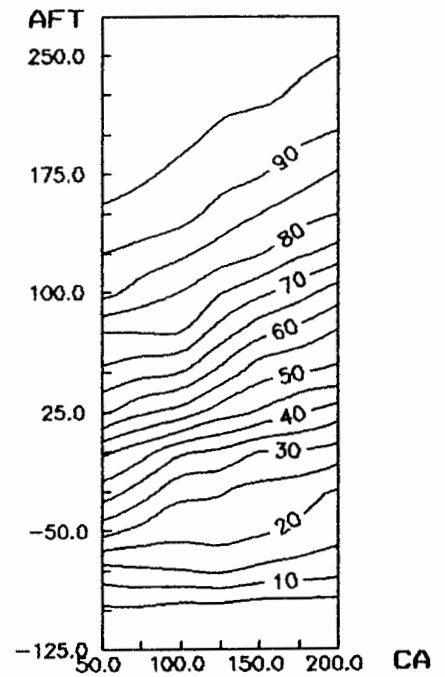
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/BC/FEV



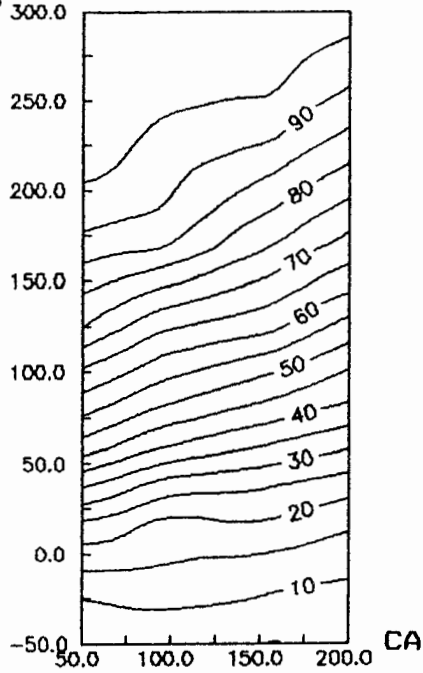
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/BC/MAR



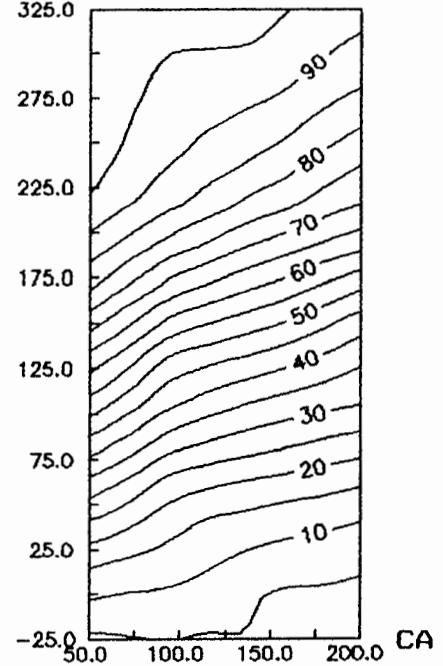
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/BC/ABR



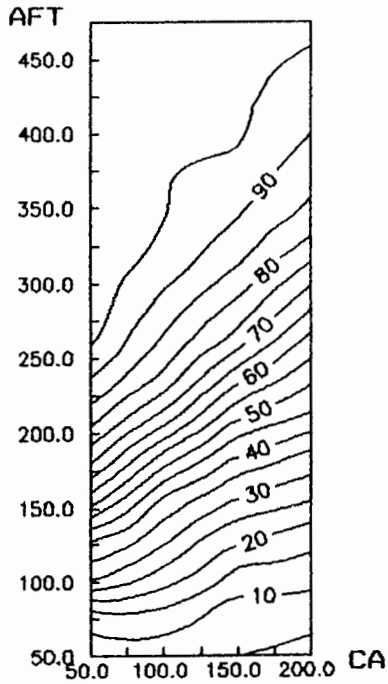
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/BC/MAI



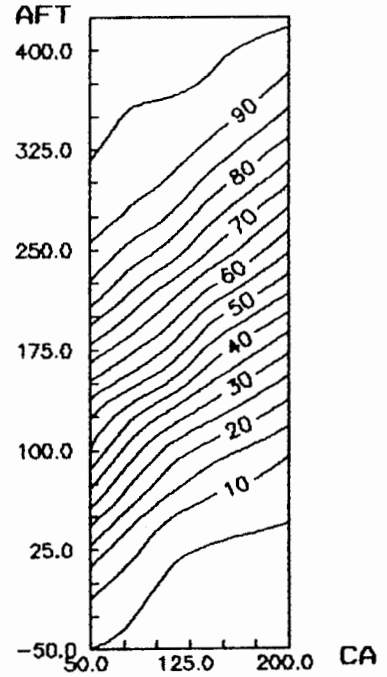
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/BC/JUN



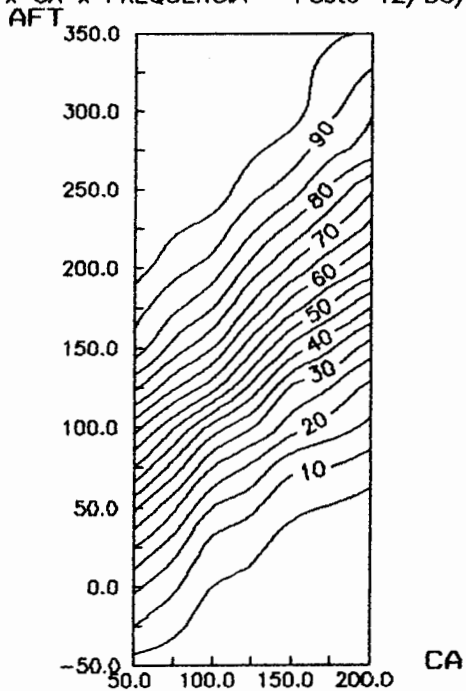
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/BC/JUL



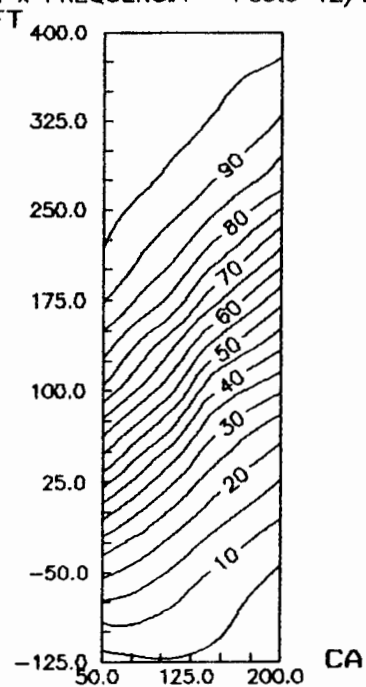
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/BC/AGO



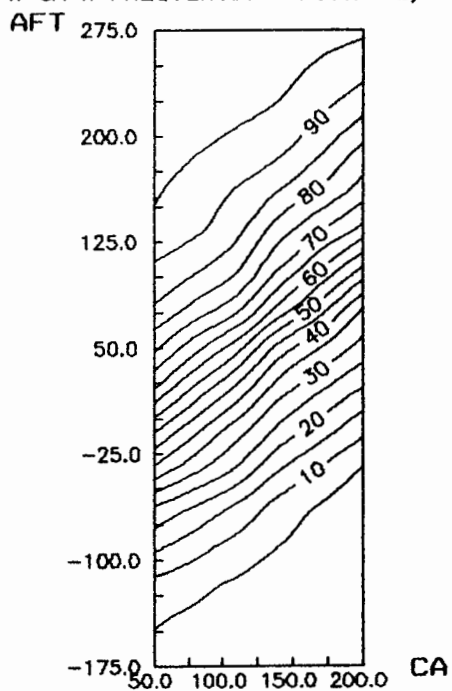
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/BC/SET



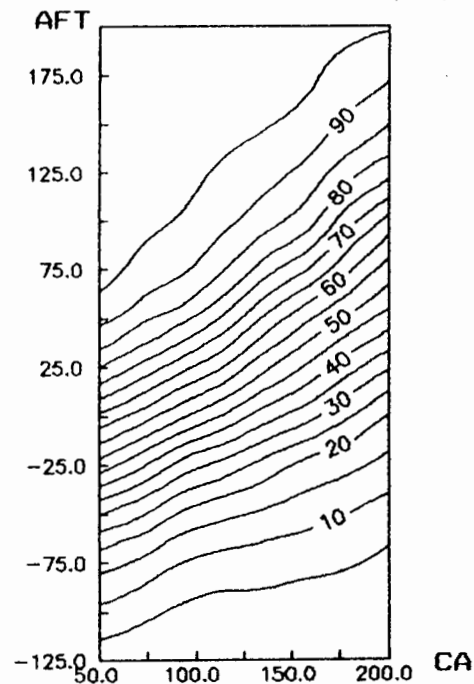
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/BC/OUT



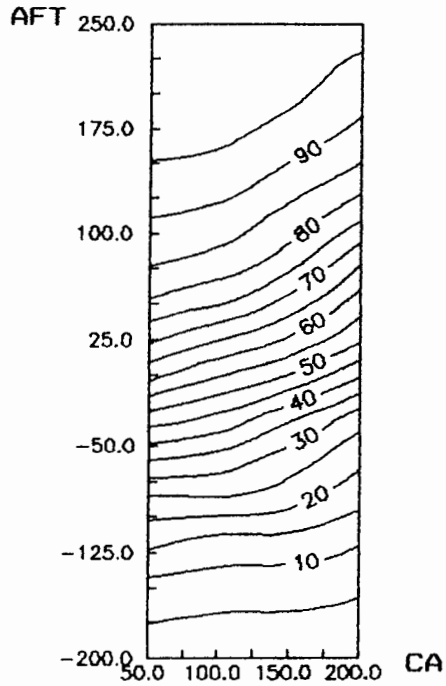
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/BC/NOV



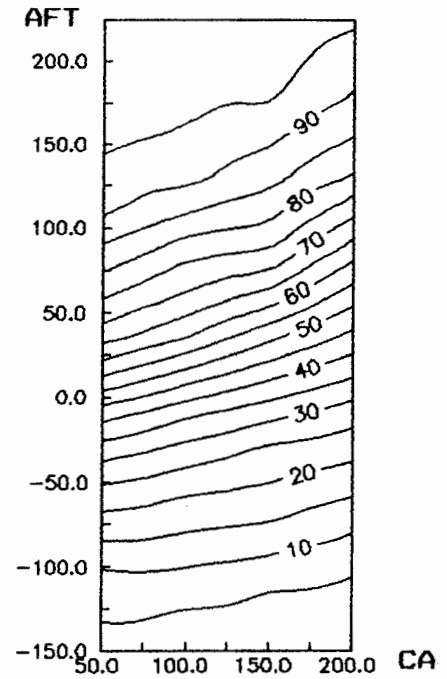
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/BC/DEZ



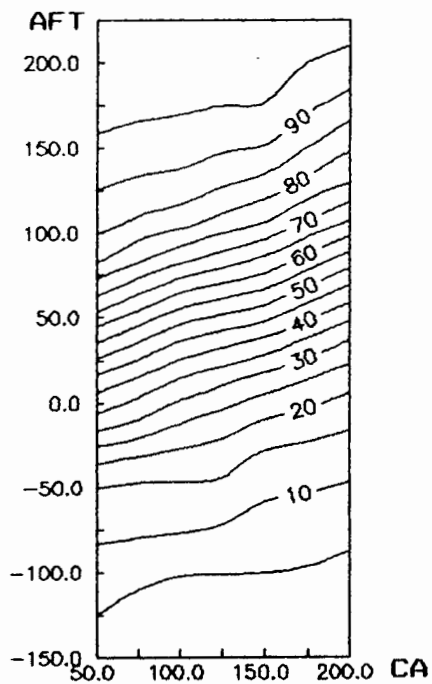
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/HS/JAN



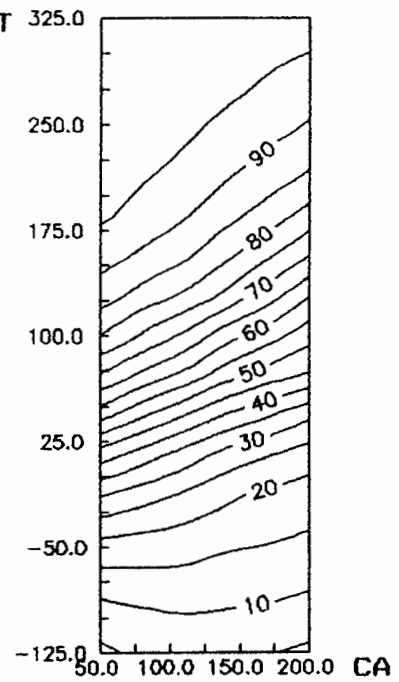
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/HS/FEV



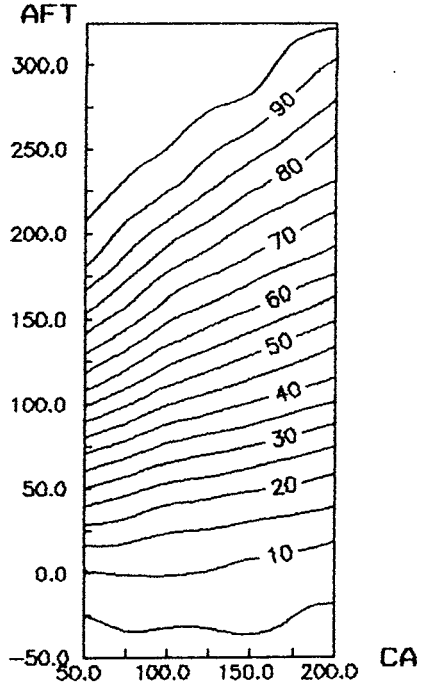
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/HS/MAR



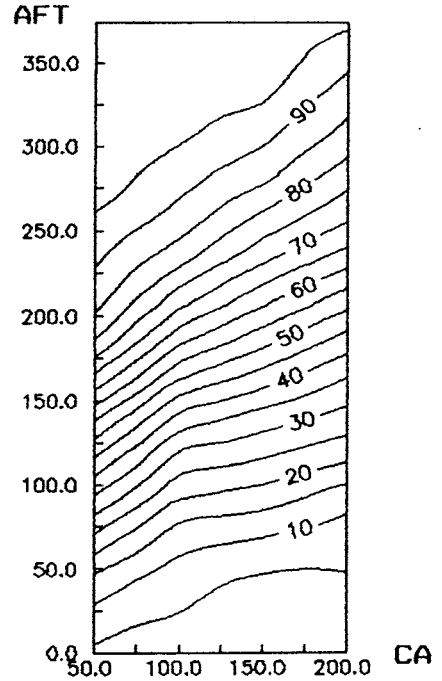
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/HS/ABR



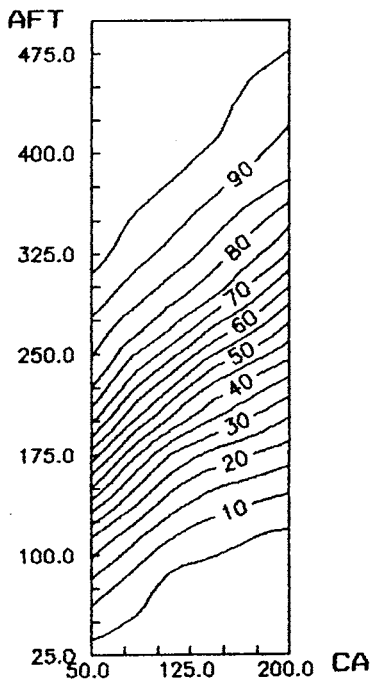
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/HS/MAI



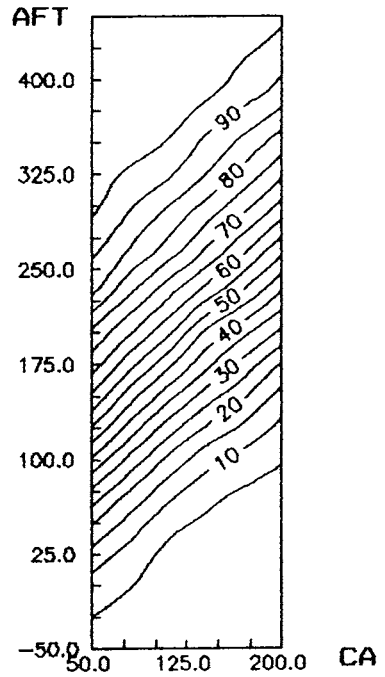
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/HS/JUN



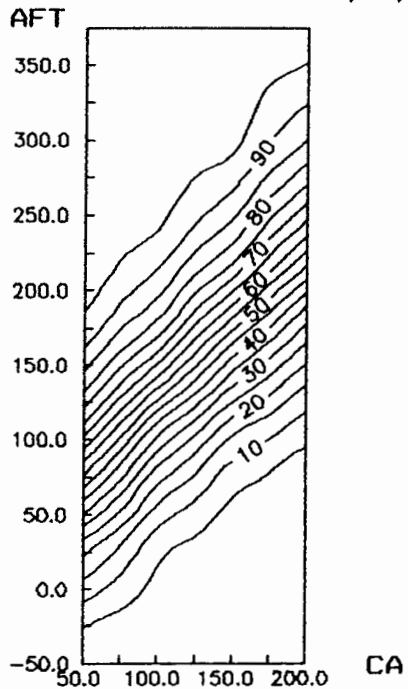
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/HS/JUL



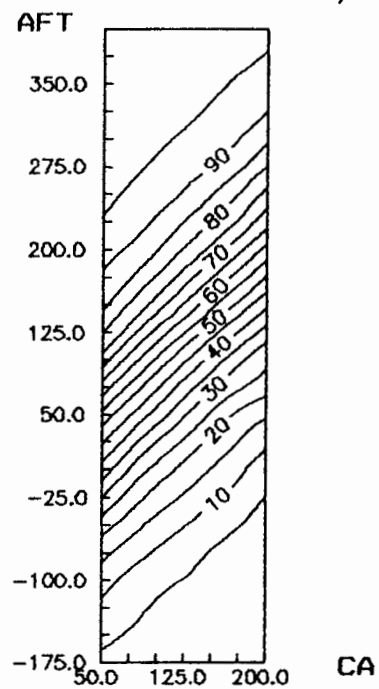
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/HS/AGO



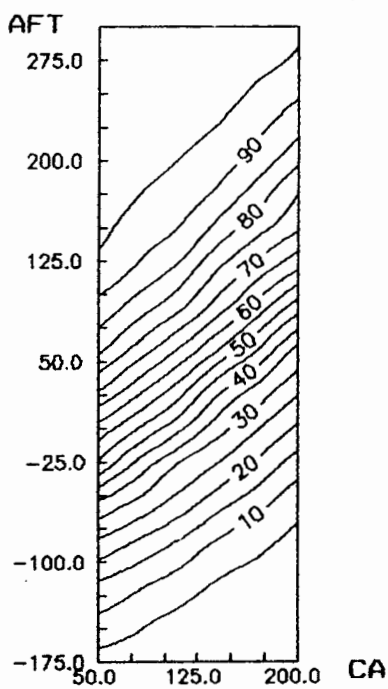
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/HS/SET



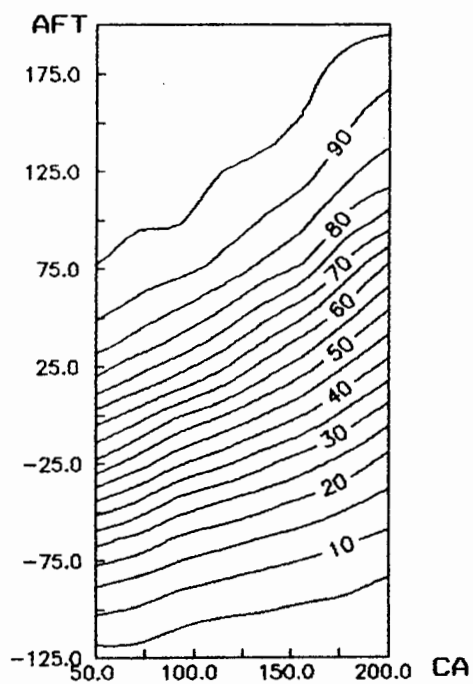
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/HS/OUT



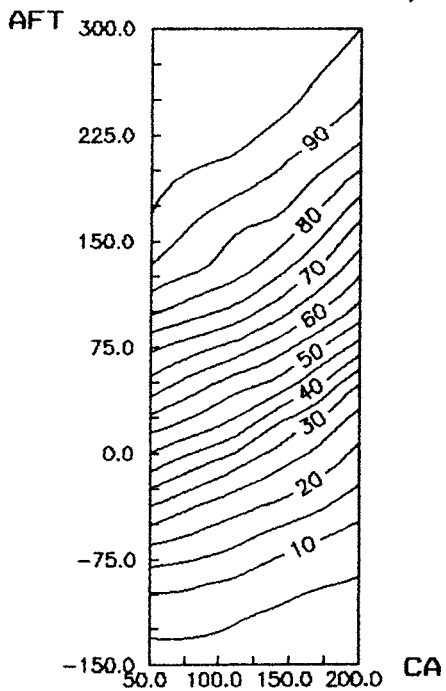
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/HS/NOV



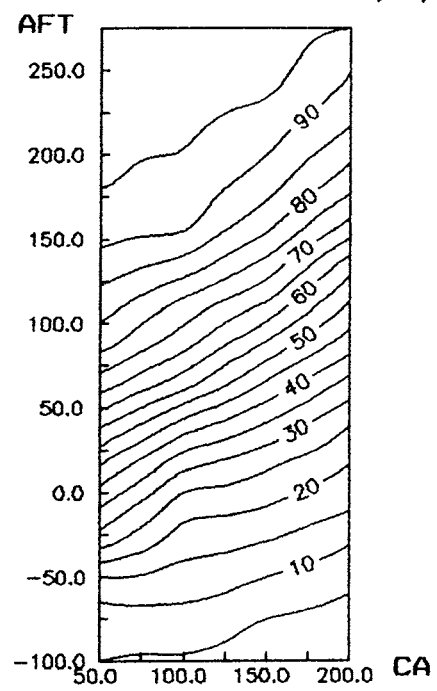
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/HS/DEZ



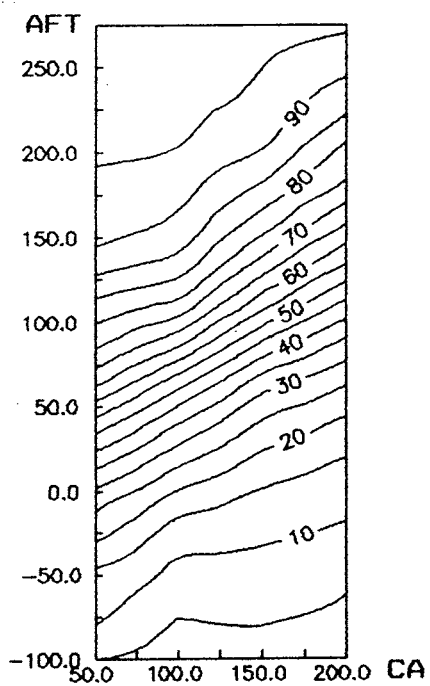
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/TC/JAN



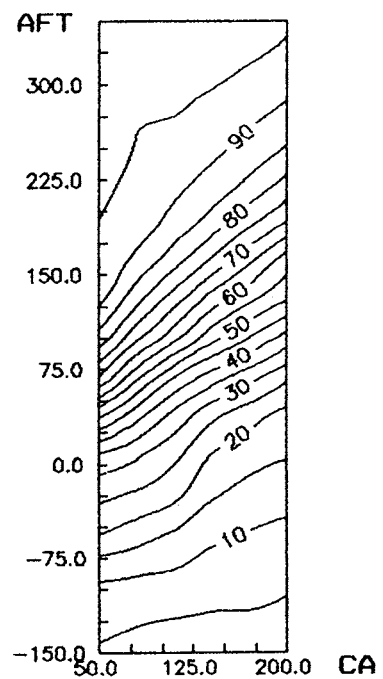
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/TC/FEV



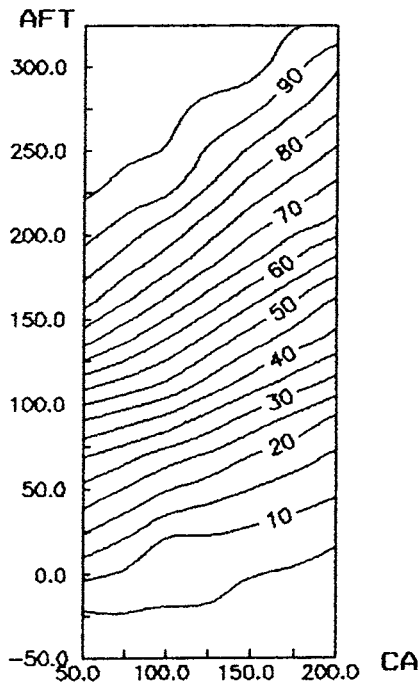
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/TC/MAR



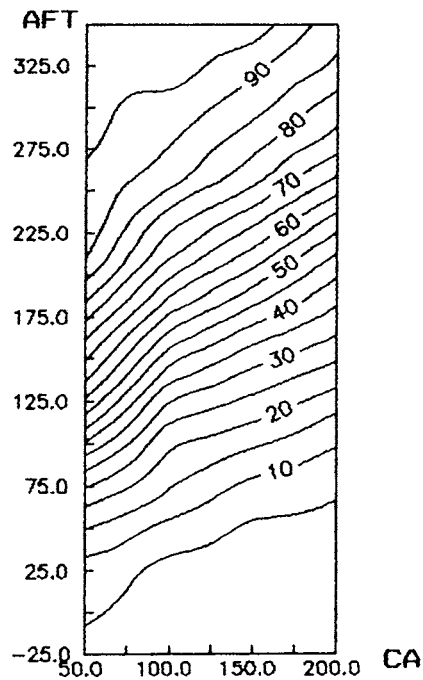
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/TC/ABR



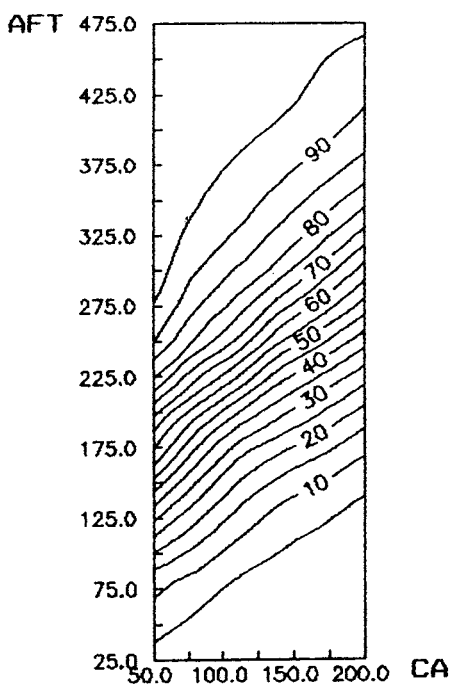
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/TC/MAI



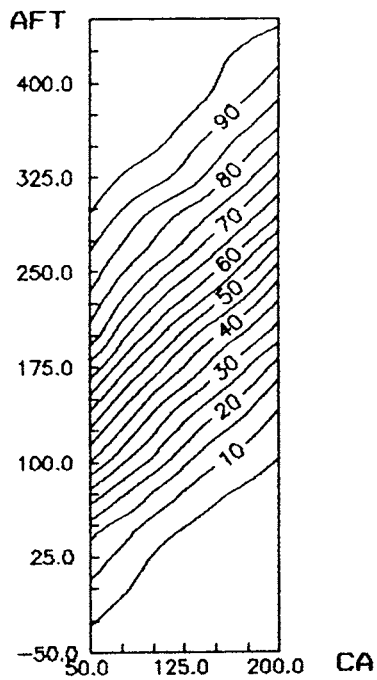
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/TC/JUN



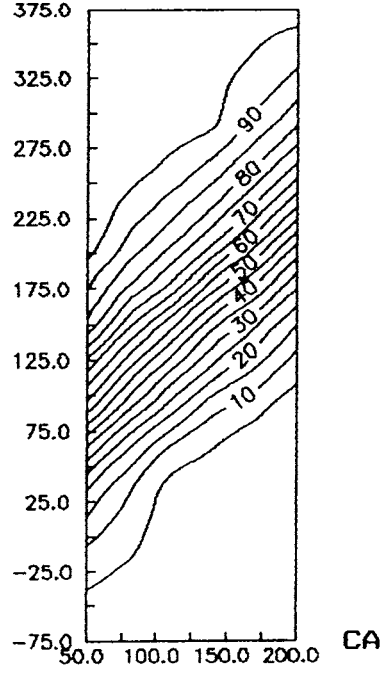
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/TC/JUL



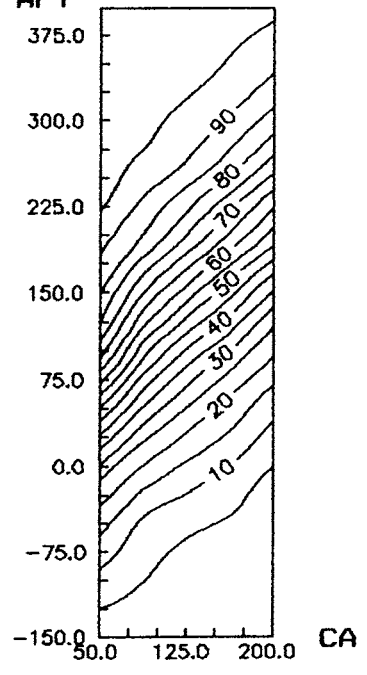
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/TC/AGO



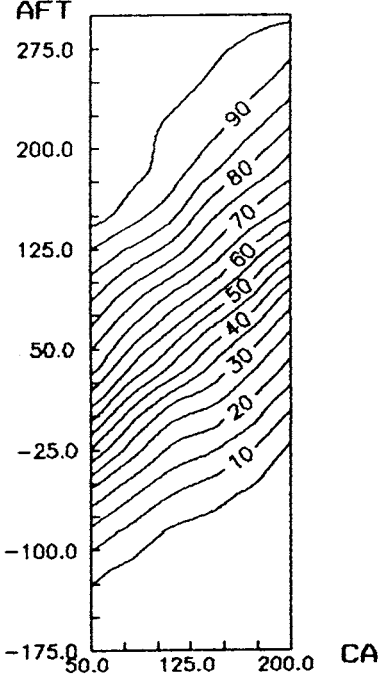
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/TC/SET



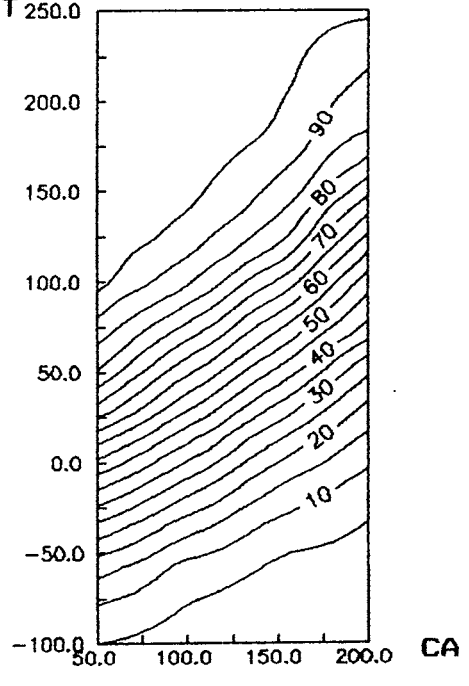
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/TC/OUT



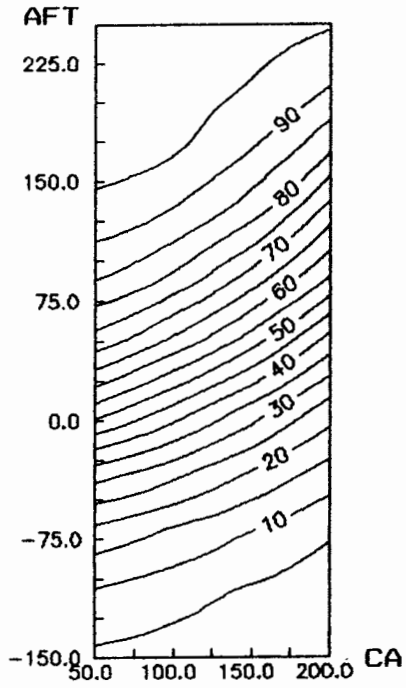
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/TC/NOV



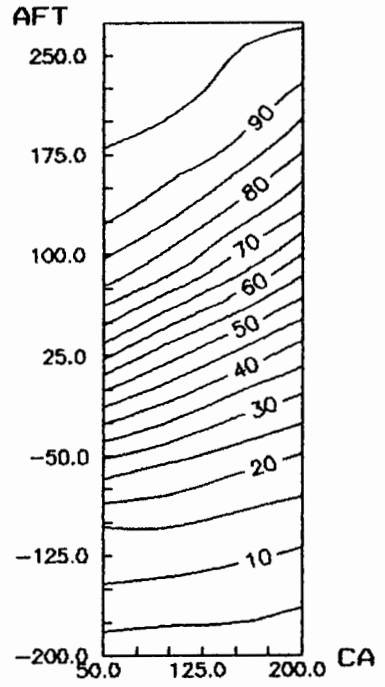
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 12/TC/DEZ



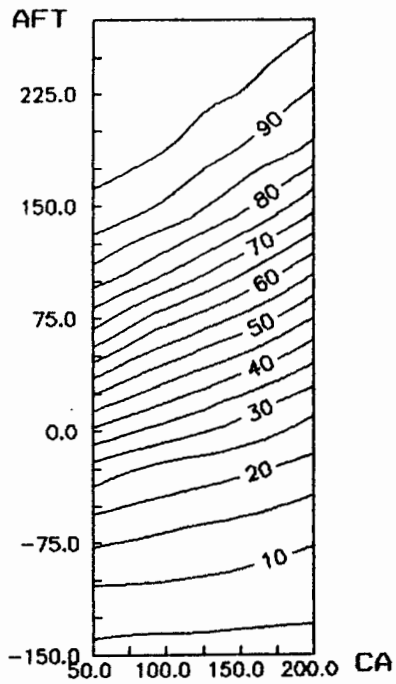
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 13/BC/JAN



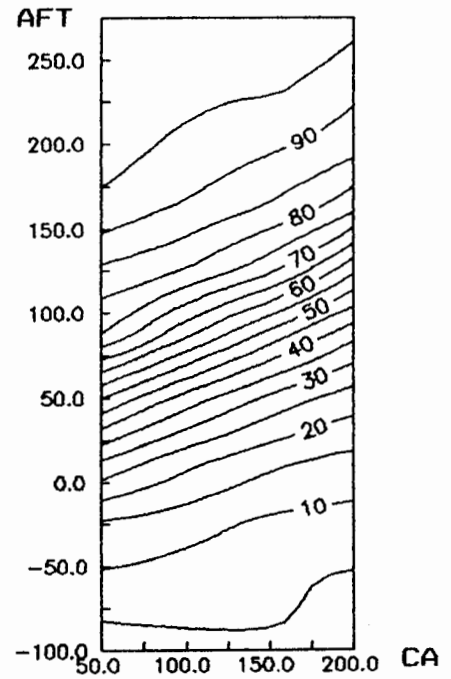
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 13/BC/FEV



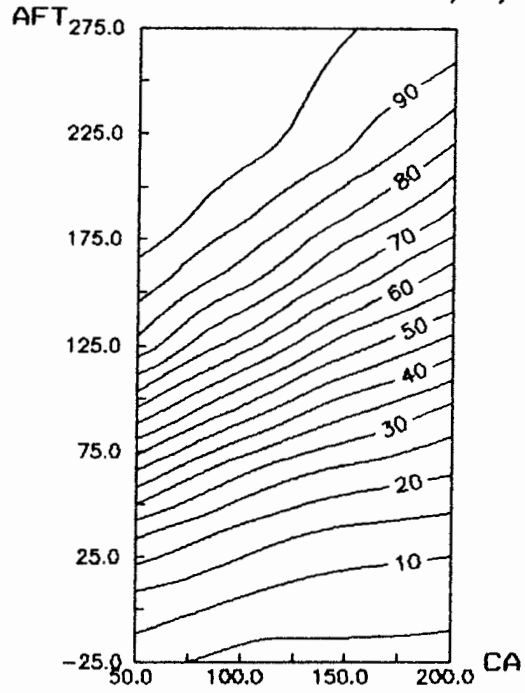
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 13/BC/MAR



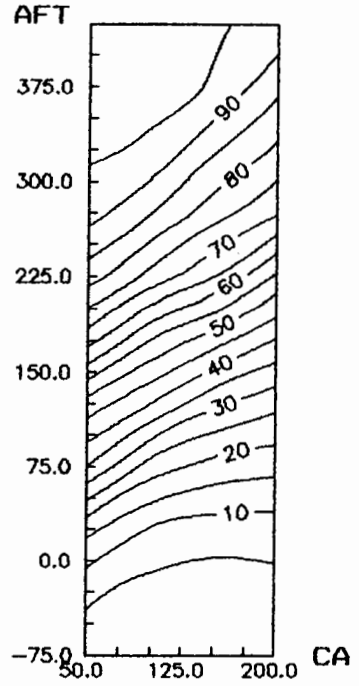
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 13/BC/ABR



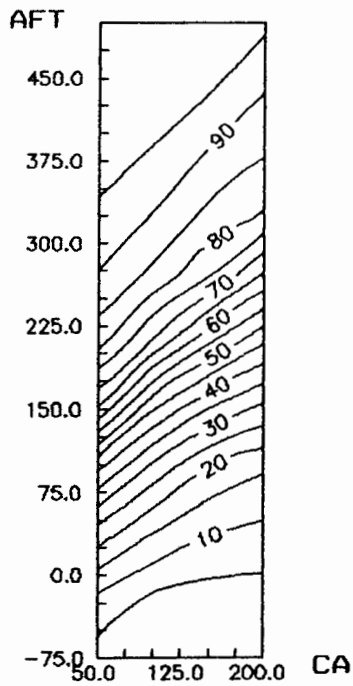
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 13/BC/MAI



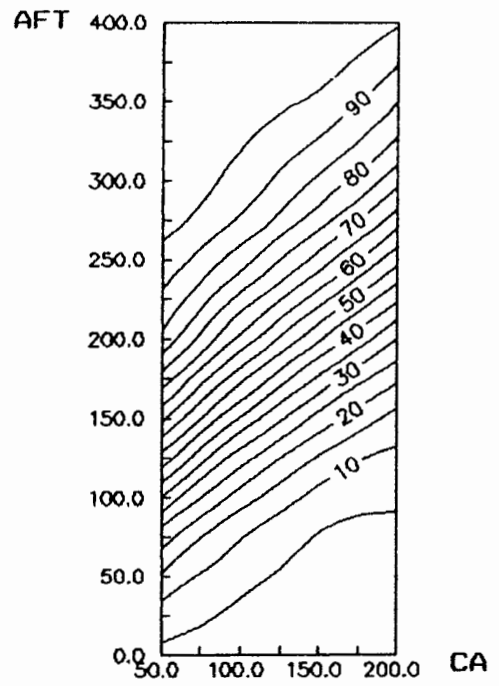
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 13/BC/JUN



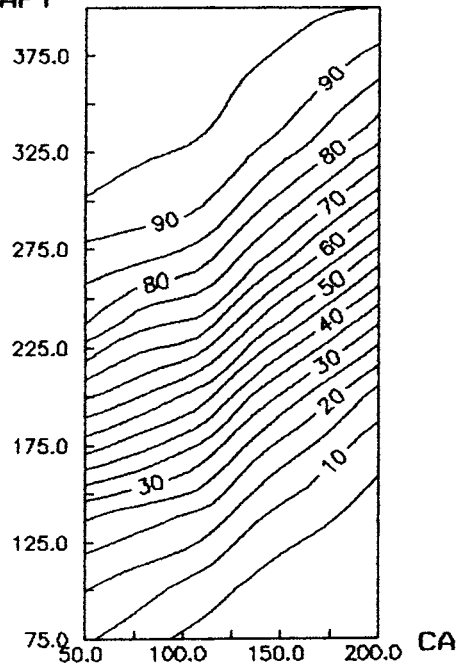
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 13/BC/JUL



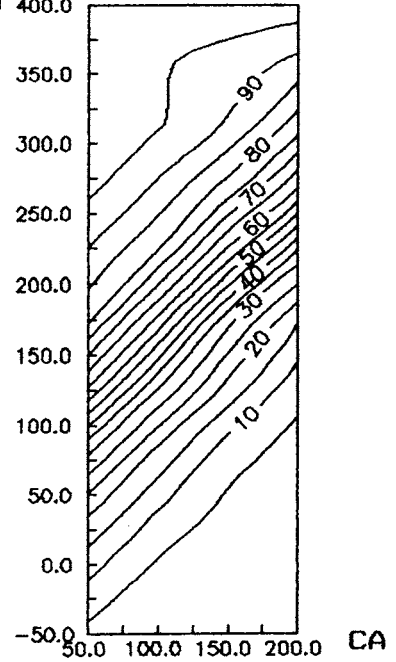
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 13/BC/AGO



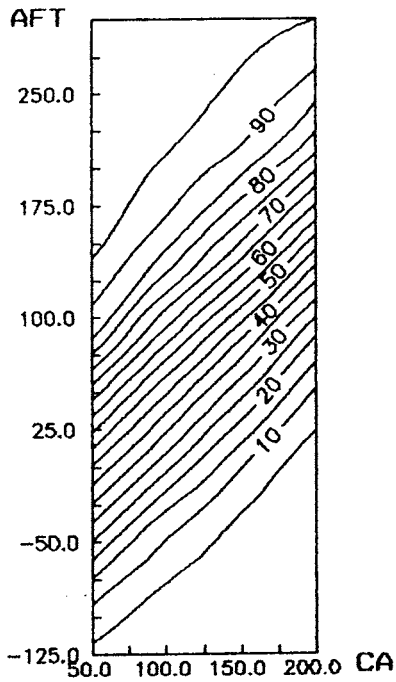
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 13/BC/SET



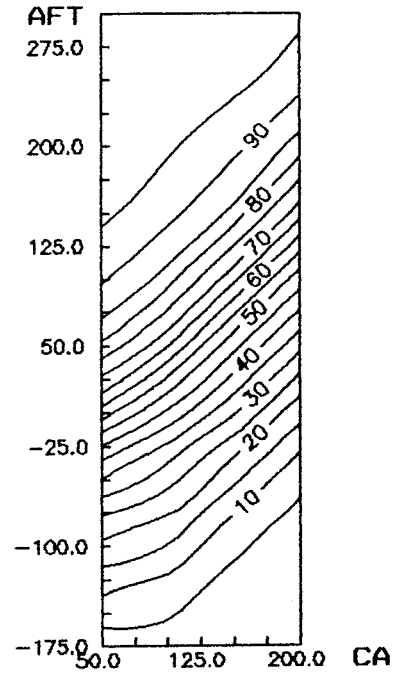
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 13/BC/OUT



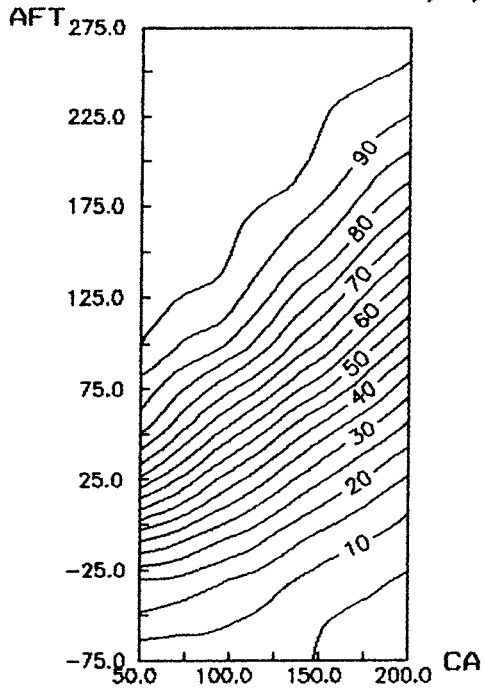
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 13/BC/NOV



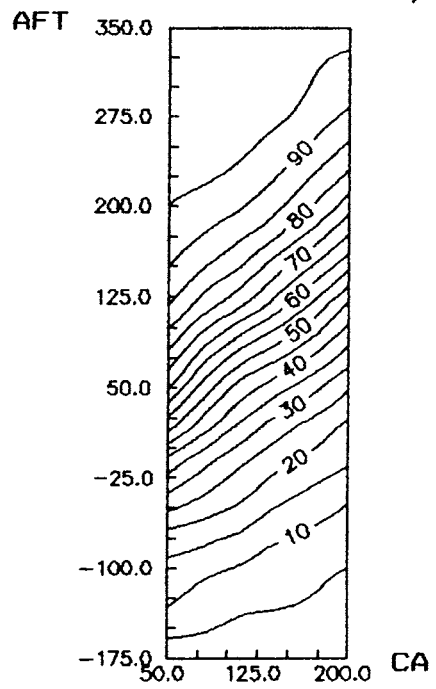
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 13/BC/DEZ



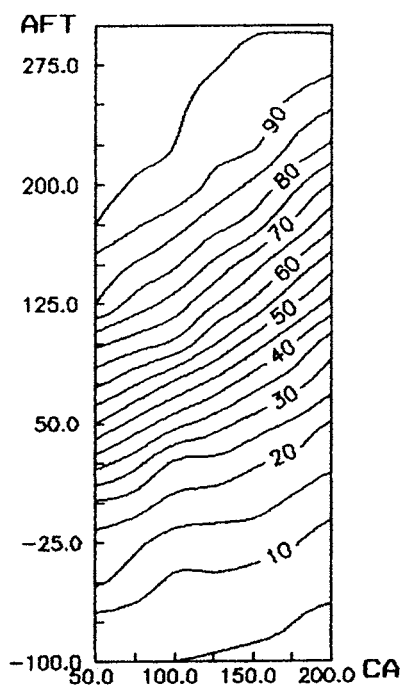
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/TH/JAN



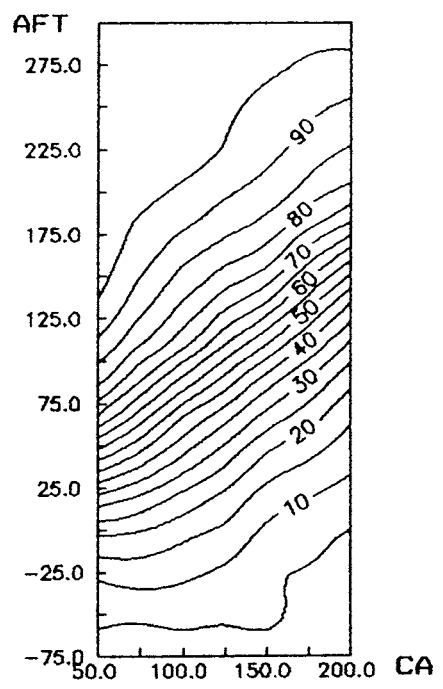
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/TH/FEV



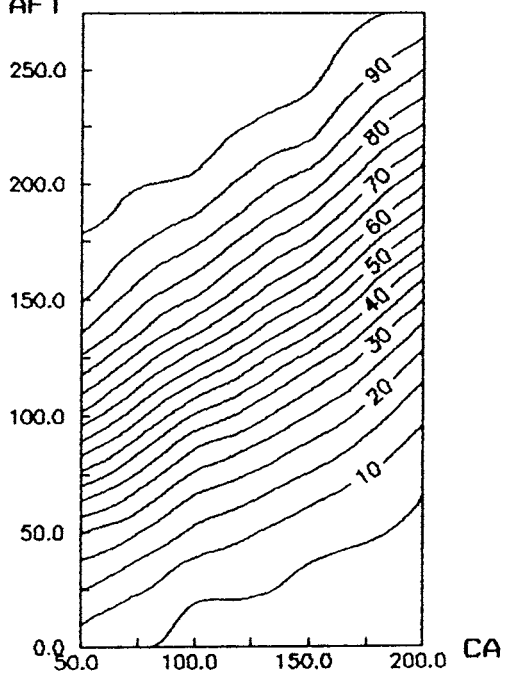
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/TH/MAR



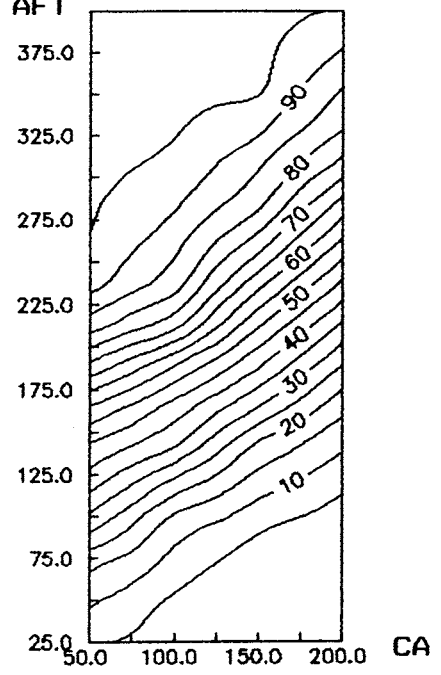
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/TH/ABR



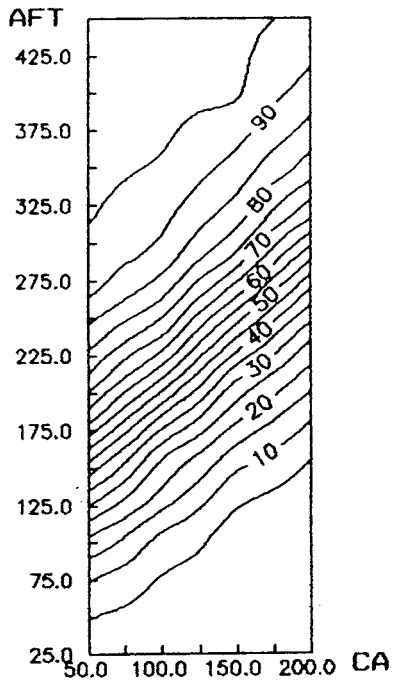
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/TH/MAI



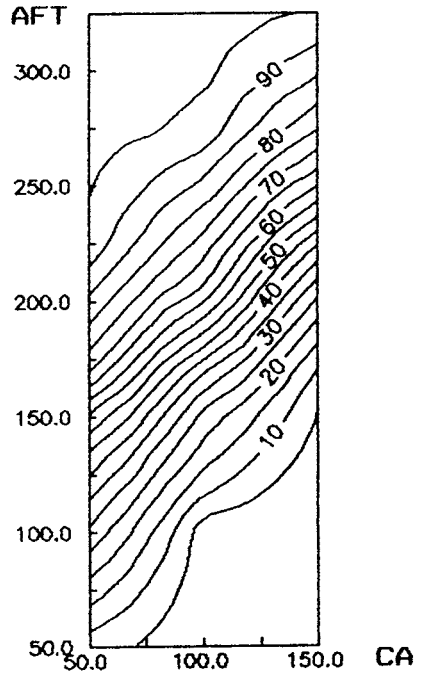
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/TH/JUN



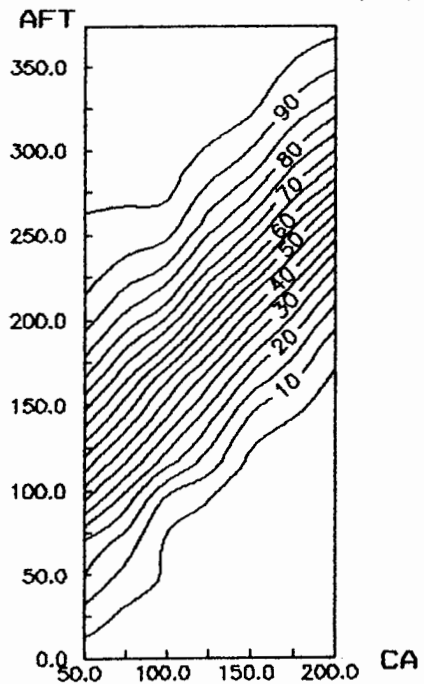
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/TH/JUL



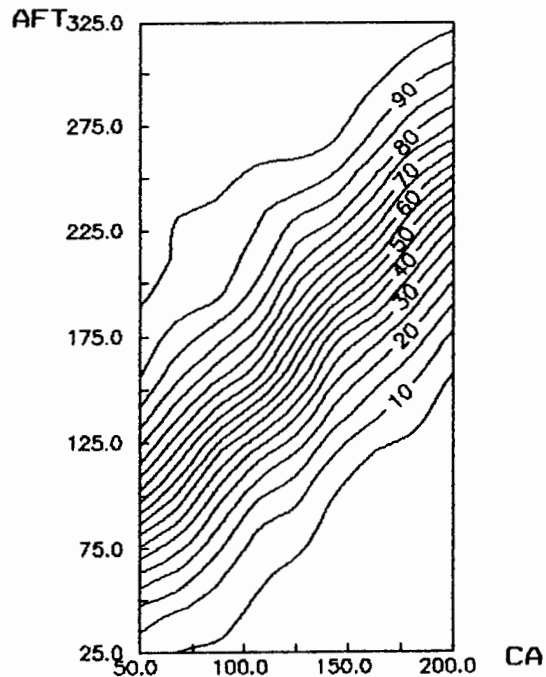
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/TH/AGO



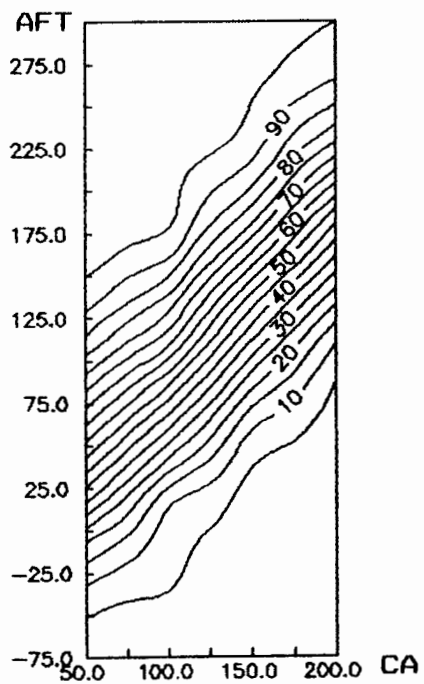
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/TH/SET



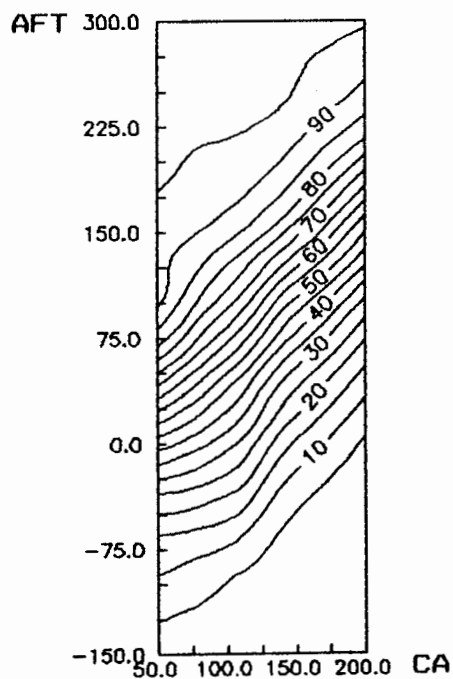
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/TH/OUT



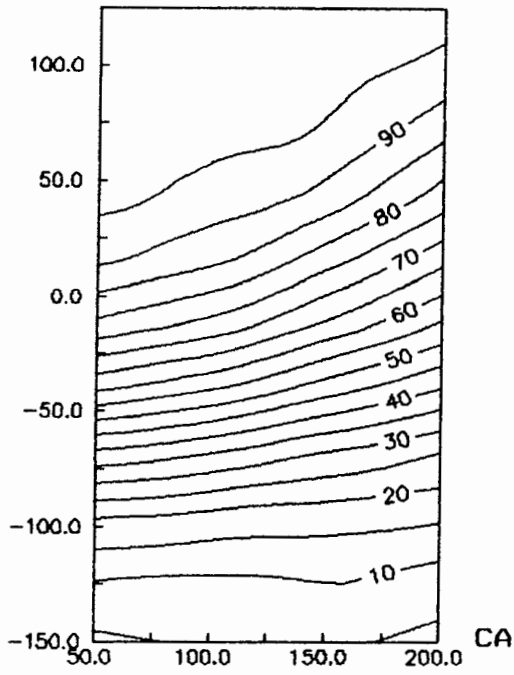
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/TH/NOV



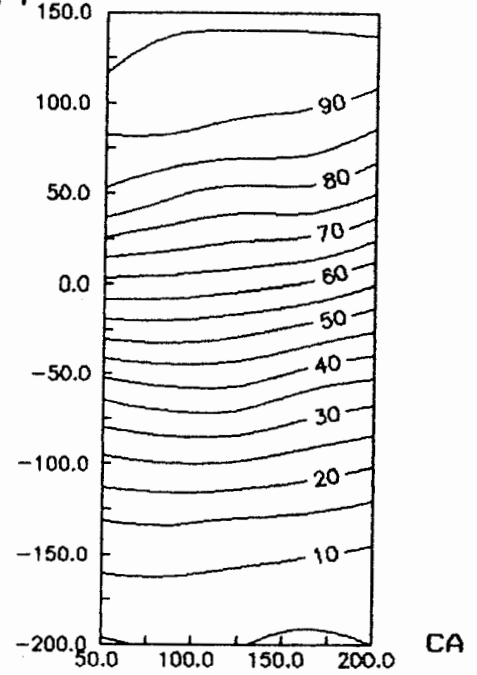
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/TH/DEZ



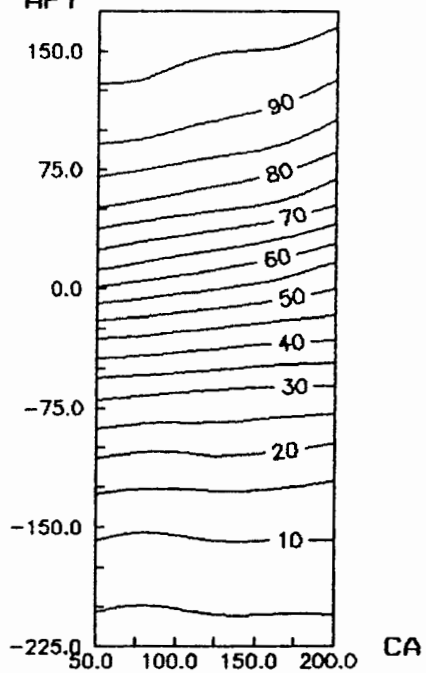
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/BC/JAN



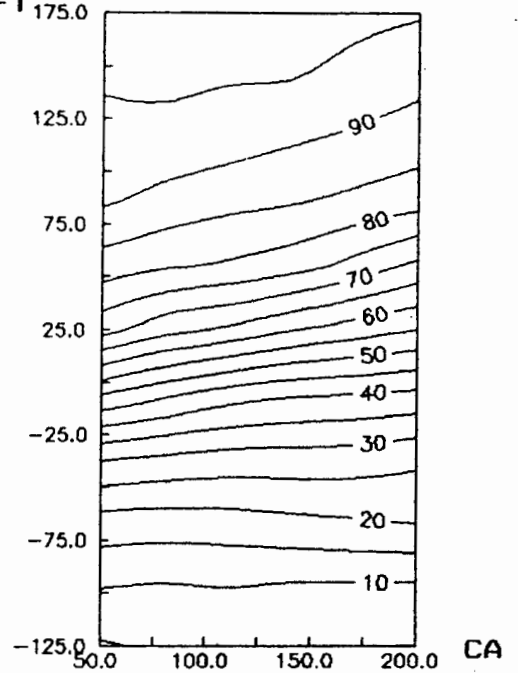
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/BC/FEV

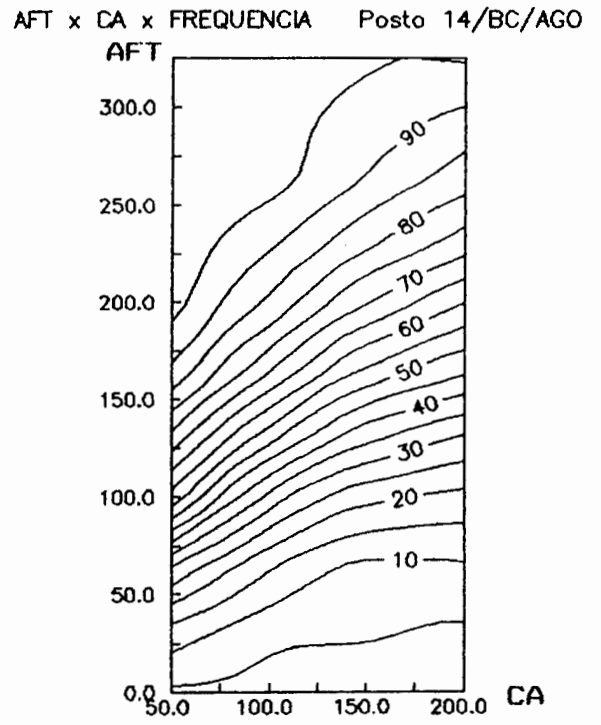
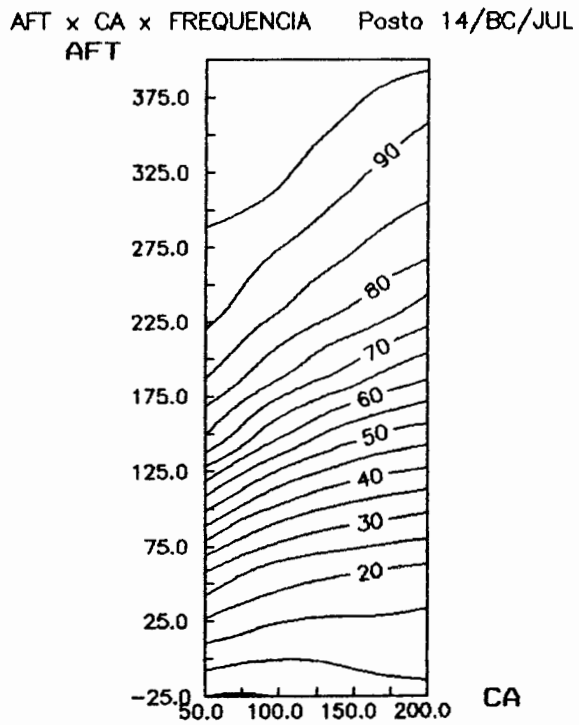
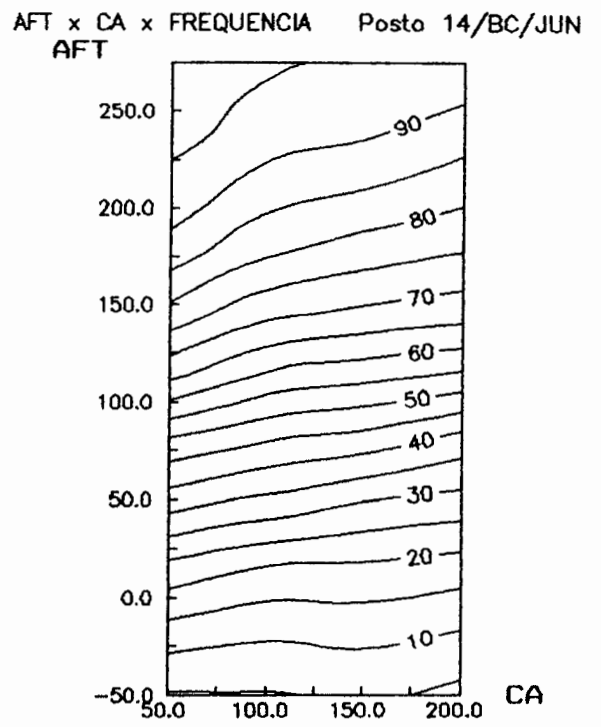
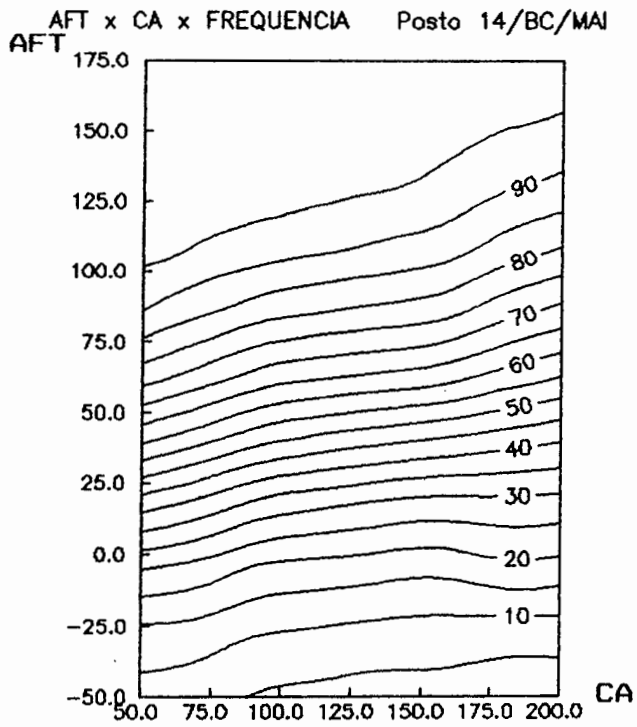


AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/BC/MAR

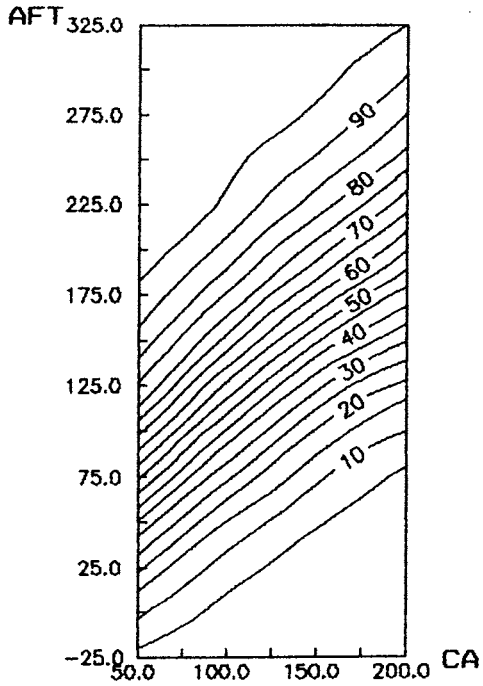


AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/BC/ABR

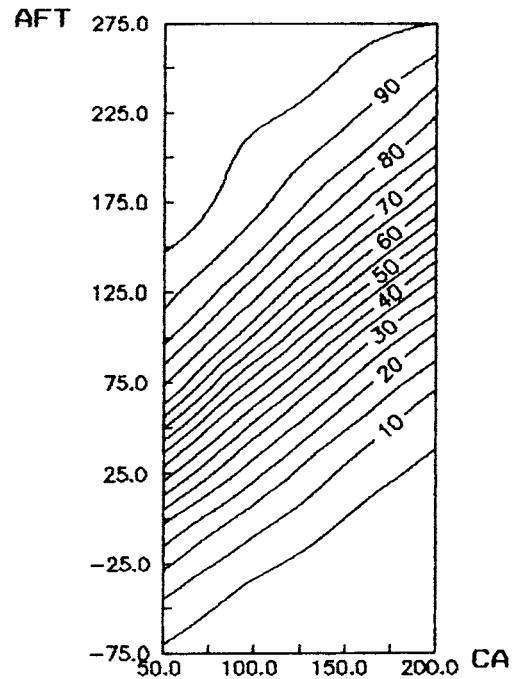




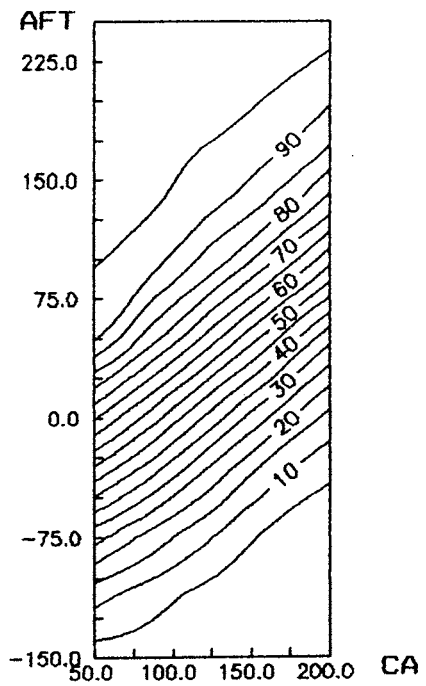
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/BC/SET



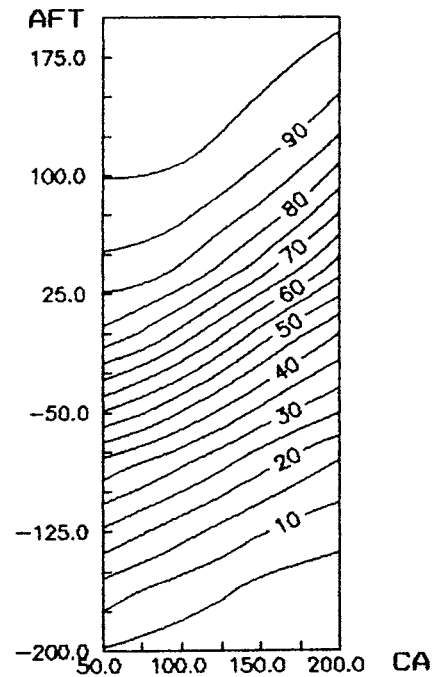
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/BC/OUT



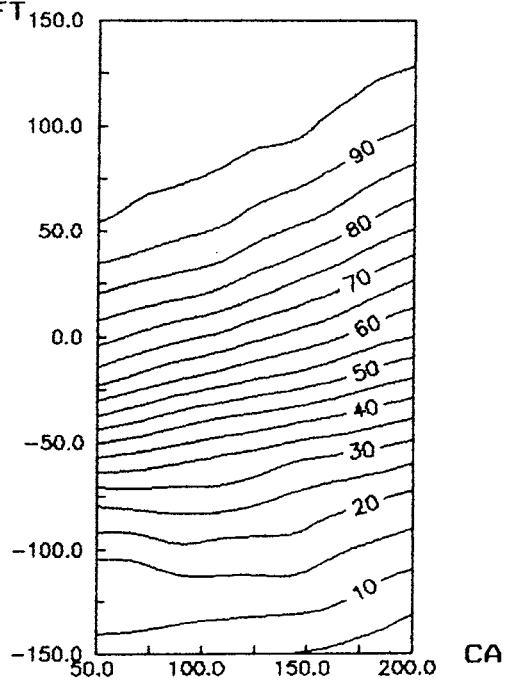
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/BC/NOV



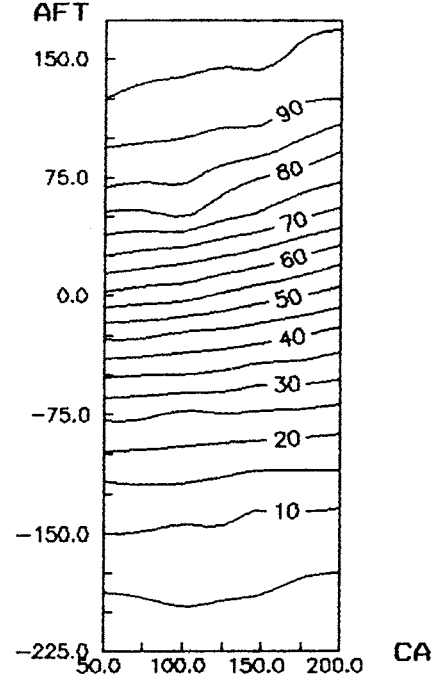
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/BC/DEZ



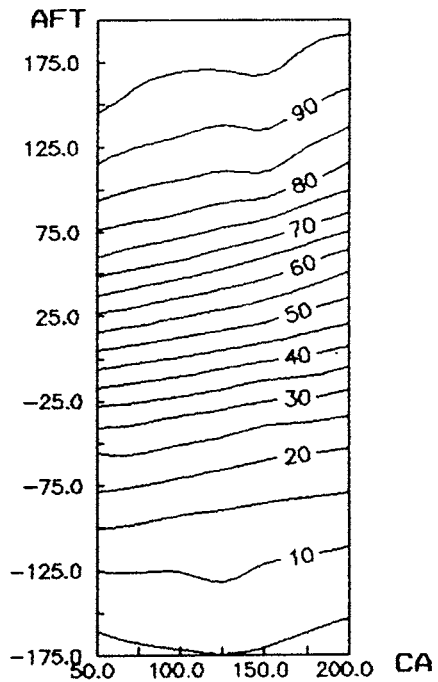
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/HS/JAN



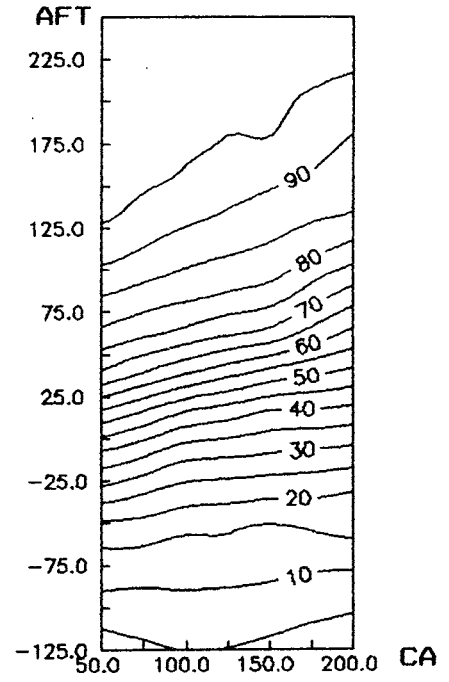
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/HS/FEV

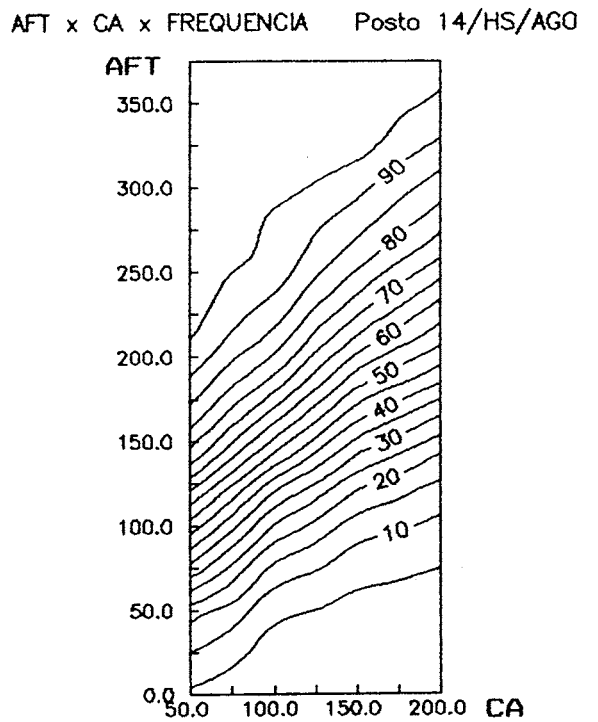
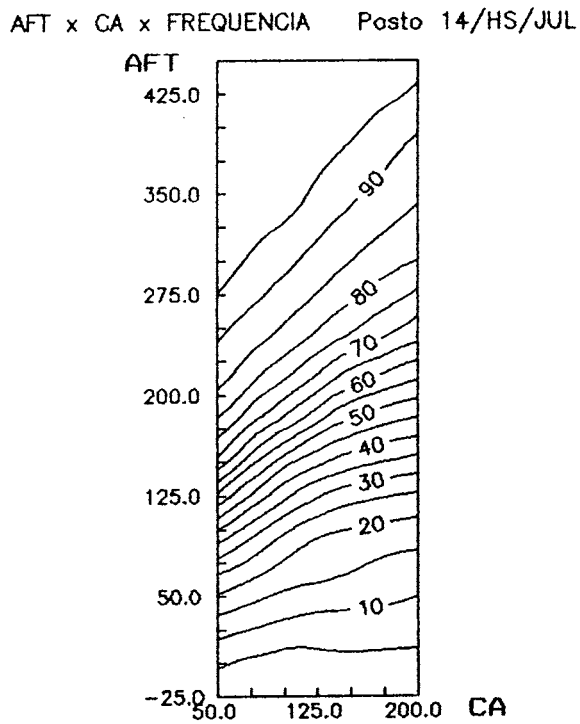
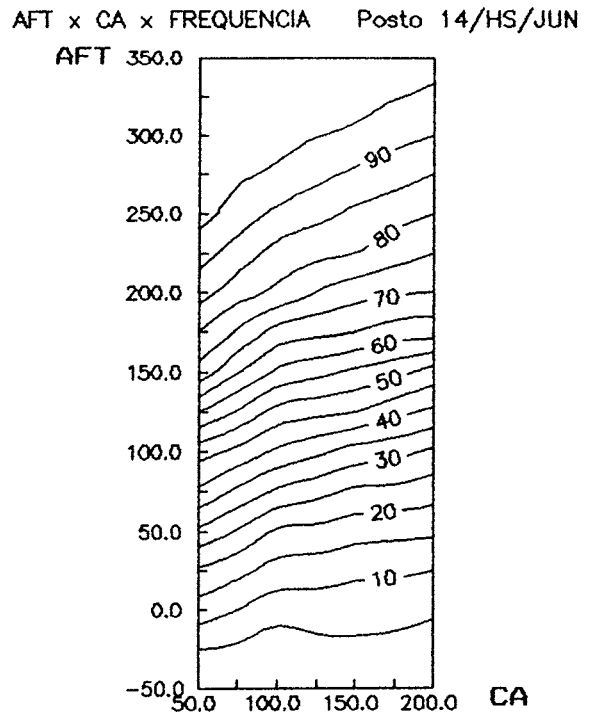
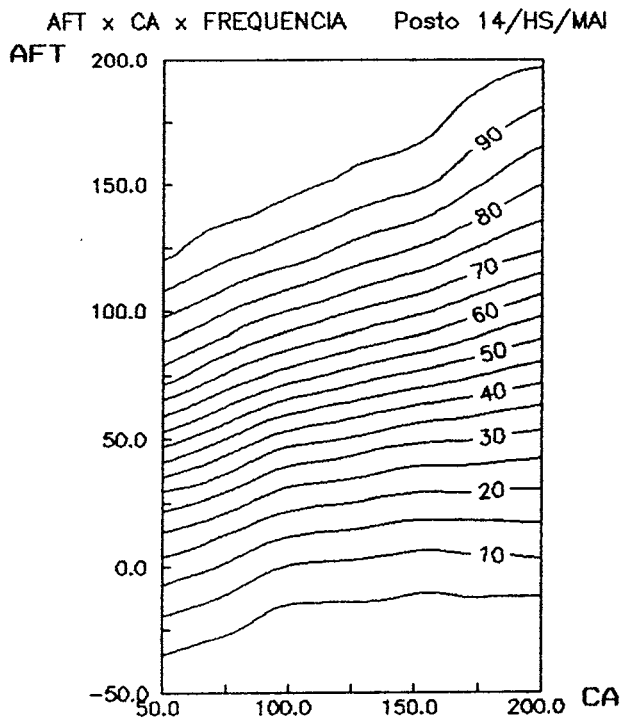


AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/HS/MAR

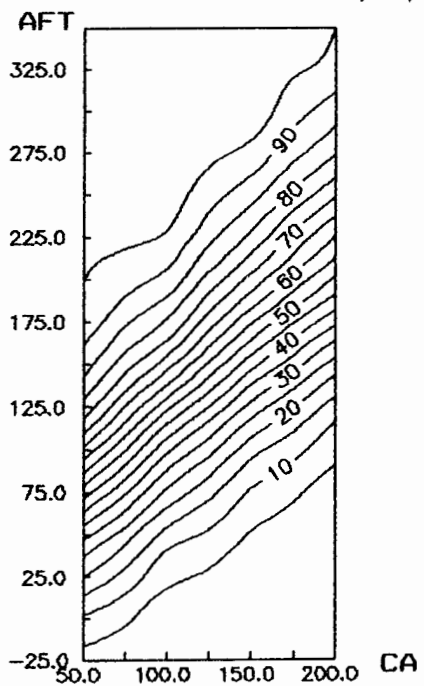


AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/HS/ABR

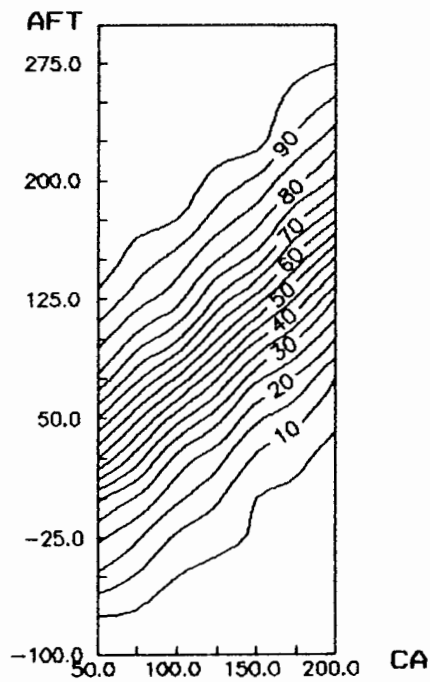




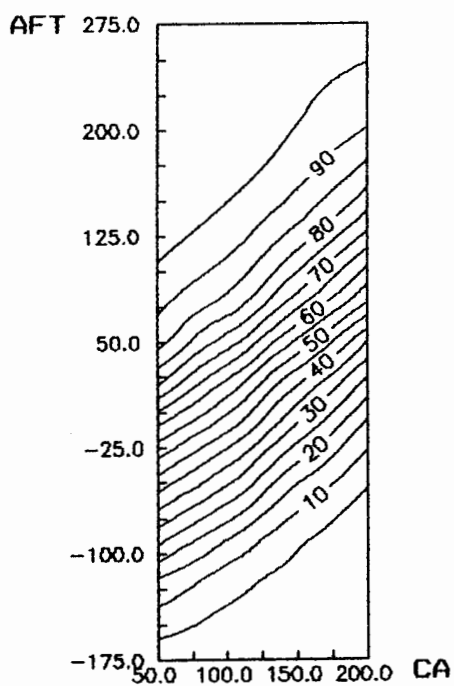
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/HS/SET



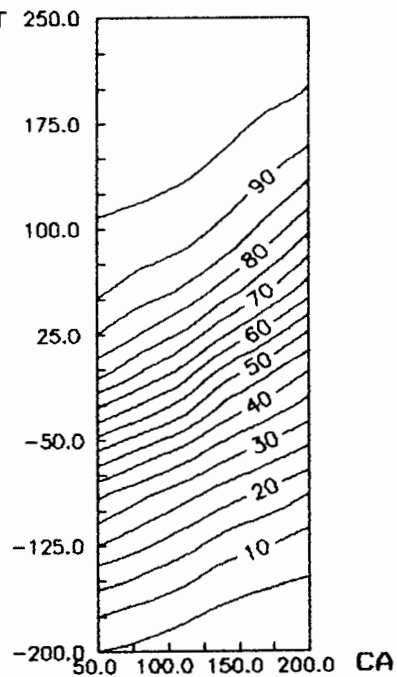
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/HS/OUT



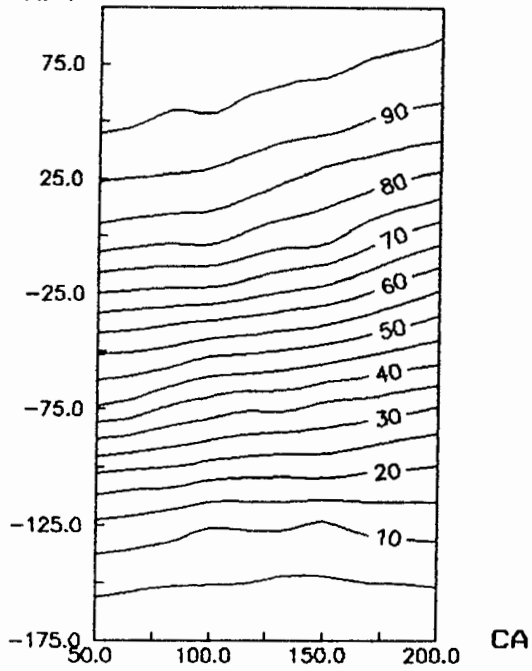
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/HS/NOV



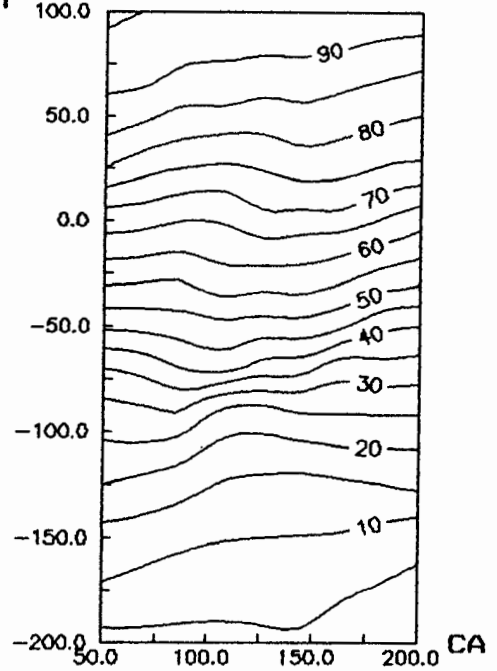
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/HS/DEZ



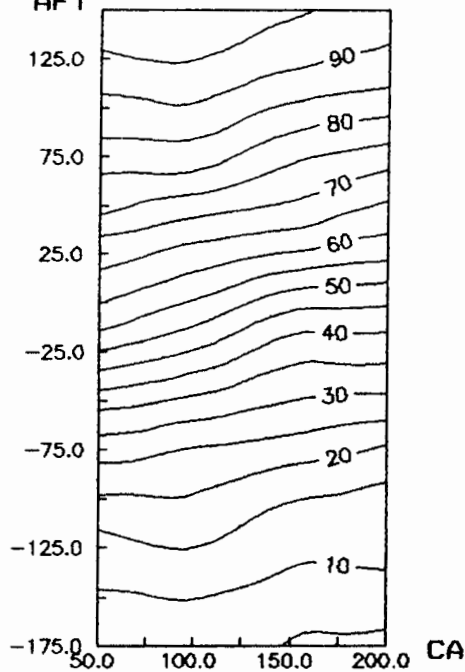
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/MK/JAN
AFT



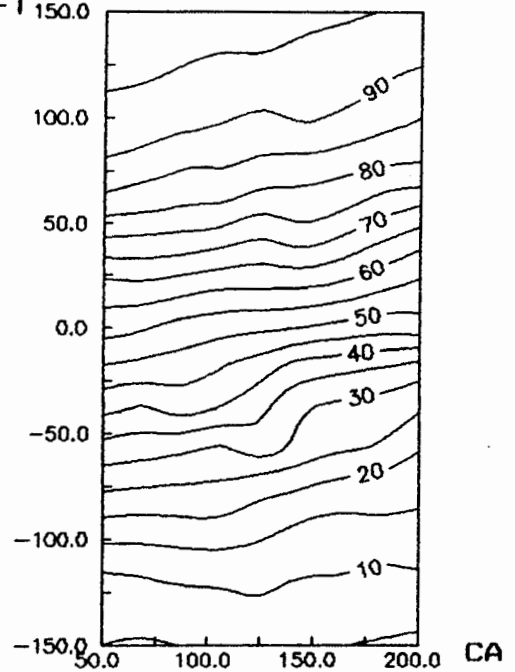
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/MK/FEV
AFT

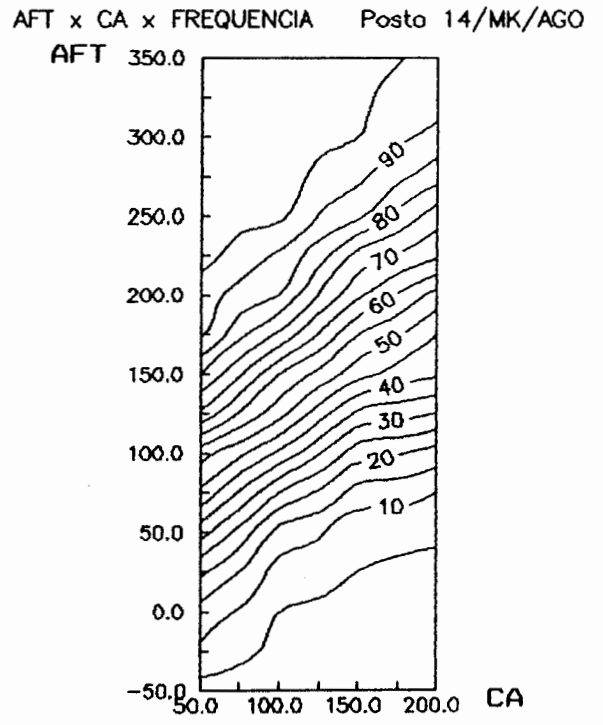
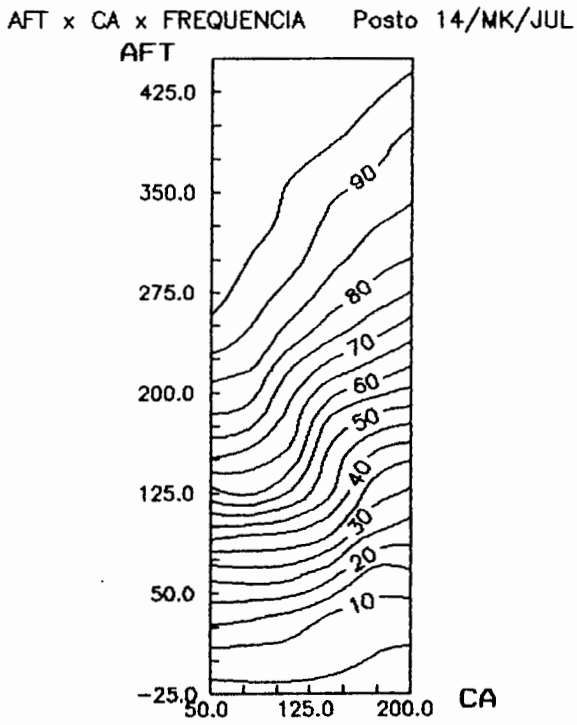
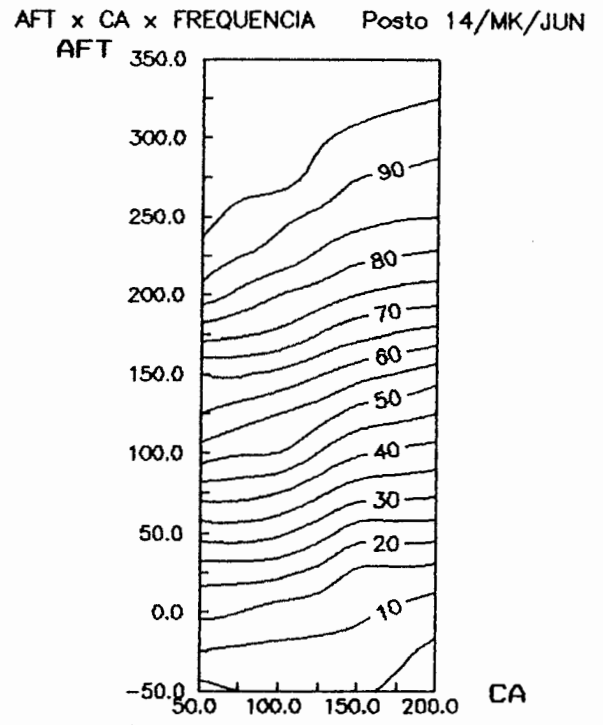
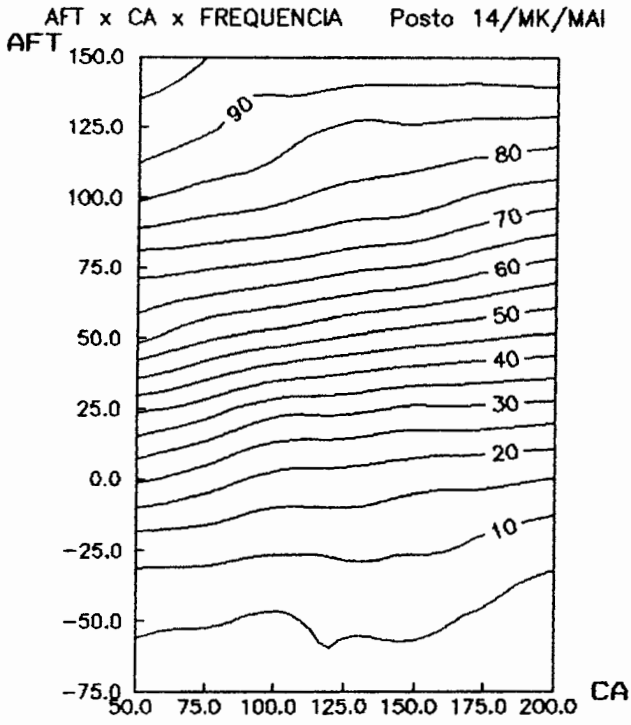


AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/MK/MAR
AFT

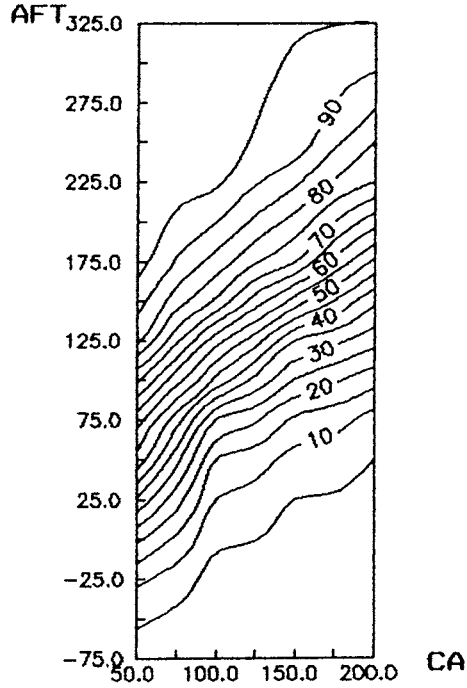


AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/MK/ABR
AFT

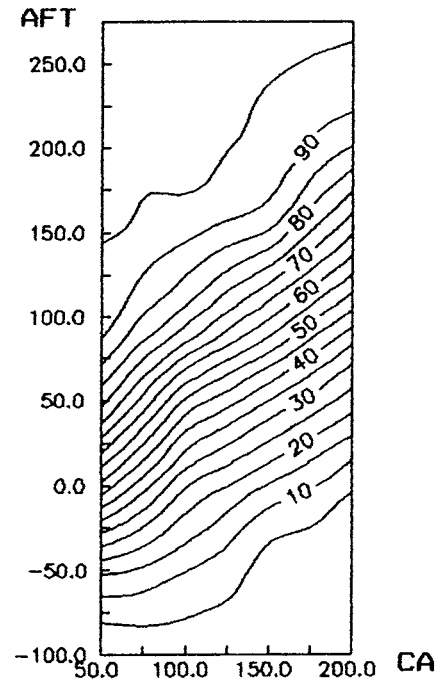




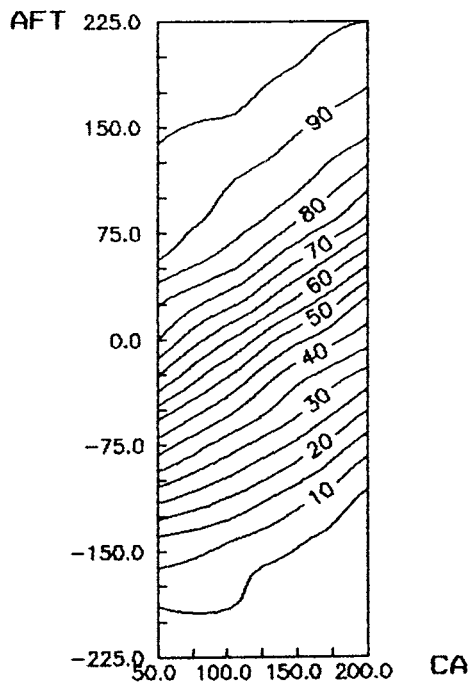
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/MK/SET



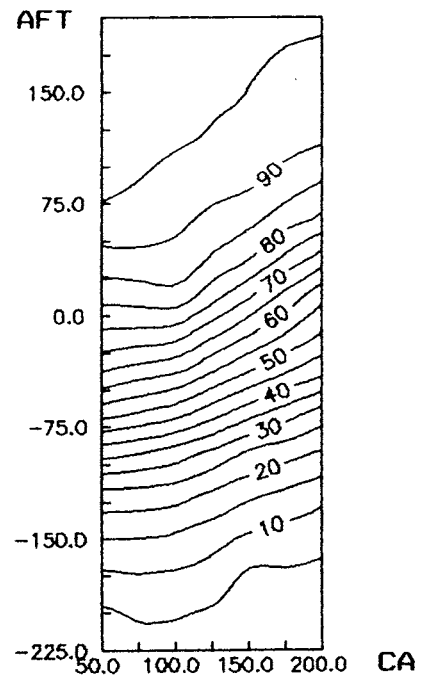
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/MK/OUT



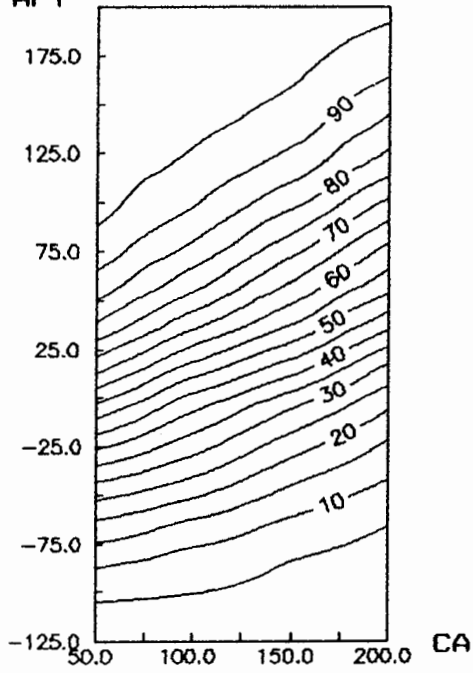
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/MK/NOV



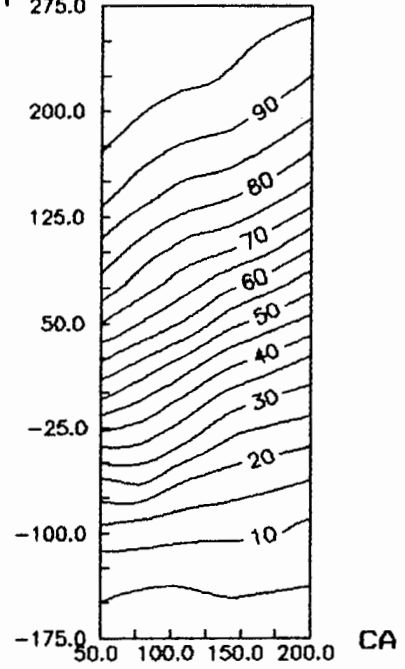
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/MK/DEZ



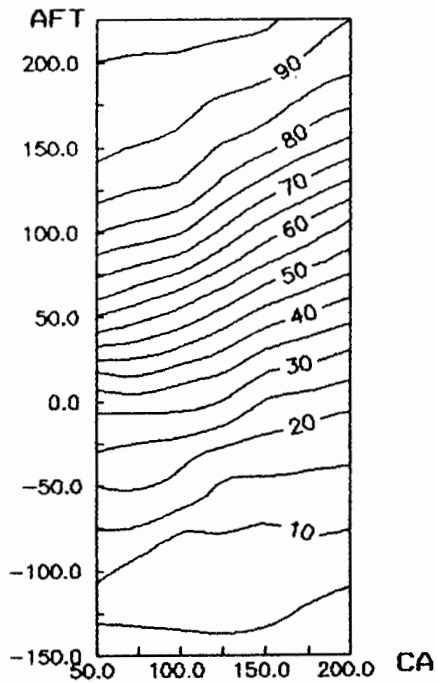
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/TC/JAN
AFT



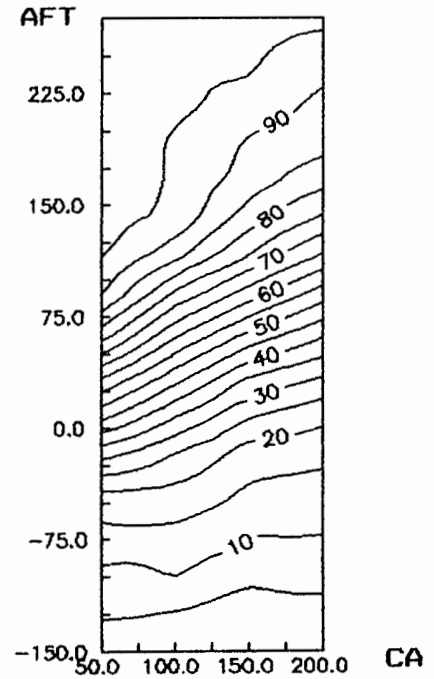
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/TC/FEV
AFT



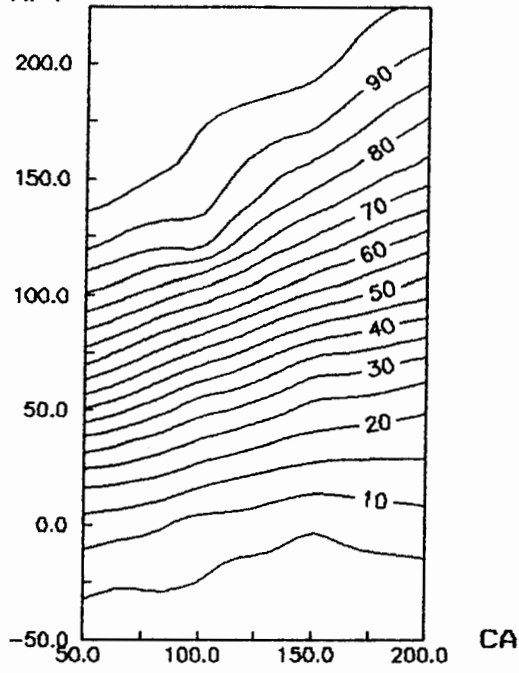
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/TC/MAR



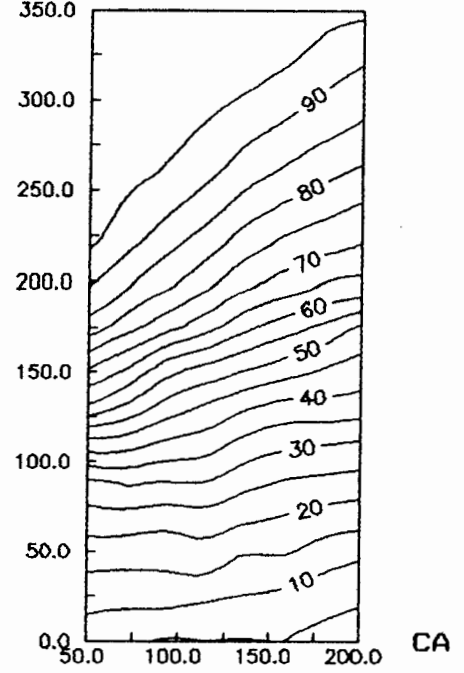
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/TC/ABR



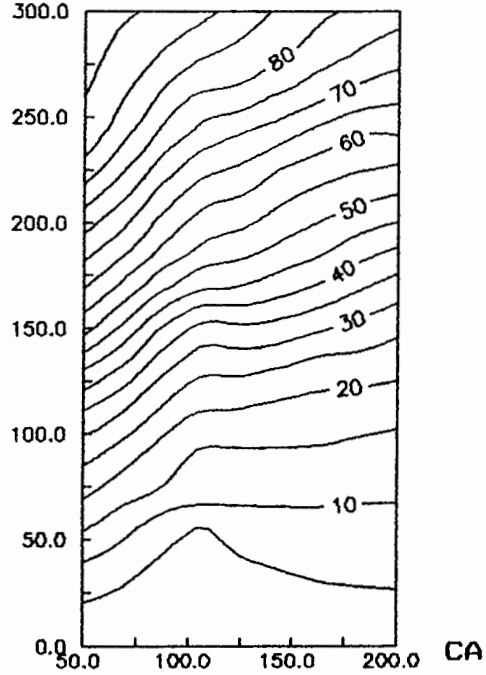
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/TC/MAI
AFT



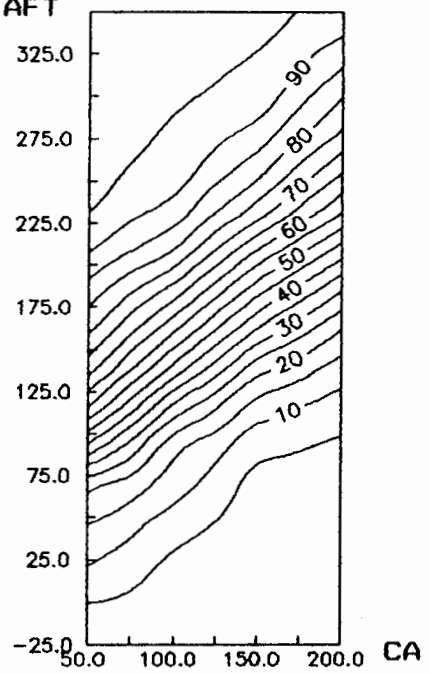
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/TC/JUN
AFT



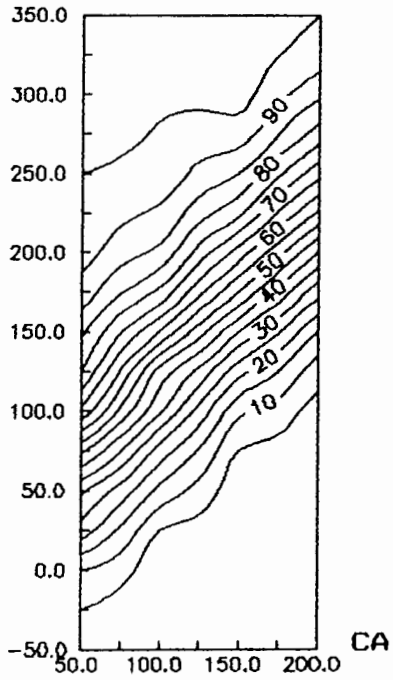
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/TC/JUL
AFT



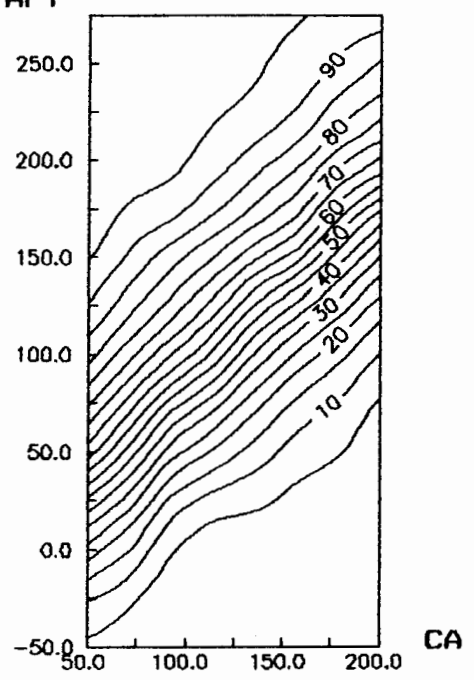
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/TC/AGO
AFT



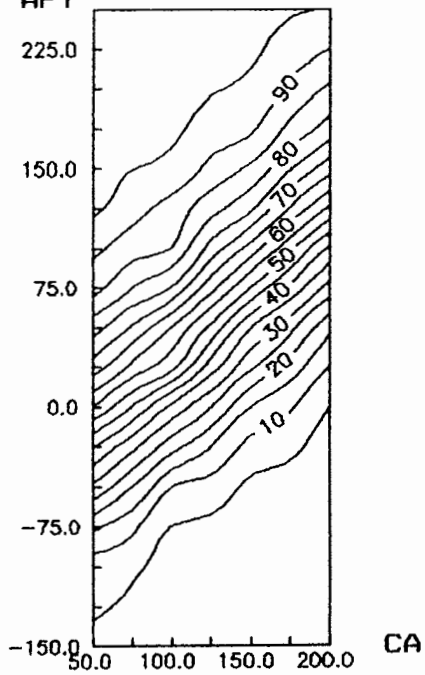
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/TC/SET
AFT



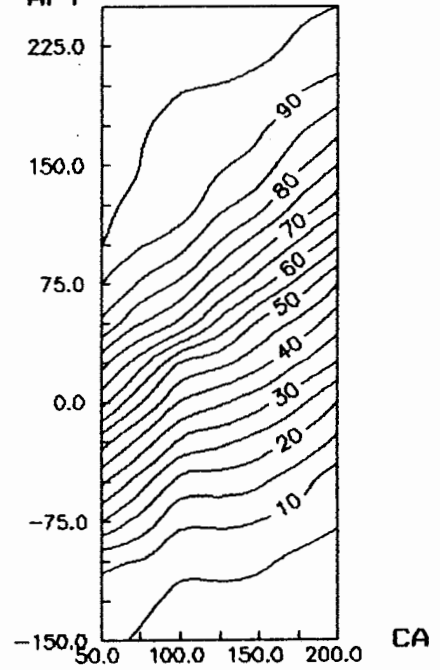
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/TC/OUT
AFT



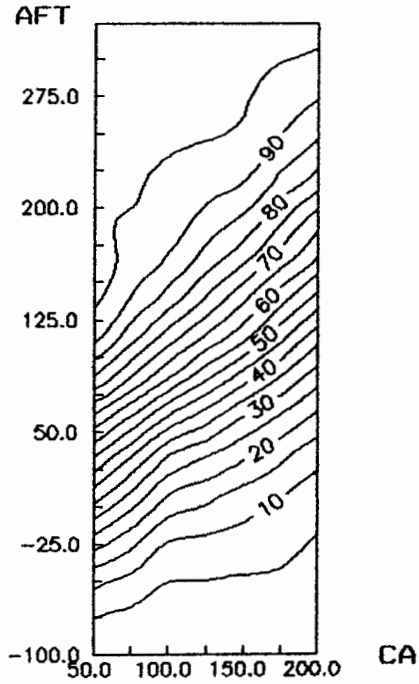
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/TC/NOV
AFT



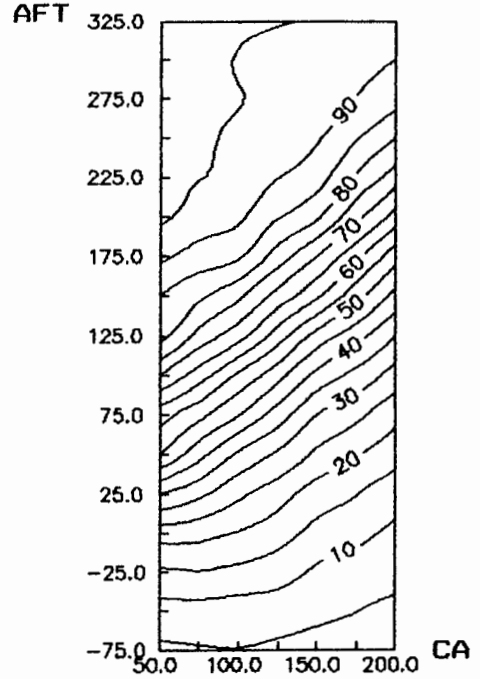
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 14/TC/DEZ
AFT



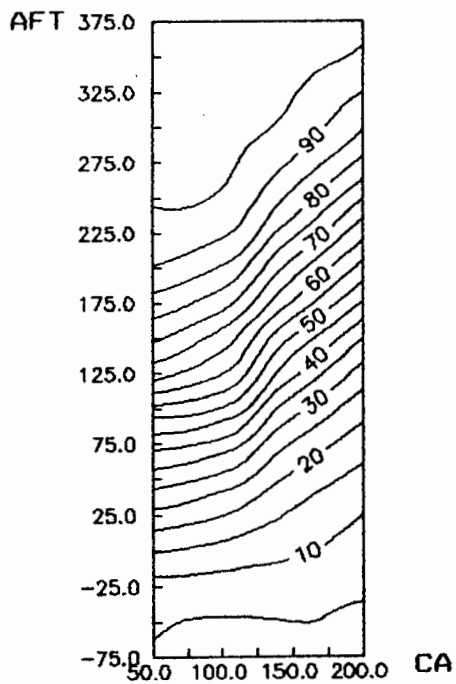
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/TH/JAN



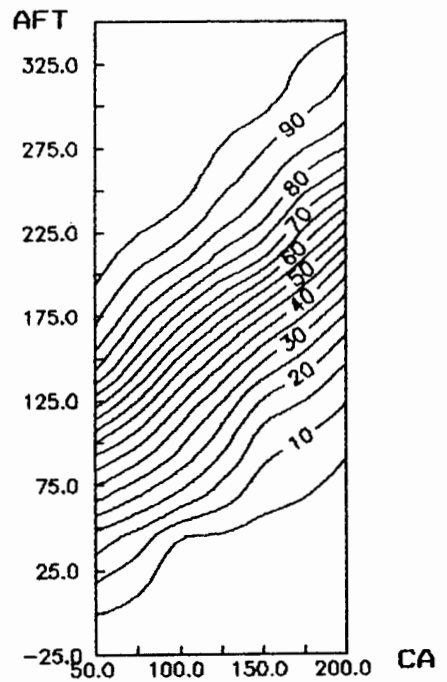
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/TH/FEV



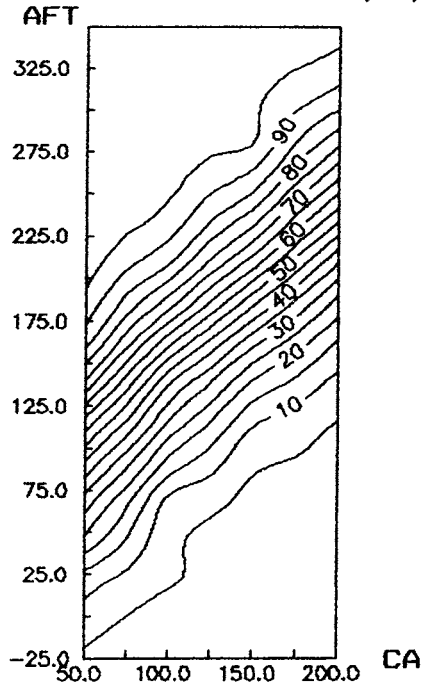
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/TH/MAR



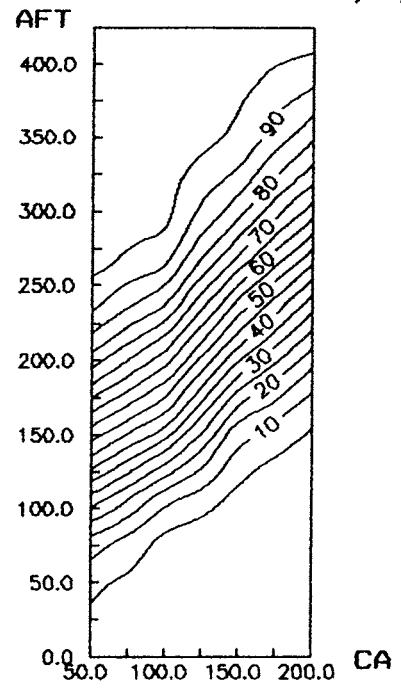
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/TH/ABR



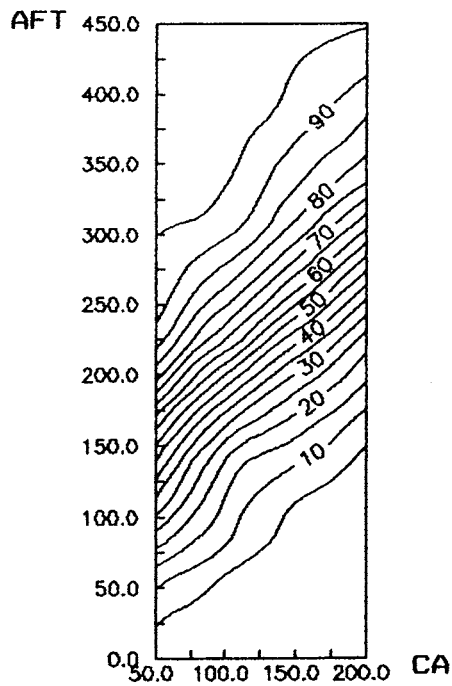
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/TH/MAI



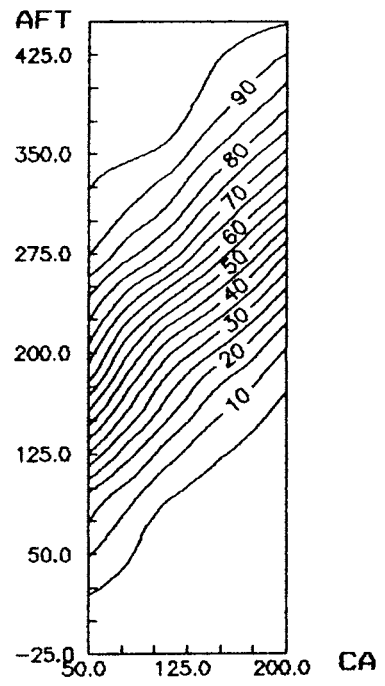
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/TH/JUN



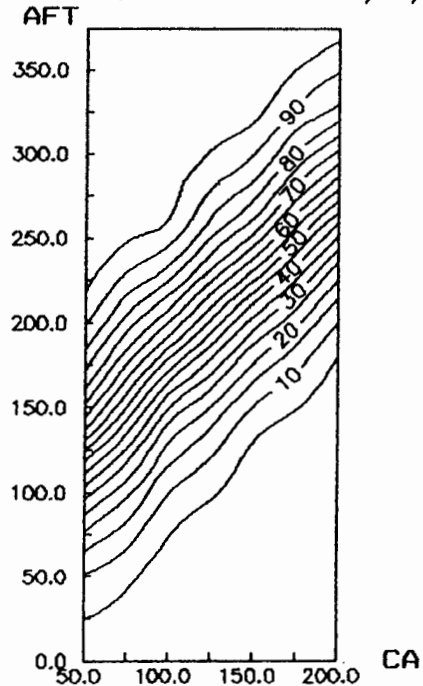
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/TH/JUL



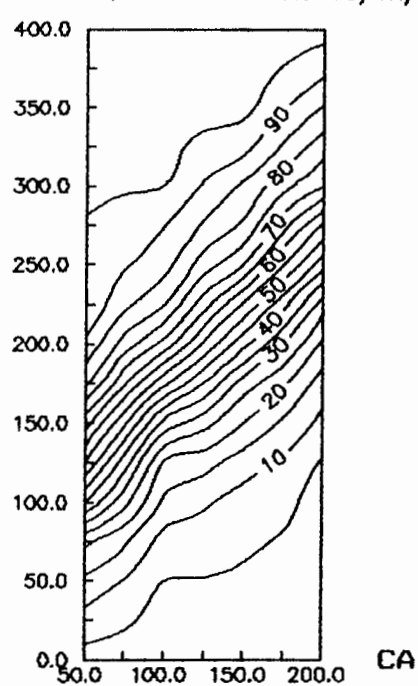
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/TH/AGO



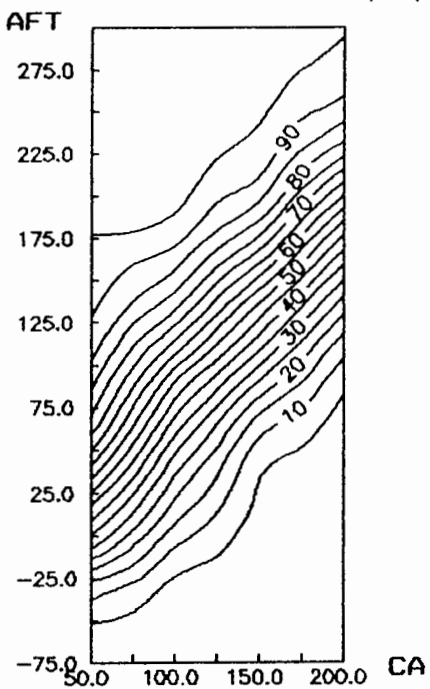
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/TH/SET



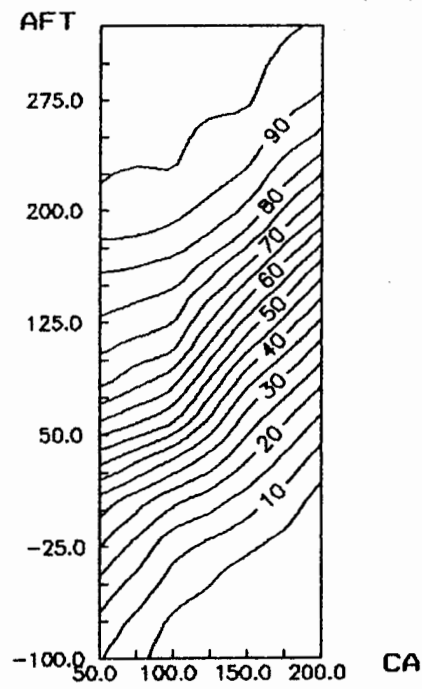
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/TH/OUT



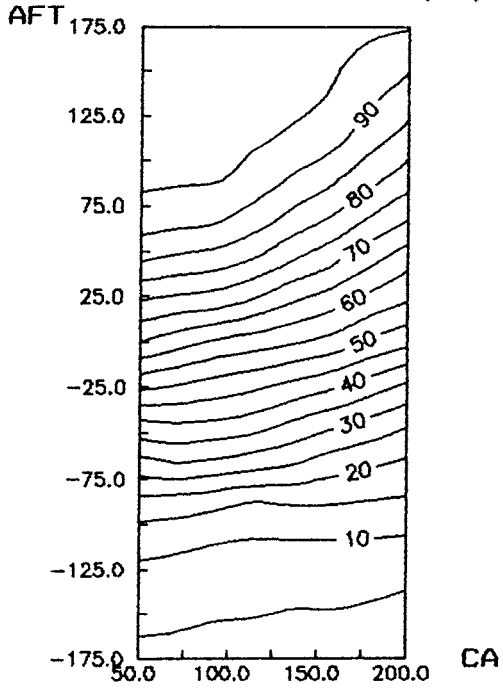
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/TH/NOV



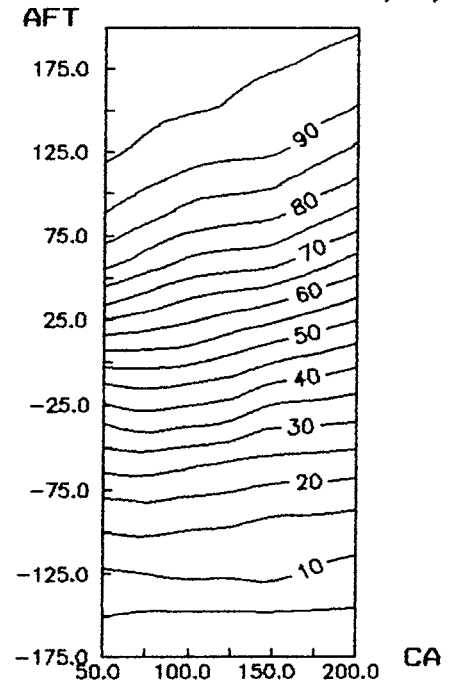
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/TH/DEZ



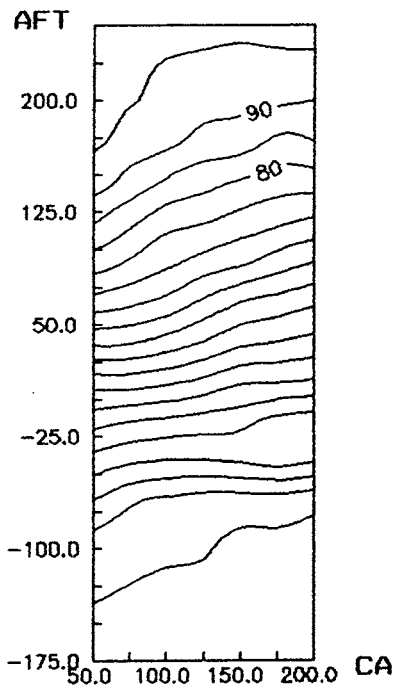
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/BC/JAN



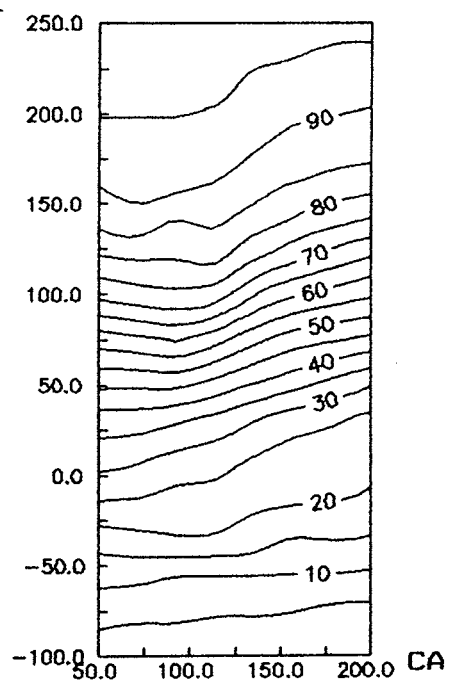
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/BC/FEV



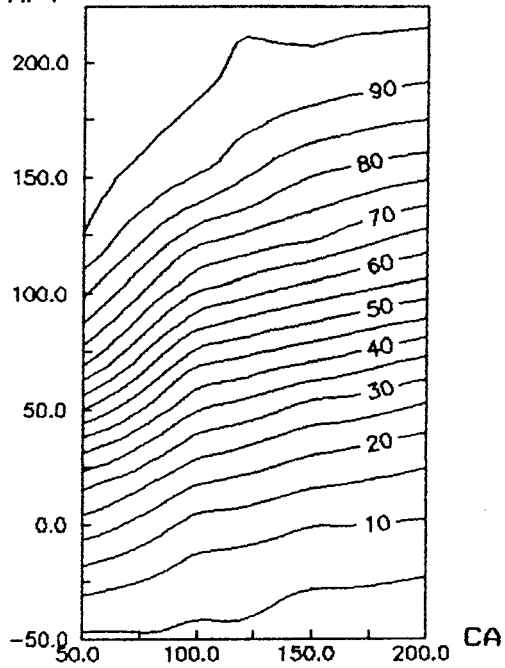
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/BC/MAR



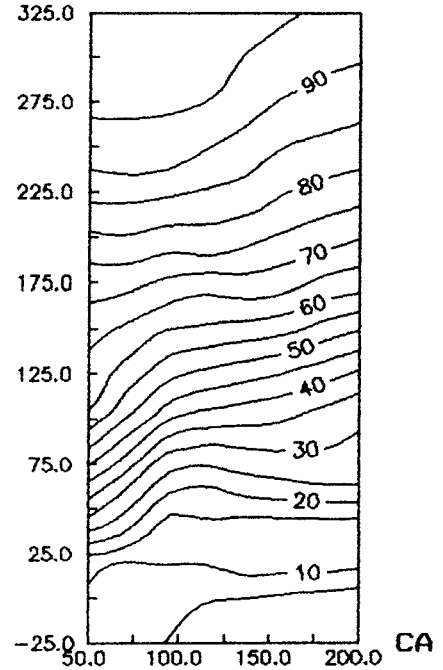
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/BC/ABR



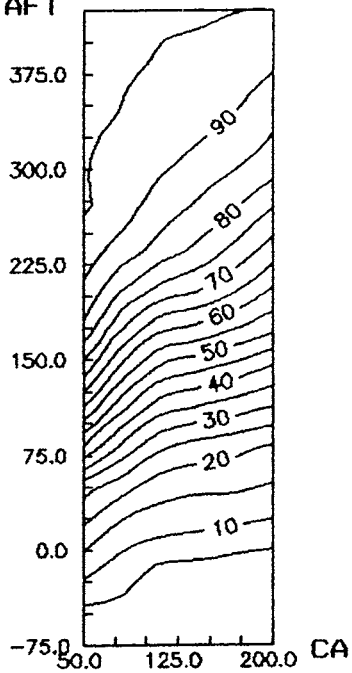
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/BC/MAI
AFT



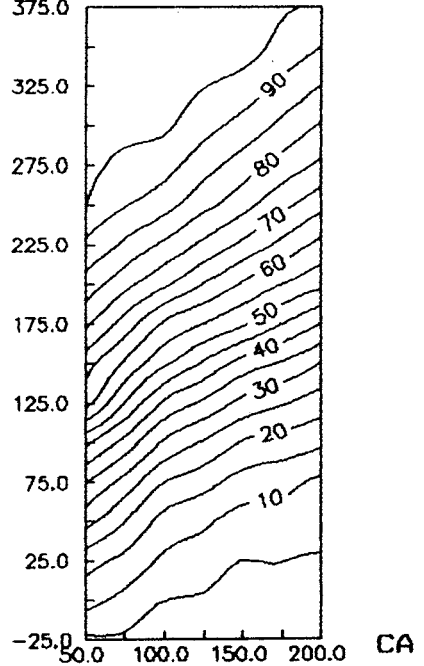
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/BC/JUN
AFT



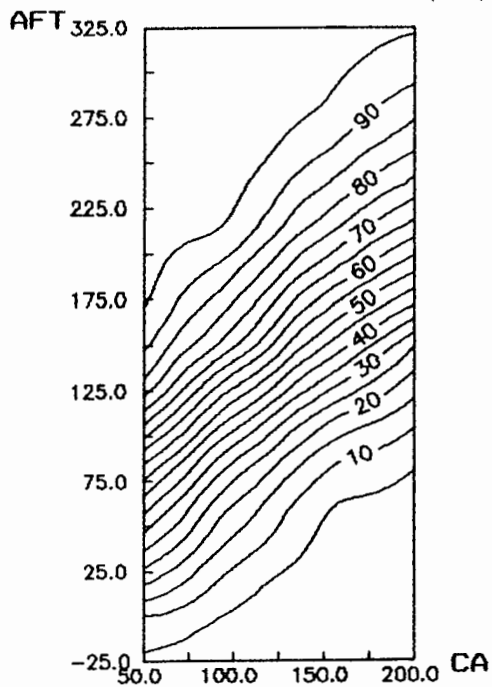
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/BC/JUL
AFT



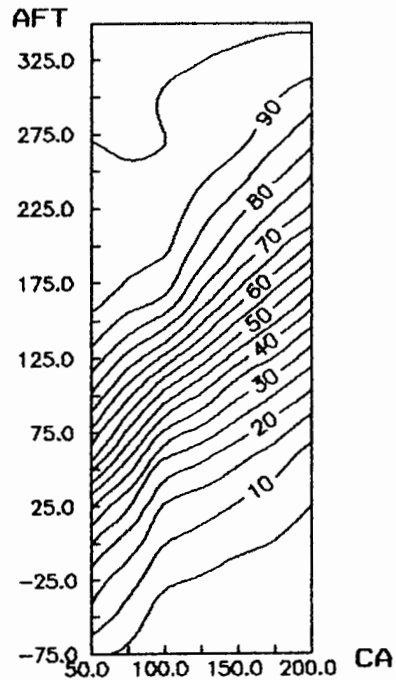
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/BC/AGO
AFT



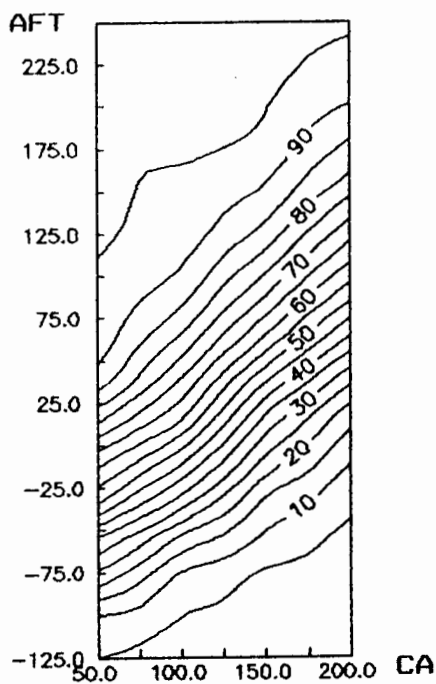
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/BC/SET



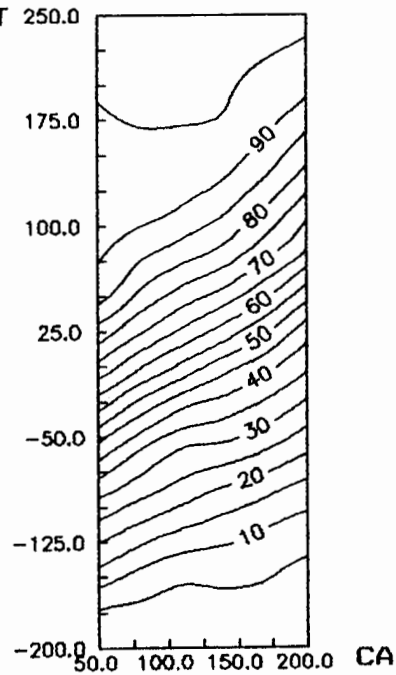
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/BC/OUT



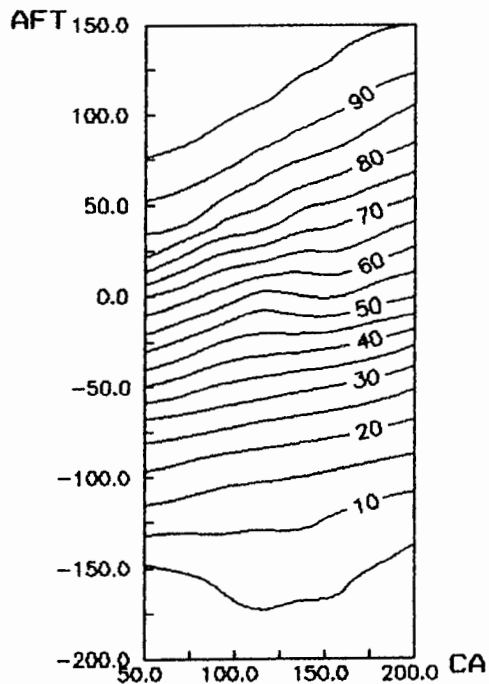
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/BC/NOV



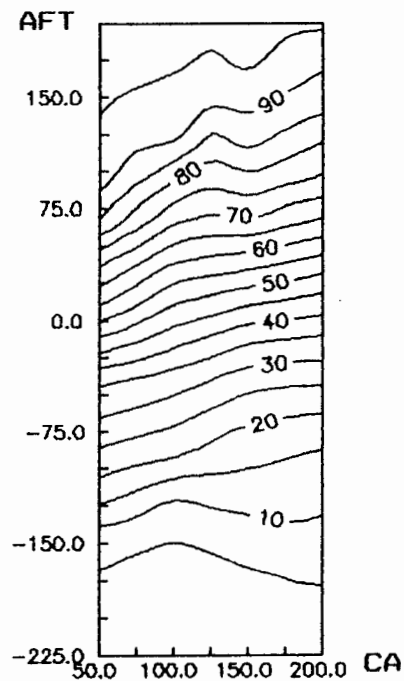
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/BC/DEZ



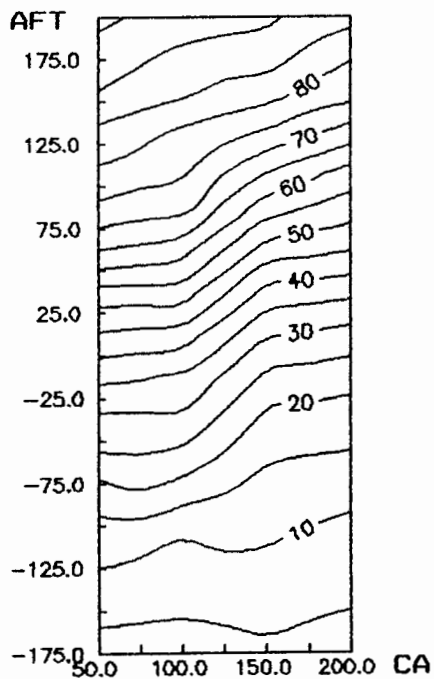
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/PN/JAN



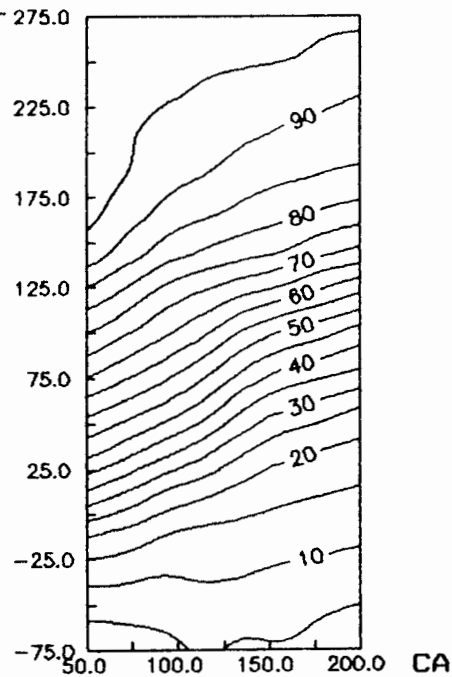
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/PN/FEV



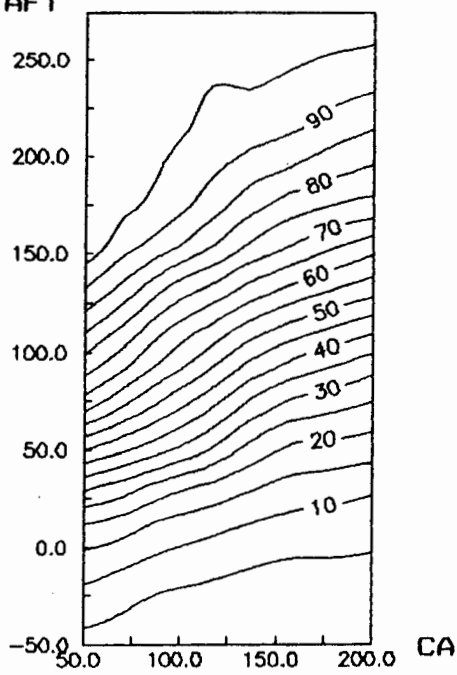
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/PN/MAR



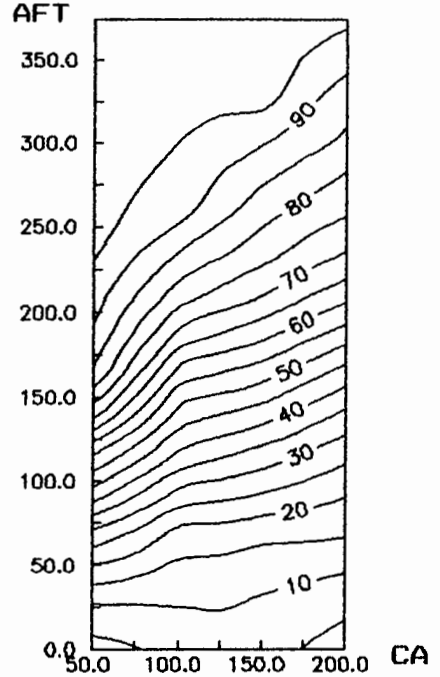
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/PN/ABR



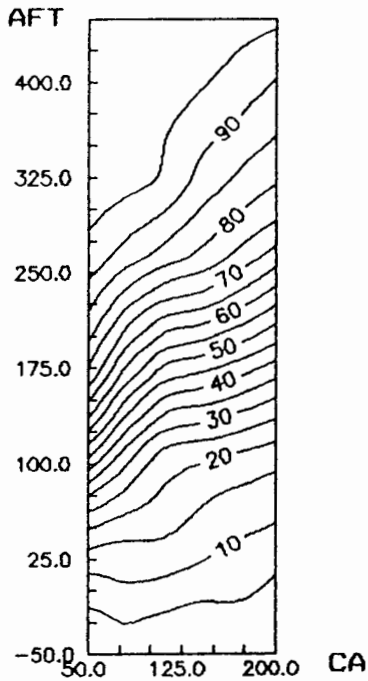
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/PN/MAI



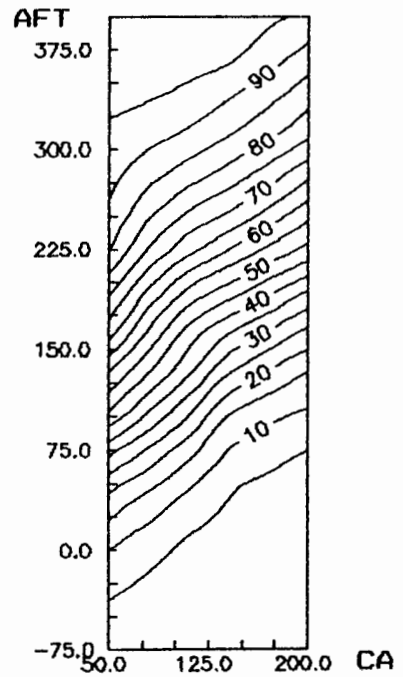
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/PN/JUN



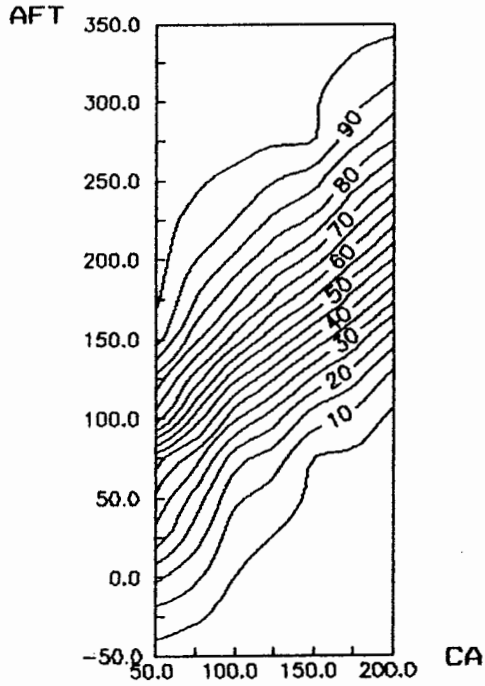
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/PN/JUL



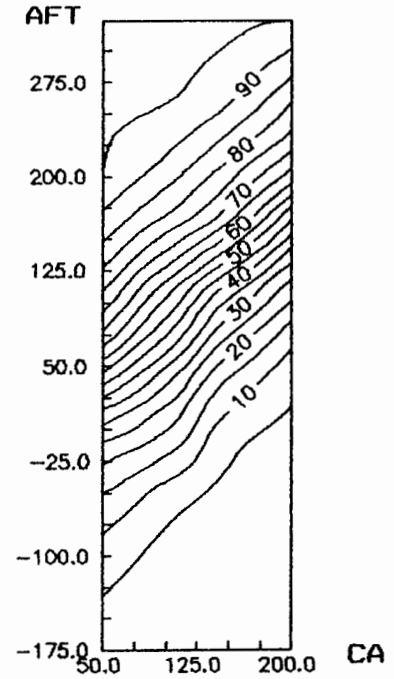
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/PN/AGO



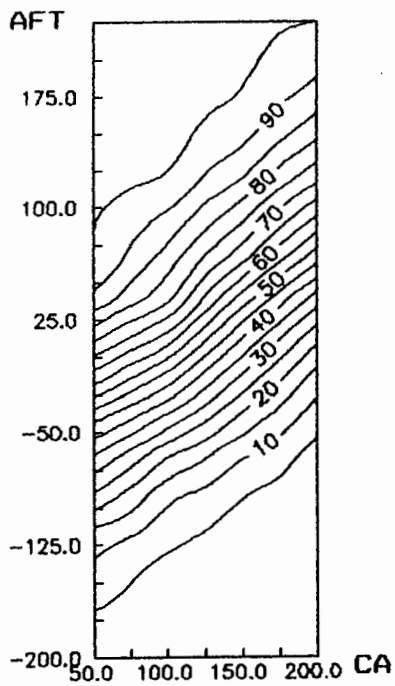
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/PN/SET



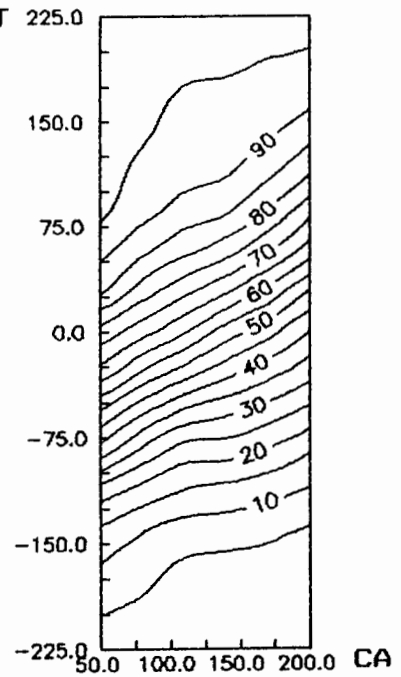
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/PN/OUT



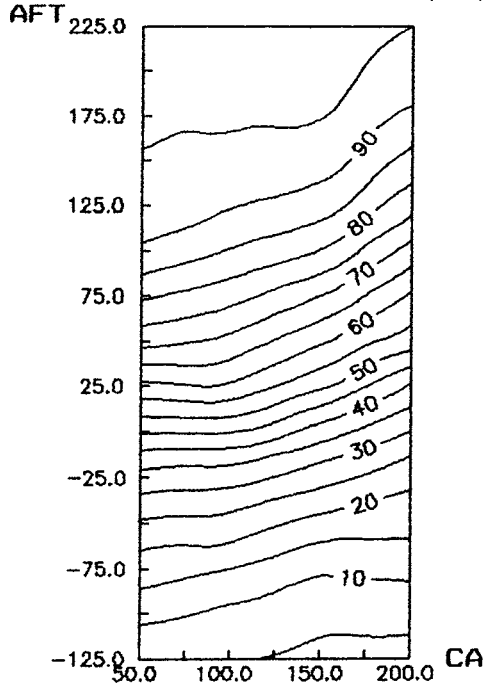
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/PN/NOV



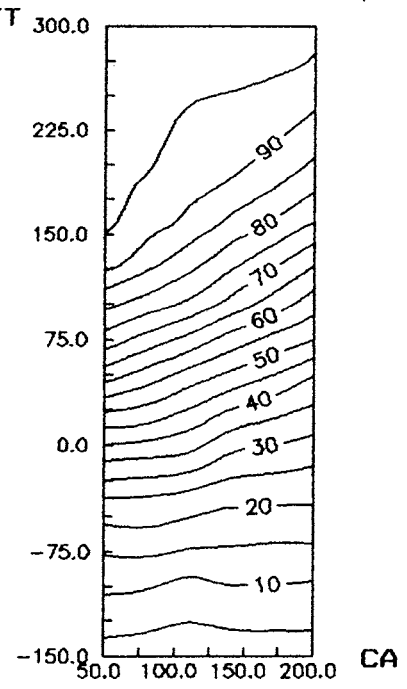
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/PN/DEZ



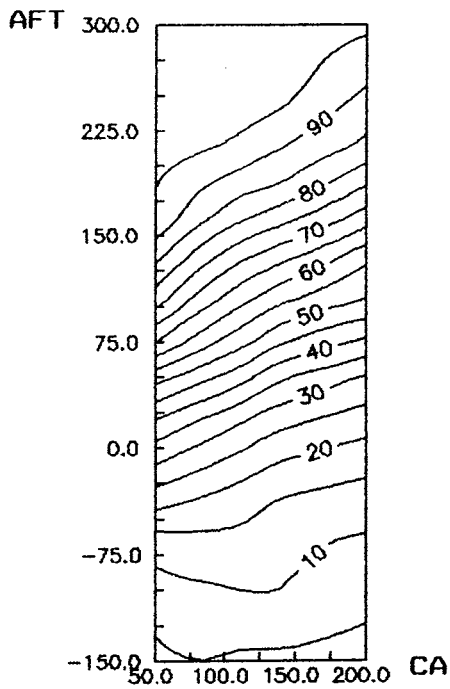
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/HS/JAN



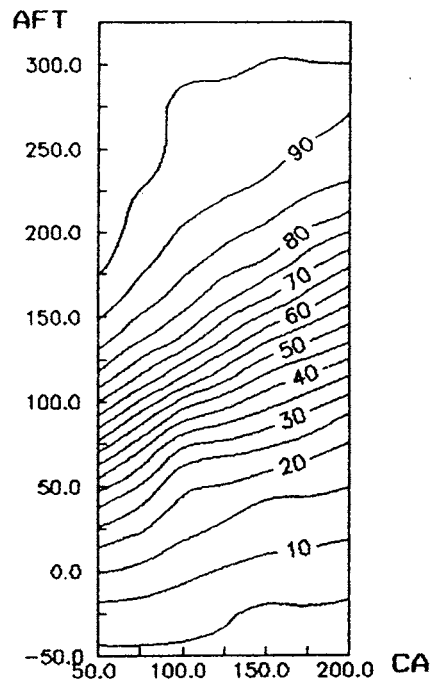
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/HS/FEV



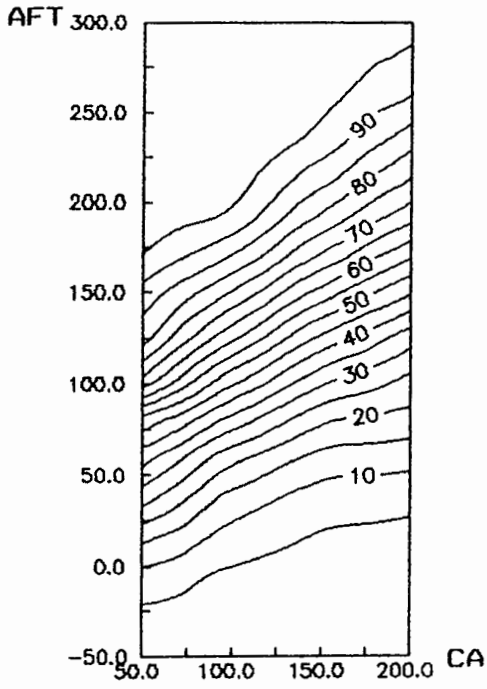
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/HS/MAR



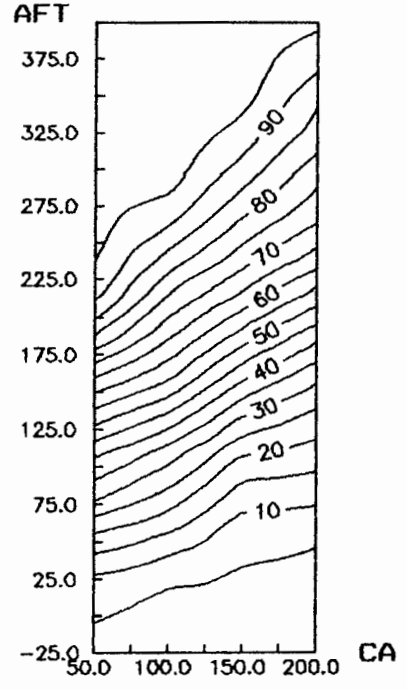
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/HS/ABR



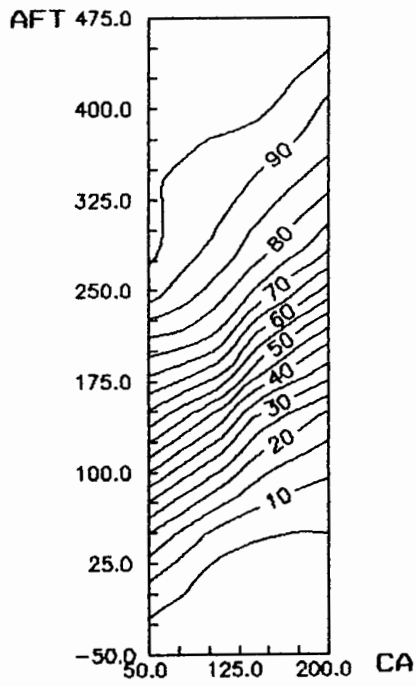
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/HS/MAI



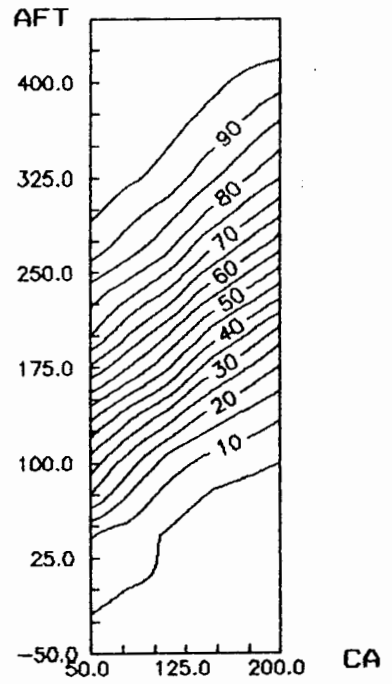
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/HS/JUN



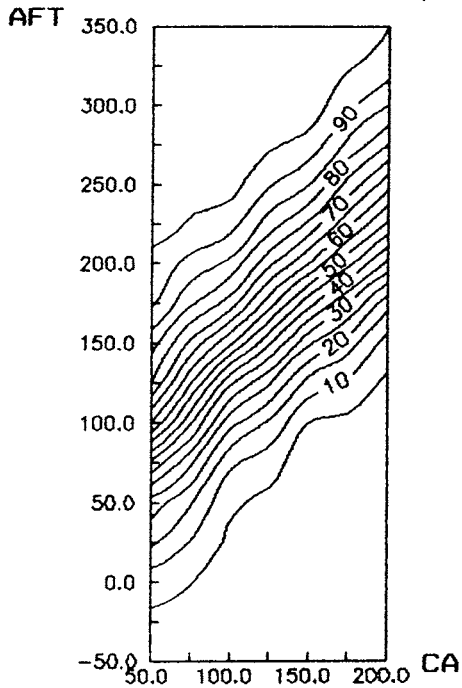
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/HS/JUL



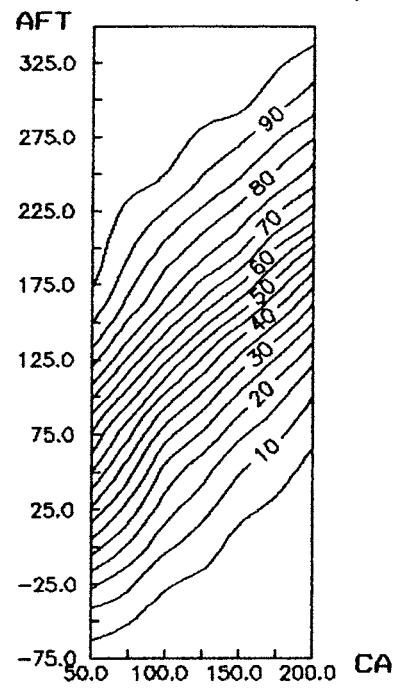
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/HS/AGO



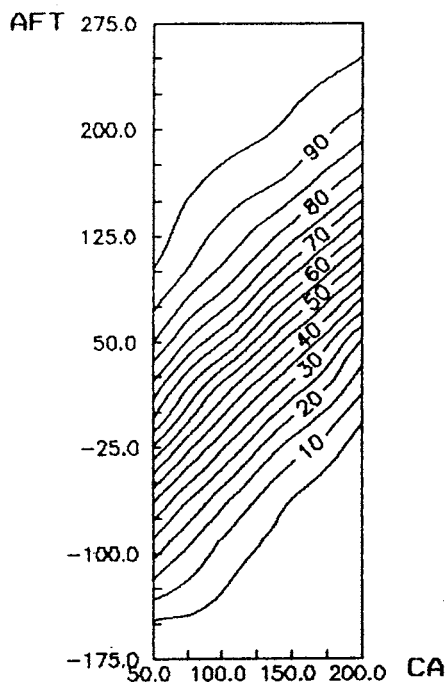
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/HS/SET



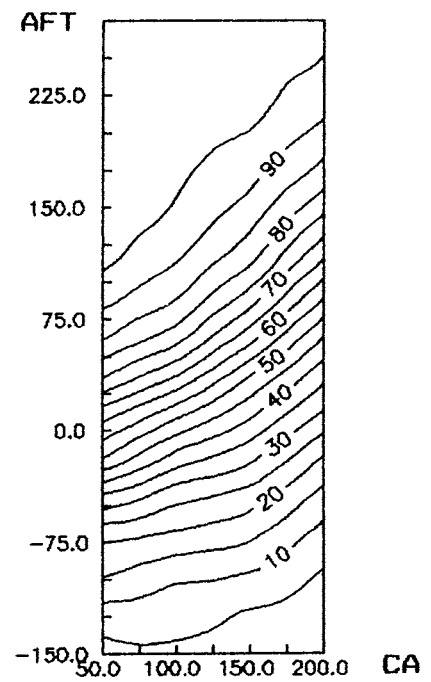
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/HS/OUT



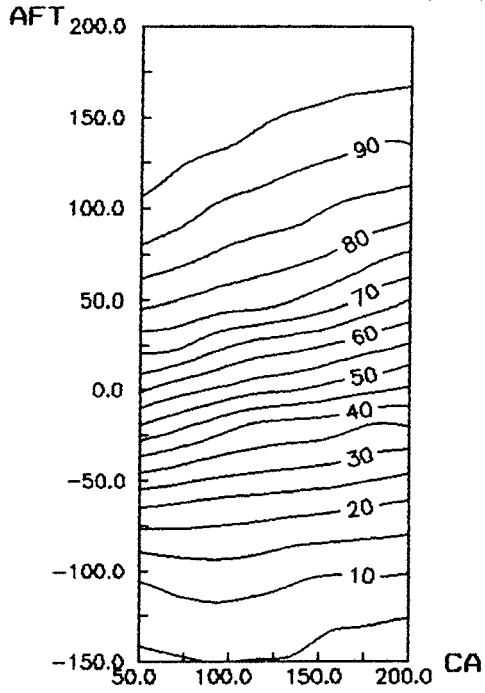
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/HS/NOV



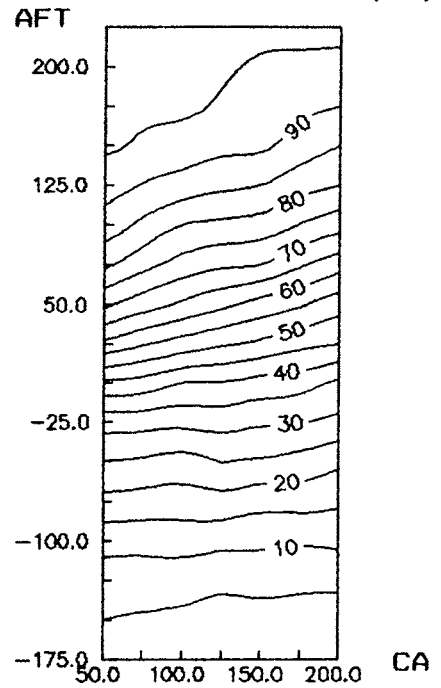
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/HS/DEZ



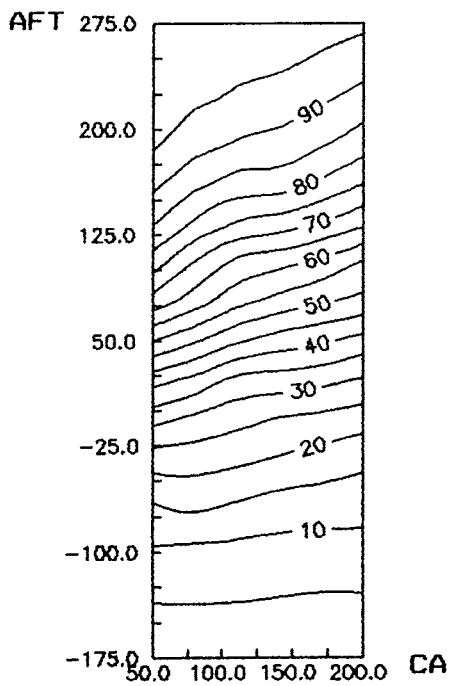
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/MK/JAN



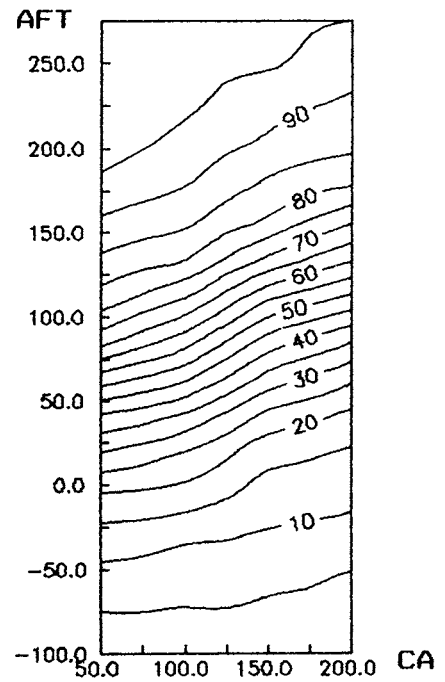
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/MK/FEV



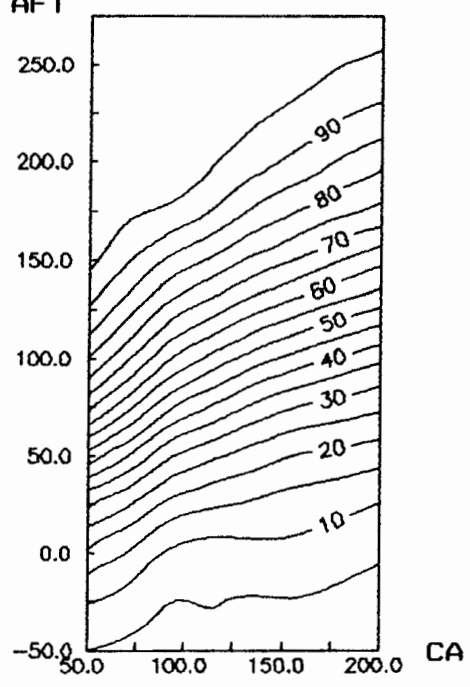
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/MK/MAR



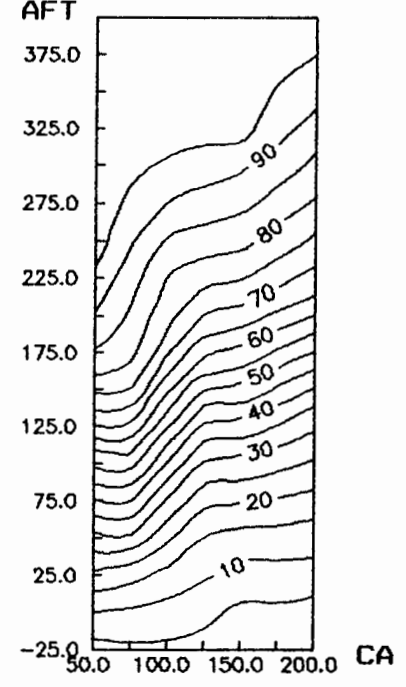
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/MK/ABR



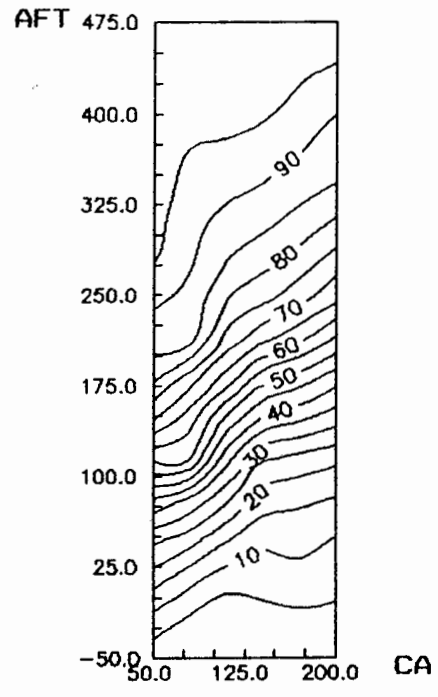
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/MK/MAI



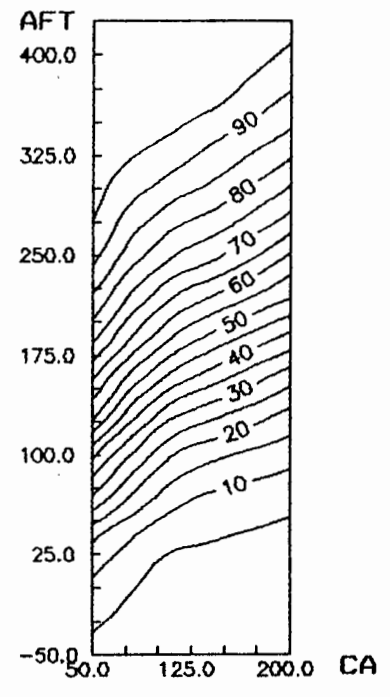
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/MK/JUN



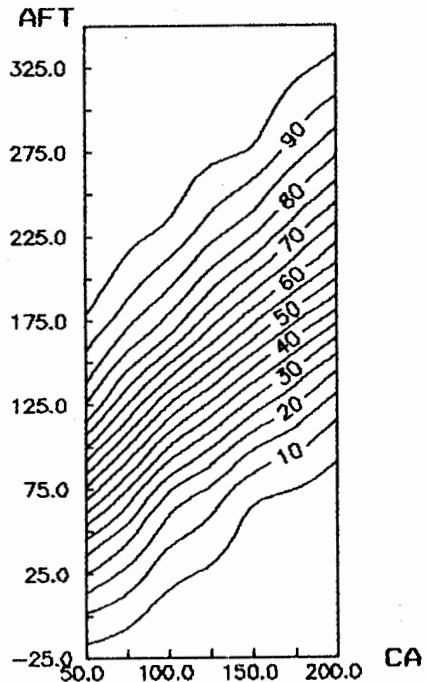
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/MK/JUL



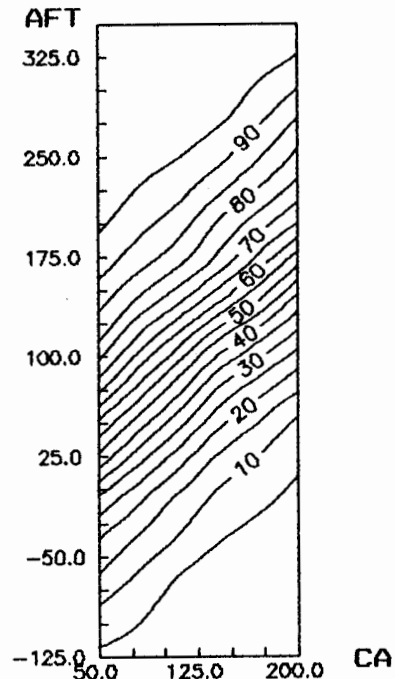
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/MK/AGO



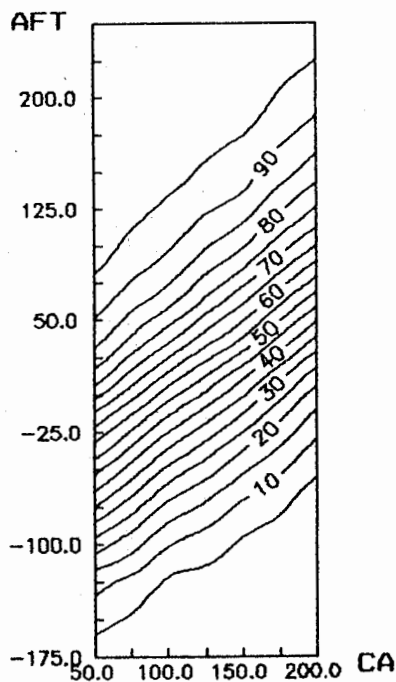
AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/MK/SET



AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/MK/OUT



AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/MK/NOV



AFT x CA x FREQUENCIA Posto 15/MK/DEZ

