

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE HIDROMETEOROLÓGICA INTERANUAL NO CRESCIMENTO DE PLANTAÇÕES DE EUCALIPTO**  
**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF INTERANNUAL HYDROMETEOROLOGICAL VARIABILITY ON THE GROWTH OF EUCALYPT PLANTATIONS**

Almeida, A.C. de<sup>1</sup> e Soares, J.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aracruz Celulose S.A. - Rodovia Aracruz - Barra do Riacho s/n - Aracruz - ES - CEP 29197-000  
 e-mail: aca@aracruz.infonet.com

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Av. dos Astronautas, 1758 CEP 12201-970 - São José dos Campos - SP - e-mail: vianei@ltd.inpe.br

## RESUMO

Este trabalho objetiva relacionar os dados de incremento corrente anual à variação interanual hidrometeorológica real ocorrida no intervalo entre as medidas de volume de madeira, para as áreas de plantação de eucaliptos da Aracruz Celulose S.A. localizadas no Estado do Espírito. A variação hidrometeorológica interanual foi obtida através de uma adaptação para períodos contínuos do balanço hídrico simplificado de Thorntwaite & Matter (1955). Foram calculados os balanços hídricos históricos (ou médios) para as áreas de estudo. Foram usados dados de inventário florestal do período 1986 a 1995 para os principais clones plantados nas regiões dos municípios de Aracruz e São Mateus, ES, abrangendo 56,5% da área total plantada pela empresa no Estado, para todos os tipos de solos mais importantes, equivalente à 64,3% da área total.

As áreas plantadas apresentam, na média, condições hidrológicas muito favoráveis ao crescimento da plantação de Eucalipto. Na região de Aracruz, chove em média 1.380 mm (29 anos de dados); a evapotranspiração potencial é 1.329 mm, e o déficit hídrico é cerca de 77 mm anuais. Ocorre excedentes hídricos da ordem de 125 mm permitindo manter água disponível no solo e alimentar periodicamente o lençol freático. Em São Mateus (19 anos de dados), a precipitação sobe a 1.427 mm. A evapotranspiração potencial passa a 1.468 mm como resultado de temperaturas médias mensais mais elevadas. Os solos apresentam menores valores da Capacidade de Água Dispo-

nível (CAD) (80 mm contra 100 mm para Aracruz) verifica-se que o déficit hídrico sobe para 105 mm e o excedente cai para 65 mm, com menos recarga do lençol freático. A CAD foi estimada considerando as características físicas dos solos e da profundidade média das raízes dos plantios de eucalipto da empresa.

Na análise de tendência isolando-se as idades, tratando-se os clones em conjunto, foi possível constatar uma tendência consistente de redução no crescimento com o aumento do déficit hídrico para as idades analisadas (3, 4, 5 e 6 anos). Observou-se que aos 6 anos, o déficit de água no solo influencia mais o crescimento das plantações de eucalipto de que aos 5, 4 e 3 anos, nesta ordem, considerando o potencial de crescimento para estas idades. Em termos relativos, para um déficit de água no solo de 600 mm (classe dos valores mais elevados encontrados neste estudo), o Incremento Corrente Anual (ICA), sofre, em média, um decréscimo de 30% aos 3 anos e de 50% aos 6 anos.

A correlação entre ICA e Déficit hídrico no solo mostrou-se melhor que aquela entre ICA e precipitação. É óbvio que déficit hídrico e precipitação são correlacionados; quanto maior a precipitação ocorrida num hidroperíodo menor o déficit hídrico correspondente. Entretanto, o déficit hídrico insere o efeito do meio de armazenamento de água, o solo, no seu cômputo. Quando o solo está saturado a precipitação excedente é perdida por deflúvio superficial ou drenagem profunda, não estando portanto disponível para os processos de fotossíntese e de transpiração.

**Palavras chave:** déficit hídrico, crescimento, balanço hídrico, incremento corrente anual, eucalipto.

## ABSTRACT

This paper describes the relationship between rates of Eucalyptus plantation growth (m<sup>3</sup>/ha/yr) and the interannual hydrometeorological variability (integrated water deficit (mm)) observed within two consecutive volume measurements. The hydrometeorological variability here is expressed in terms of the water balance method by Thorntwaite & Matter (1955). Data representing 56,5% of the planted area and covering 64,3% of all soil types were analyzed. Water holding capacity of the soils were also estimated from soil texture and physical properties measurements. Data from the sites of Aracruz and São Mateus, ES were analyzed here.

The hydrological conditions of the plantation areas, were found to be very good for Eucalyptus growth. In Aracruz, for which the mean water holding capacity, WHC, is 100 mm, the annual average rainfall is 1.380 mm, the potential evapotranspiration is 1.329 mm, the water deficit is 125 mm and the runoff is 125mm. For São Mateus, (WHC of 80 mm) the rainfall was 1427 mm, the evapotranspiration was 1468 mm, the water deficit rises to 105 mm and runoff falls to 65 mm.

The tendency analysis between volume increase and integrated water deficit was carried out for four development stages separately. It was found that the water deficit produces a reduction in volume increment at all stages, affecting older stages more than younger. For a water deficit of 600 mm (class of the highest), the reduction goes from 30% for stands aged 3 to close to 50% for 6 years-old samples.

We found a better correlation between volume growth and water deficit than the one obtained between precipitation and volume increase, as expected. Although higher precipitation rates imply smaller water deficits, the soil water holding capacity is included in its computation. When the soil is in saturated conditions, precipitation goes to the runoff compartment and will not become

available to the plant growth process.

**Key words:** water deficit, plant growth, water balance, annual volume increment, *Eucalyptus*.

## 1. INTRODUÇÃO

Em várias partes do mundo tem surgido controvérsia sobre o efeito ambiental e social dos plantios de eucalipto em larga escala, para utilização industrial. Um ponto chave nesta questão é do ponto de vista hidrológico, com relação ao uso da água pela plantação de eucalipto. Sabe-se que o crescimento das árvores é consequência de vários processos fisiológicos que ocorrem compelidos pelas várias condições ambientais e características genéticas das espécies.

Para discutir o efeito do regime hídrico nos processos fisiológicos em árvores, seria necessário entender como os déficits hídricos atingem um nível suficiente para induzir uma resposta negativa na árvore. O déficit hídrico pode se desenvolver a partir de: a) um decréscimo no potencial hídrico do solo, que estabeleça o potencial máximo que a árvore pode alcançar; e b) um aumento na demanda atmosférica e/ou resistência ao fluxo de água do solo para a atmosfera. Portanto, déficit hídrico pode ser formado a partir de um declínio de umidade no solo (resposta longa) e a partir de um esgotamento de água em torno da raiz (resposta curta). No presente trabalho, foi considerado o primeiro caso, onde a profundidade e textura do solo determinam sua capacidade de retenção de água, e a quantidade de entrada de água via precipitação, podem influenciar a frequência, severidade e duração do déficit hídrico.

Em resumo, trata-se, neste trabalho, de avaliar o efeito da variabilidade hidrometeorológica interanual, sintetizada pelo déficit hídrico no solo, sobre o crescimento volumétrico corrente de plantações de eucaliptos.

## 2. MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO

### 2.1 - Método de Thorntwaite.

O método de Thorntwaite para estimativa de Evapotranspiração Potencial mensal (EP) pode ser descrito como:

$$EP = 16 \left( \frac{l_1}{12} \right) \left( \frac{N}{30} \right) \left( \frac{10T}{I} \right)^{a_1} \quad (1)$$

em que:

$l_1$  é o comprimento médio do dia (h),  
 $N$  é o n.º de dias do mês,  $T$  é a temperatura média mensal do ar (°C) e  $a_1$  é definido como:

$$a_1 = \frac{6.75 \times 10^{-7} P^2 - 7.71 \times 10^{-5} P + 1.79 \times 10^{-2}}{I + 0.49} \quad (2)$$

onde  $I$  é um índice anual de calor, obtidos a partir de:

$$I = \sum_{m=1}^{12} \left( \frac{T_m}{5} \right)^{1.514} \quad (3)$$

As vantagens do método de Thornthwaite advém do fato de que o mesmo é baseado na correlação entre temperatura e radiação e de que requer apenas temperatura média mensal como entrada; a longo termo  $T$  e  $ET$  são funções similares de radiação líquida ( $R_n$ ) e são autocorrelacionadas. As desvantagens são inerentes ao método, ou seja, a simplificação assumida de se utilizar temperatura como parâmetro para quantificar a energia disponível para conversão em calor latente. O método pode subestimar  $ET$  nos meses de máxima Radiação Líquida,  $R_n$ , e para períodos curtos a temperatura média pode não significar uma boa medida da radiação.

## 2.2. O balanço hídrico de Thornthwaite-Matter

Neste estudo faz-se uso do método de Thornthwaite-Matter de 1955 para cômputo do balanço de água no solo, haja vista que historicamente apenas dados de temperatura e de precipitação estão disponíveis para as regionais de plantio de eucaliptos da Aracruz Celulose S.A.

Neste método, a capacidade de campo (capacidade máxima de armazenamento de água no solo) e a taxa de utilização de umidade do solo para evapotranspiração dependem da profundidade, do tipo e da estrutura do solo. Existem na natureza consideráveis variações na capacidade de armazenamento d'água pelos solos. Assim, definiu-se a capacidade de água disponível,  $CAD$ , do perfil do solo em função da profundidade de exploração das raízes,  $p_z$ , e das características físicas do solo: capacidade de campo,  $\theta_{CC}$ , ponto de murcha  $\theta_{PM}$  e densidade aparente,  $d_a$ . Para cada camada do solo de profundidade  $z$  (até o limite para  $z = p_z$ ),  $\theta_{CC}$ ,  $\theta_{PM}$  são obtidos pela curva de retenção de umidade para os valores de 1/3 atm e 15 atm, nesta ordem, podendo ser expressos em porcentagem em peso, ou volume, de água contida no solo. Para cada camada de solo de profundidade  $z$  até o limite da profundidade das raízes, quando os valores de retenção são dados em porcentagem em volume, pode-se assumir a seguinte expressão:

$$CAD = \frac{\theta_{cc} - \theta_{PM}}{100} \cdot z \quad (4)$$

em que  $CAD$  é obtido em mm, quando  $z$  é também expresso em mm. A  $CAD$  total do perfil do solo é a soma das  $CADs$  de cada camada até  $z = p_z$ . Se os valores de retenção forem expressos em porcentagem em peso, os valores obtidos pela equação 13 devem ser multiplicados pela densidade aparente,  $d_a$ , em  $g/cm^3$ .

Quando ocorre um aumento na tensão de água no solo, a evapotranspiração real,  $ER$ , sofre declínio. Neste método  $ER$  é igual a  $EP$  se o armazenamento de água no solo for máximo (igual a  $CAD$ ) ou se a precipitação no mês for maior que a evapotranspiração potencial,  $EP$ . Nos casos em que a água disponível no solo é menor que seu valor máximo e  $P-EP$  é negativo,  $ER$  é dada pela precipitação do mês somada a alteração no estoque de água no solo. Usa-se a seguinte relação exponencial entre armazenamento d'água no solo,  $CAD$  e perda

d'água acumulada:

$$ARM = CAD \cdot e^{\left( \frac{NA_c}{CAD} \right)} \quad (5)$$

em que  $NA_c$  é a perda d'água acumulada, ou Negativo Acumulado, que é a soma dos valores negativos acumulados de  $P-EP$ .

Para se computar o balanço, foram desenvolvidas duas versões de código em FORTRAN 77:

1. a primeira realiza os balanços para um período de 1 ano (12 meses) ou mais, com início sempre em Janeiro, considerando os valores médios mensais de temperatura e de precipitação;

2. a segunda versão foi desenvolvida para realizar balanços contínuos ao longo do tempo, de 12 meses ou mais, de maneira que hidroperíodos completos são computados, ou seja, o que ocorre em termos de saída de água do sistema ( $ER$ , alteração no estoque, e excedente, quando for o caso) no mês de janeiro de determinado ano leva em conta o estado do sistema no mês de dezembro anterior.

É importante ressaltar que este método não leva em conta o uso diferenciado de água em função do tipo de vegetação presente. O solo, ao atuar como reservatório de água, regula o processo de evapotranspiração, de forma que, o déficit hídrico (diferença entre  $EP$  e  $ER$ ) relaciona-se melhor aos processos fisiológicos do sistema vegetal presente que a precipitação, que pode escoar para fora do sistema solo-planta por deflúvio superficial ou percolação profunda, quando a água armazenada no solo estiver na sua  $CAD$  e a precipitação superar a demanda evaporativa. Para exemplos de balanço hídrico, ver Camargo (1975), Galvão (1966), ICRISAT (1980), Matter (1974), Almeida e Soares (1996), descrevem em detalhes a metodologia de balanço hídrico pelo método de Thornthwaite-Matter (1955) e sua adaptação para períodos contínuos.

## 3. METODOLOGIA

Foram inicialmente computados os ba-

lanços históricos para as regiões de Aracruz e São Mateus, para estabelecimento dos padrões de referência. Foram usados 29 anos de dados para a regional de Aracruz e 21 anos para a regional de São Mateus. Com este procedimento, tem-se a média do que ocorre nestas regionais em termos climáticos, com a consequente estimativa do déficit hídrico médio ou das variações médias dos estoques de água ao longo do ano. Como o que se busca é a relação entre déficit hídrico e crescimento volumétrico, é necessário estabelecer a condição média padrão de déficit hídrico.

Foram computados os balanços hídricos contínuos do período 1986 - 1996 para todas as microregiões de influência dos vários postos meteorológicos das duas regiões capixabas: no total são 9 postos da região de Aracruz e 5 postos da região de São Mateus. Foram considerados os solos mais representativos no cálculo da capacidade de água disponível.

A análise considerou quatro classes de idades separadamente: 2 a 3 anos, 3 a 4 anos, 4 a 5 anos e 5 a 6 anos. A análise foi realizada a partir dos dados de ICA X déficit hídrico acumulado nos doze meses entre duas medidas biométricas para cada parcela amostral associada ao posto meteorológico mais próximo. Por exemplo, a um ICA de abril de 1993 para determinado clone e classe de idade, associou-se o balanço hídrico de abril de 1992 a março de 1993. Para cada parcela é associado o tipo de solo e a  $CAD$  correspondente. Os dados de inventário correspondem ao período 1988-1995.

A área ocupada pelos clones aqui analisados representa 59,45% da área total plantada na empresa no ES. Os dados de incremento corrente anual foram obtidos em 484 parcelas permanentes na região de Aracruz (37% do total) e 419 parcelas na região de São Mateus (31% do total).

Nestas mesmas regiões foram considerados os principais tipos de solo na obtenção das  $CADs$  que são constituídos basicamente por diferentes tipos de solos Podzólicos Amarelos e Latossolos representando 64,39% da área total de plantio da Aracruz Celulose S.A. no Estado.

A análise da relação entre ICA e déficit

hídrico é feita assumindo-se uma relação linear e negativa (decréscimo de ICA com aumento do déficit hídrico), quantificada pelo cálculo do coeficiente de correlação,  $r$ .

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

##### 4.1. Balanços hídricos históricos para as regiões de Aracruz e São Mateus

A FIGURA 1 apresenta o balanço hídrico histórico para as regiões de Aracruz (esquerda) e São Mateus (direita). Trata-se de um

excelente clima para crescimento de eucalipto.

Verificou-se que choveu em média 1.380 mm em Aracruz; a evapotranspiração potencial é 1.329 mm, e o déficit hídrico foi de cerca de 77 mm anuais, valores muito baixos para provocar declínio no crescimento de plantações de eucalipto. Além disto, os excedentes hídricos da ordem de 125 mm permitem manter água disponível no solo e alimentar periodicamente o lençol freático.

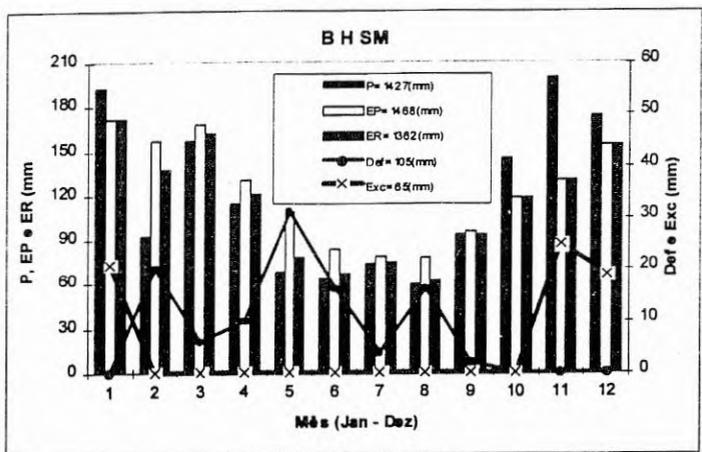
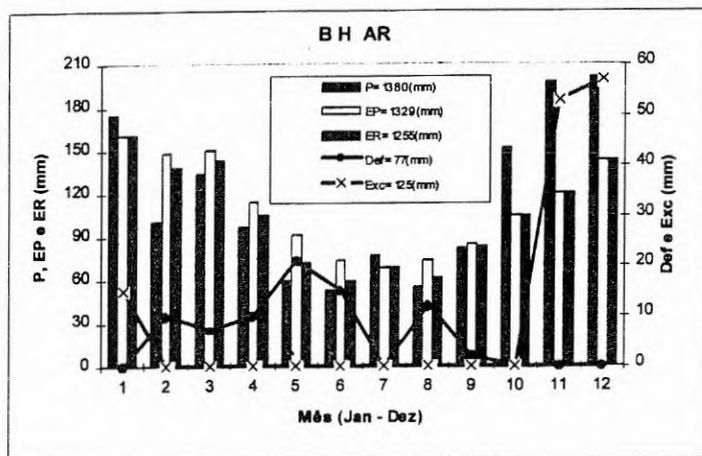


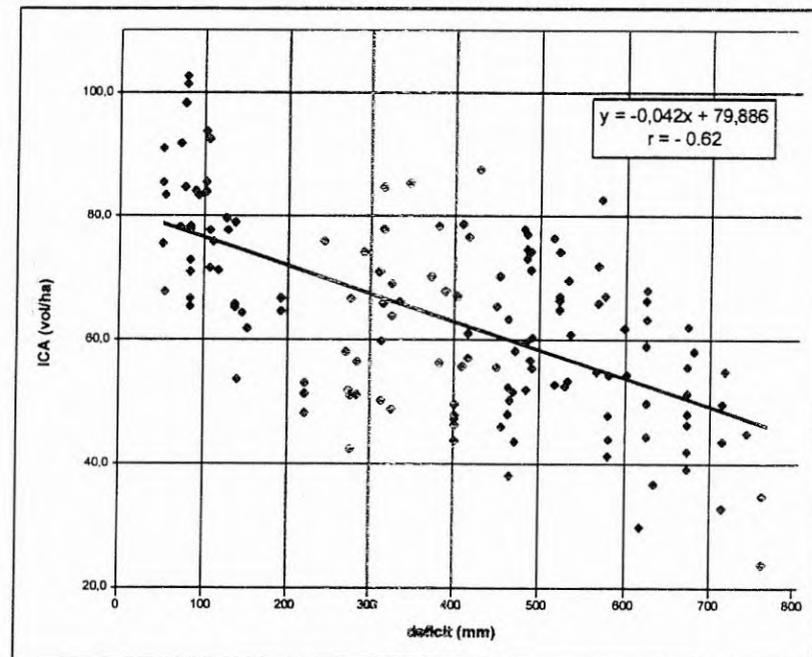
FIGURA 1. Balanço histórico para a Região de Aracruz.(esquerda) e São Mateus (direita)

Comparando-se o balanço histórico para a região de São Mateus, ES (21 anos de dados) ao da regional Aracruz, foi verificado que o déficit hídrico sobiu para 105 mm, para uma CAD de 80 mm. Choveu mais, a precipitação média foi de 1.427 mm. A EP passa a 1.468 mm como resultado de temperaturas médias mensais mais elevadas, e o excedente caiu para 65 mm.

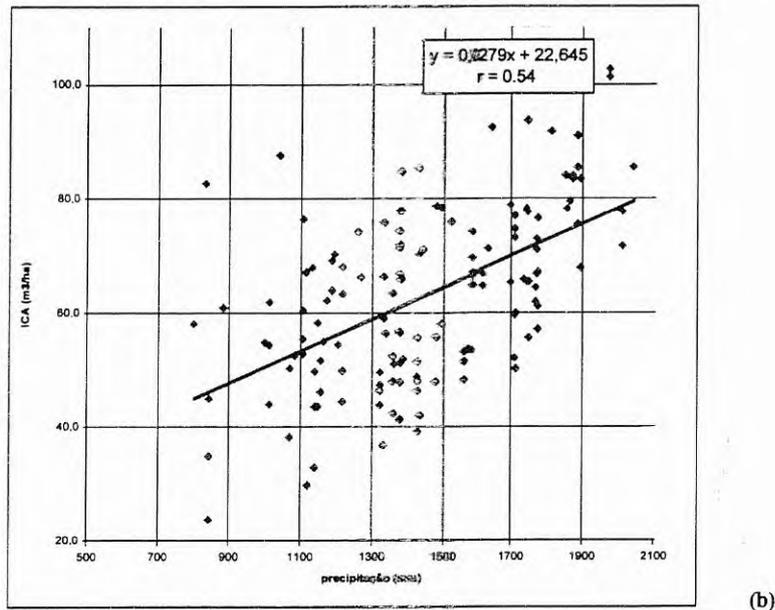
Segundo Calder (1992), taxas elevadas de transpiração resultam numa recarga reduzida do aquífero, assim como uma redução também no escoamento superficial. Entretanto, podem ocorrer excedentes em meses nos quais a precipitação ultrapassa a demanda evaporativa com o solo na sua capacidade máxima de retenção de água.

##### 4.2 Relação ente ICA, déficit hídrico e precipitação - fontes de dispersão.

A FIGURA 2 (a e b) apresenta uma comparação para as relações entre ICA x déficit hídrico e ICA x precipitação, para plantios com idade de 3 anos. A correlação entre déficit hídrico e ICA é maior que aquela existente entre precipitação e ICA, o que confirma a teoria, visto que a água usada pelas plantas no processo de transpiração e fotossíntese é aquela armazenada no solo, e não necessariamente a precipitação (entrada de água no sistema), que muitas vezes pode ser escoada por deflúvio lateral ou drenagem profunda, portanto indisponível ao crescimento dos plantios. Os coeficientes de correlação para 3 anos são de 0,62 e 0,54, para ICA X déficit hídrico e ICA X precipitação respectivamente. A dispersão é maior para precipitações superiores a 1.600 mm, como esperado (excedentes não usados nos processos físicos de transpiração/fotossíntese).



(a)



(b)

FIGURA 2. Relação entre ICA e déficit hídrico (a) e entre ICA e precipitação (b) de Aracruz e São Mateus, para plantios de eucaliptos com 3 anos de idade.

Embora as curvas de tendência que mostram declínio no crescimento com a elevação do déficit hídrico, sejam consistentes, os valores de coeficiente de correlação refletem uma dispersão elevada dos pontos. As principais fontes de dispersão entendidas como fatores que afetam o crescimento e que não são objetos deste estudo, são descritas na seqüência:

- dados de ICA tomados para clones de determinada classe de idade são associados a valores de déficits hídricos obtidos em diferentes anos ao longo do período analisado (1989-1995), portanto submetidos a diferentes condições de desenvolvimento;
- uso de número reduzido de perfis de solo para estabelecimento de suas CADs. Desvios na estimativa de CADs, implicam em fonte de dispersão;
- dados de ICA tomados para todos os clones refletem diferenças inerentes ao material genético;

- diferentes condições a que possam ter sido submetidas as mudas dos diferentes clones/áreas pode influenciar no crescimento;
- algumas áreas são rebrotadas após o corte, enquanto que outras são áreas reformadas (novo plantio).

**4.3 Análise de tendência ICA X Déficit hídrico considerando todos os clones por classe de idade**

As equações obtidas e os respectivos coeficientes de correlação estão na TABELA 1. Para as classes de idade 3 e 4 anos a declividade é bastante semelhante, variando de - 4.2 m³/ha (de decréscimo de ICA) para cada 100 mm (de incremento) de déficit hídrico para 3 anos a - 4.4 m³/ha/100 mm para 4 anos. Da mesma forma, para as classes de 5 e 6 anos as declividades são equivalentes, de - 5.4 m³/ha/100 mm.

TABELA 1. Análise de tendência linear por idade entre ICA e déficit hídrico para todos os clones em conjunto, com os respectivos coeficientes de correlação.

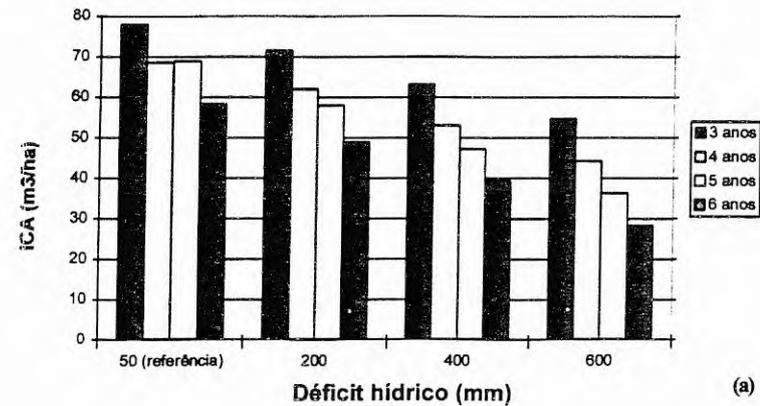
classe de idade	equação (y=ICA (vol/ha), x= déficit hídrico (mm))	coeficiente de correlação
3 anos	y = -0.042x + 79.886	r = - 0.62
4 anos	y = -0.043x + 70.506	r = - 0.54
5 anos	y = -0.054x + 68.712	r = - 0.57
6 anos	y = -0.054x + 60.851	r = - 0.63

A FIGURA 3 apresenta valores de declínio na produtividade considerando um déficit de 50 mm como referência padrão e déficits de 200 mm, 400 mm e 600 mm, relacionados às idades de 3 a 6 anos (em termos absolutos, à esquerda, e relativos, à direita). Os desvios relativos mostram que em situações de déficit acentuado (600 mm neste exemplo), pode ocorrer um decréscimo de ICA de 30% em relação a condição ótima (50 mm, referência) para a idade de 3 anos e de até 50% para a idade de 6 anos. Dois fatores são aventados para explicar este resultado:

1. medidas realizadas em Aracruz mostram que o índice de área foliar atinge seu valor máximo aos 3 anos, da ordem de 3.0, caindo aos 6/7 anos para 2.0.

Consequentemente, a partição de radiação e de momentum ocorre de maneira diferenciada, de forma que na idade de 6 anos tem-se mais radiação (da ordem de 50% a mais) penetrando o dossel, o que implica que a evaporação na superfície do solo passa a ser maior reduzindo o estoque de água.

2. aumento da resistência ao fluxo de água e conseqüentemente redução de ABA ("Abisinsic Acid", que é formado no solo e levado às folhas com a água) em plantas mais velhas, limitando o controle estomático de transpiração. Assim, o fechamento dos estômatos, em função do déficit hídrico no solo, seria retardado, induzindo alterações no metabolismo, como a limitação não estomática de fotossíntese.



(a)

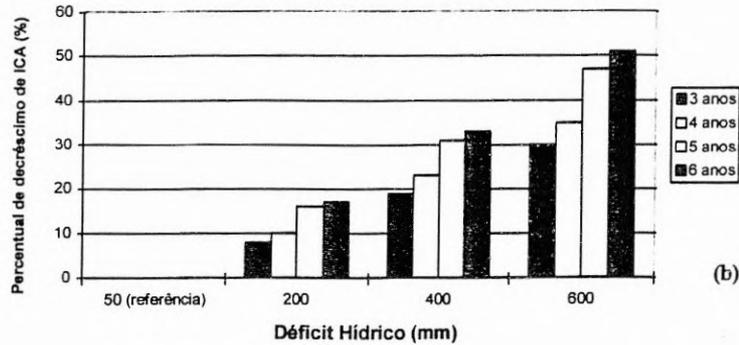


FIGURA 3. Relação de ICA e Déficit Hídrico (a) valores absolutos e (b) valores relativos, para todos os clones analisados para as idades de 3 a 6 anos, para valores de déficit de 50 mm, 200 mm, 400 mm e 600 mm.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- Mesmo podendo ocorrer déficits hídricos da ordem de 600 mm por ano, as regiões de Aracruz e São Mateus no ES apresentam condições hidrológicas excelentes para o plantio de eucalipto e outras espécies florestais de crescimento rápido.
- Existe uma tendência consistente de redução no crescimento com o aumento do déficit hídrico para todas as idades (3, 4, 5 e 6 anos). Aos 6 anos, o déficit de água no solo influencia mais o crescimento que aos 5, 4 e 3 anos nesta ordem. Em termos relativos, para um déficit de água no solo de 600 mm, o ICA, sofre, em média, um decréscimo de 30% aos 3 anos e de 50% aos 6 anos, em relação ao potencial de crescimento em condições hidrológicas representadas pela média histórica.
- A correlação entre ICA e déficit hídrico no solo mostrou-se melhor que aquela entre ICA e precipitação pluviométrica. O déficit hídrico insere o efeito do meio de armazenamento de água do solo, no seu cômputo. Para períodos em que a precipitação ultrapassa a capacidade de retenção de água do solo, ocorrem excedentes. Portanto, trabalhar com variáveis de balanço hídrico que levem em conta a quantidade de água no solo (déficit hídrico ou armazenamento) constitui vantagem considerável quando se procura estudar a relação entre água e crescimento de florestas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, A.C, J.V. Soares, 1996. Análise da influência da variabilidade hidrometeorológica interanual no crescimento de plantações de eucalipto da Aracruz Celulose S.A. - Relatório final, Revisão 2, Relatório interno da Aracruz Celulose S.A..
- Calder, I.R., 1992. Water use of Eucalypts-a review. In: Calder, I.R., Hall, L.R., P.G. Adlard (Eds). Growth and Water Use of Forest Plantations. John Willey, West Sussex. 381 pp.
- Camargo, A. Paes de. 1975. Estão plantando um deserto? In: O Eucalipto e a ecologia. Publicação Aracruz Celulose S.A.
- Galvão, M.V., 1966. Atlas Nacional do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE - Conselho Nacional de Geografia.
- ICRISAT - 1980, International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics. Climatic Classification: A consultants' Meeting, 14-16 April, 1980, ICRISAT Center, Patancheru, A.P. 502324, India. 153 p.
- Matter, J.R., 1974. Climatology: fundamentals and applications. New York: McGraw-Hill, 472 p.

Thorntwaite, C.W., J.R. Matter. 1955. The water balance. *Climatology* 8:1-104.

Whitehead, D., P. G. Jarvis. 1981. Coniferous forests and plantations, In: Koslowski, T. T. Ed., Water deficits and plant growth, Volume VI, Woody Plant Communities. Academic Press, New York, 582p.