

AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO HÍDRICA DA CULTURA DO MILHO ATRAVÉS DE SENSORIAMENTO REMOTO TERMAL¹

JOSÉ CARLOS NEVES EPIPHANIO²

RESUMO - É apresentada uma metodologia de utilização de sensoriamento remoto na faixa espectral do infravermelho termal (8-14 μ m) para detecção de estresse hídrico na cultura do milho (*Zea mays* L.). Através da coleta horária da temperatura radiante de dossel e da temperatura do ar, durante o período reprodutivo da cultura, derivou-se um índice que expressa as diferentes condições hídricas a que a cultura foi submetida. Com esse índice são estabelecidas correlações com a produtividade afetada pelo déficit hídrico. Também é feita uma discussão sobre os horários mais adequados às leituras, de acordo com a finalidade desejada. Os resultados mostraram que a metodologia apresentada é eficiente para os objetivos propostos.

Termos para indexação: faixa espectral, infravermelho, estresse hídrico, déficit hídrico.

EVALUATION OF CORN WATER CONDITION: A THERMAL INFRARED REMOTE SENSING APPROACH

ABSTRACT - A methodology that uses remote sensing data in the thermal infrared spectral band (8-14 μ m) to detect water stress in corn (*Zea mays* L.) is presented. Using hourly canopy radiant temperature measured with a PRT-5 radiometer and air temperature during a crop reproductive period, an index that can be used to show the different water conditions at each experiment plot was derived. This index is correlated with corn yield, and a discussion about the better time of data recording was made. The results showed that the methodology used is efficient for all the proposed objectives.

Index terms: spectral band, infrared, water stress, water deficiency.

INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto é um conjunto de técnicas que permitem a extração de informações a distância sobre alvos de interesse, através da avaliação da energia eletromagnética absorvida, refletida, transmitida ou emitida por esses alvos.

Embora a gama de comprimentos de onda que envolve energias do mesmo tipo - energia eletromagnética - seja imensa, apenas determinadas porções do espectro eletromagnético são utilizadas para o sensoriamento remoto (Fig. 1). Cada uma dessas porções envolve diferentes tipos de interações energia-matéria. A detecção da energia proveniente dessas interações é feita por diferentes instrumentos sensores.

Assim, na faixa do visível e infravermelho próximo, a energia que é detectada é basicamente a energia solar refletida pelo objeto. Na faixa das microondas tem-se, por exemplo, o radar onde a energia detectada também é a refletida pelo obje-

to, porém a fonte de energia já não é mais o sol, e sim o próprio radar. Na faixa do infravermelho termal, a energia é a emitida pelo corpo, devido unicamente à temperatura; quanto maior for a temperatura maior a quantidade de energia emitida (Lillesand & Kieffer 1979).

Os instrumentos de detecção da energia na faixa do infravermelho termal (8-14 μ m) são denominados radiômetros. Esses radiômetros de infravermelho podem ser operados no campo, a bordo de avião ou através de satélite. A maior parte dos trabalhos voltados para a agricultura são realizados com instrumentos de campo. As perspectivas de utilização de sensoriamento remoto abrangem várias áreas de aplicação, como umidade de solo (Price 1980), irrigação (Lucht 1980), evapotranspiração (Blad et al. 1976) e previsão de safras (Idso et al. 1978).

Os estudos voltados para a agricultura baseiam-se na medida remota da temperatura radiante de dossel. Essa temperatura não é a temperatura real da planta, pois é dependente da emissividade do dossel. Porém, para vegetação, a emissividade é alta e, além disso, quando em comunidade, como é o caso de um campo de cultivo, a emissividade aproxima-se muito de 1,0 segundo Jackson et al.

¹ Aceito para publicação em 25 de outubro de 1983.

² Eng.^o Agr.^o, M.Sc., Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), Caixa Postal 515, CEP 12200 - São José dos Campos, SP.

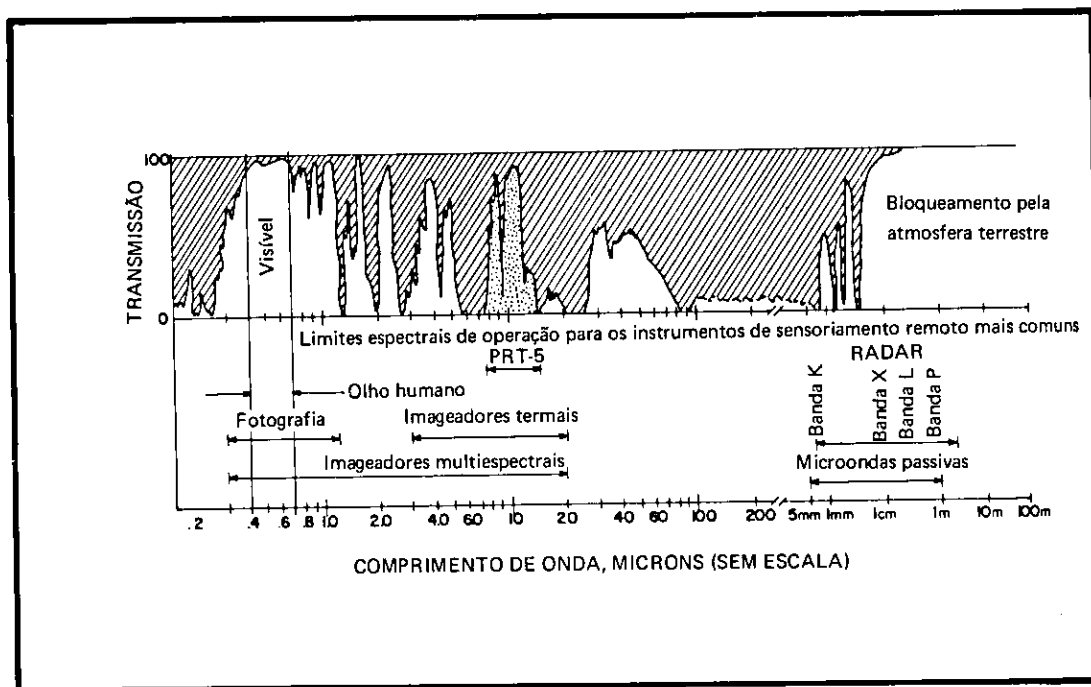


FIG. 1. Espectro eletromagnético, absorção atmosférica e faixas de operação dos sensores.
Fonte: Marchetti & Garcia (1977).

(1977) e Sutherland & Bartholic (1977), o que dispensa correções da leitura feita com o radiômetro. Portanto, para fins agrícolas a temperatura radiante pode ser considerada bem próxima da temperatura real. A temperatura de dossel pode fornecer informações de grande interesse sobre a condição hídrica da planta.

No Brasil, excetuando as condições extremas, o principal fator controlador do desempenho da agricultura, num ano agrícola, é a distribuição pluviométrica. A planta, sendo um organismo vivo e tendo seu desenvolvimento na interface solo-atmosfera, está sujeita às variações ocorridas tanto num meio quanto no outro. Como expõe Slatyer (1967), a planta é muito mais susceptível a alterações hídricas que a alterações térmicas. Quando em presença de grande demanda hídrica atmosférica ou de baixa disponibilidade de água pelo solo, a planta dispara seu principal mecanismo de controle de perda de água, que é o fechamento estomatal (Reichardt & Libardi 1976).

Entretanto, o acionamento desse mecanismo desencadeia uma série de processos prejudiciais,

tais como a queda da atividade fotossintética, pelo impedimento de entrada de CO_2 , e o aumento da temperatura da folha, pela retração do resfriamento evaporativo pela água. Esse aumento da temperatura pode ser da ordem de vários graus centígrados, dependendo da cultura e das condições de oferta e demanda de água pelo sistema solo-atmosfera (Gates 1980).

Wiegand & Namken (1966), mostraram que a temperatura foliar elevava-se acima da temperatura do ar quando a planta estava com deficiência hídrica. Ehrler et al. (1978) e Scott et al. (1981), entre outros, encontraram relações inversas entre o potencial de água na folha e a temperatura foliar, o que indica a forte relação existente entre condição hídrica e temperatura foliar.

Os radiômetros de infravermelho são instrumentos altamente sensíveis às variações de temperatura - da ordem de $0,1^\circ\text{C}$ - e são capazes de acusar as diferenças de temperatura existentes entre as parcelas que estejam sob diferentes condições hídricas. Como a temperatura da planta, num dado instante, pode estar sofrendo influência de fatores

meteorológicos, é necessário comparar a temperatura da planta com parâmetro representativo do balanço entre esses fatores atmosféricos. Idso et al. (1976) mostram que a temperatura do ar é o parâmetro mais indicado para servir como referencial.

Assim, pode-se, a partir da estreita relação existente entre temperatura foliar e deficiência hídrica, investigar um grande número de aplicações agrícolas, utilizando essa relação e as metodologias de sensoriamento remoto que estão sendo desenvolvidas.

No presente trabalho, parte-se da utilização da temperatura radiante de dossel e da temperatura do ar para avaliar a queda de produtividade do milho (*Zea mays* L.) relacionada à deficiência hídrica.

Esse tipo de abordagem tem suas raízes na assertiva de Baier & Robertson (1968) de que as produções são muito mais relacionadas com a umidade de solo que com variáveis meteorológicas, como precipitação e temperaturas máximas e mínimas. Também Nix & Fitzpatrick (1969) chegaram à conclusão de que melhores resultados para estimativas de produção eram obtidas quando se levavam em consideração as condições de suprimento de água para a planta.

A partir daí surgiram índices de estresse baseados na demanda e na oferta de água para a planta (Nix & Fitzpatrick 1969, Hiler & Clark 1971). Idso et al. (1977) partindo da suposição de que a temperatura foliar fosse representativa do balanço entre a oferta de água pelo solo e a demanda atmosférica de água e, portanto, da condição hídrica da planta num dado momento, estabeleceram um índice de estresse baseado nas temperaturas da planta e do ar e o correlacionaram com a produção de trigo, obtendo bons resultados.

Vários autores utilizaram-se dessa metodologia para estudar várias culturas. No Brasil, onde as condições hídricas são de grande importância no desempenho produtivo de um ano agrícola, o desenvolvimento desse trabalho surge como tentativa de familiarização com a metodologia além da procura de outros aspectos que possam melhorá-la.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido num Latossolo Vermelho-Escuro, na Estação Experimental do Centro de Pesquisas Agropecuária dos Cerrados (CPAC-EMBRAPA), cujas coordenadas de sua estação climatológica principal são 15°35'30"S e 47°42'30"W. A precipitação média anual é de 1.570 mm, concentrada principalmente nos meses de outubro a março.

Foi utilizada a cultura do milho plantada no dia 09.06.81, no espaçamento de 0,80 m x 0,20 m, sofrendo o terreno adubações normais de correção e cultivo. As parcelas foram em número de doze e tinham dimensões de 9,6 m x 12,0 m. Para obter produtividades variadas escalonaram-se as irrigações no período reprodutivo do milho, que é o mais susceptível a déficits hídricos (Hiler et al. 1974). Até o florescimento todas as parcelas receberam irrigações normais; a partir daí, iniciou-se o escalonamento do seguinte modo: no dia 10.09, somente a parcela de número sete foi irrigada; em 16.09, as de número sete e oito; em 23.09, as de número sete, oito e nove; em 30.09 e 01.10, as parcelas sete, oito, nove e dez. Porém, nesta última data, as condições do tempo alteram-se, cessando as irrigações.

As irrigações foram feitas nos sulcos das parcelas, através do sistema de tubo janelado. O critério adotado foi o de fazer a irrigação, semanalmente, por um tempo de 4 a 6 horas. No final do experimento, as parcelas foram colhidas, eliminando-se as bordaduras. Fez-se a pesagem dos grãos e a determinação do teor de umidade. De posse do teor de umidade e do peso de grãos por parcela, foi feita uma correção dos pesos para a umidade padrão de 13,5%; esses valores foram, então, transformados em kg/ha.

Temperatura das plantas

Para as leituras de temperatura de dossel (Td) do milho utilizou-se o radiômetro de infravermelho termal Precision Radiation Thermometer (PRT-5)³.

O PRT-5 consiste num sistema sensor e num sistema registrador, os quais são interconectados por cabos de força. O sistema sensor compara continuamente a quantidade de energia emitida pelo alvo com a quantidade de energia emitida por uma fonte interna de referência.

O sistema registrador processa essa comparação numa voltagem que é diretamente relacionada com a diferença de energia entre o alvo e a referência. Essa voltagem é mostrada num painel frontal, em termos de temperatura radiante, em °C. Esse instrumento é projetado para fornecer leituras de temperatura radiante precisas e estáveis na faixa de -20 a +70°C. Tem precisão de 0,5°C, sensibilidade de 0,1°C e tempo de resposta de 5 a 500 milissegundos na faixa de comprimento de onda do infravermelho termal (8-14 μm). O sistema sensor permite que se opere com ângulos de visada de 2 ou 20° (Barnes Engineering 1970).

Na Fig. 2, é apresentado um esquema completo do equipamento de leitura. Para que não houvesse desvio de

³

O INPE não endossa ou recomenda o uso de qualquer marca, produto ou equipamento, unicamente por seus nomes estarem citados ou incluídos nesta publicação.

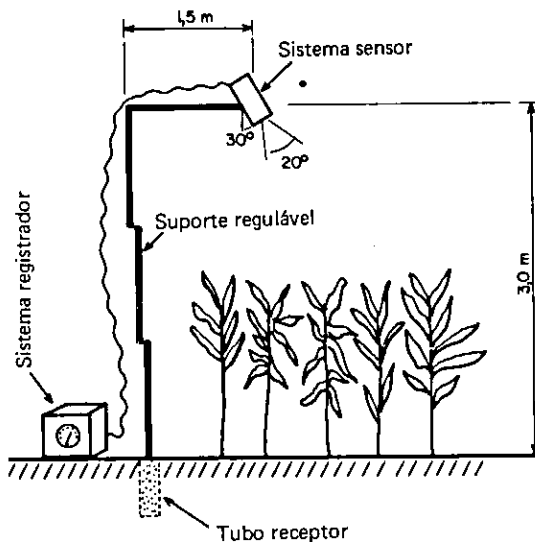


FIG. 2. Esquema do equipamento completo de leitura da temperatura das plantas ou de dossel (fora de escala).

localização do equipamento quando as leituras tivessem de ser repetidas sobre a mesma parcela, selecionou-se um local fixo em cada parcela, em posição semelhante a todas. Quando se realizavam as leituras, o suporte era colocado no local fixado e, assim, mantinha-se sempre a mesma localização do equipamento.

Para evitar que diferentes ângulos de observação em relação ao sol pudessem interferir nas medidas e prejudicar a comparação entre as parcelas, os locais de fixação do tubo receptor foram determinados de modo que todas as visadas, em todas as parcelas, fossem feitas sob o mesmo ângulo em relação ao sol. As visadas com o PRT-5 foram tomadas a 3 m de altura do solo, e a unidade óptica desviada da vertical de um ângulo aproximado de 30°. Esse desvio do sistema sensor teve por finalidade diminuir a influência do solo na resposta e aumentar a área de interceptação de folhas pelo campo de visada do aparelho.

Em um ciclo completo de leituras, tomava-se a temperatura de dossel três vezes. Durante o período de leituras (05.09.81 - 05.10.81), foram realizados 252 ciclos de leituras. Os horários abrangidos pelas leituras foram desde 7 até 16 horas. Às vezes, mais de um ciclo era realizado dentro do intervalo de uma hora completa (por exemplo: 8 - 9 horas, 10 - 11 horas). O número de dias em que houve leituras para determinada hora é variável, pois durante um dia nem sempre se obtinham leituras em todos os horários.

Índice diário de déficit (IDD) e fator de déficit total (FDT)

Antes de definir o índice diário de déficit (IDD) e o fator de déficit total (FDT), é necessário fazer uma alusão às premissas do trabalho. Inicialmente, há o fato de

que a planta com deficiência hídrica sofre um decréscimo na sua produção potencial. O segundo fato é que a deficiência hídrica causa uma elevação da temperatura foliar, o que pode ser detectado por sensoriamento remoto termal.

Também se espera que quanto mais tempo perdurar um estado de deficiência hídrica, maior será a diferença entre a produção potencial e a produção obtida. Paralelo a este fato está o de que a diferença entre a temperatura de dossel e a do ar ($T_d - T_a$) será maior e estará presente por mais tempo.

Assim, Idso et al. (1977) definiram como "stress degree day" a diferença entre a temperatura do dossel e a do ar, às 14 horas. Porém essa fixidez de horário não permite que os outros horários sejam analisados. Assim, no presente trabalho, o índice diário de déficit (IDD) para determinado horário foi definido como o valor da diferença entre a temperatura de dossel e a do ar atribuído a uma parcela num dia, para aquele determinado horário.

Quando se realizava a tomada da temperatura de dossel, anotava-se o horário para posterior obtenção da temperatura do ar das cartas de registro contínuo da Estação Meteorológica do CPAC, localizada a 300 m do experimento. O índice diário de déficit (IDD) para determinado horário e determinada parcela foi considerado a média aritmética de todas as diferenças entre temperatura de dossel (T_d) e temperatura do ar (T_a) daquele horário e parcela.

De posse dessas assertivas, passa-se a definir o fator de déficit total (FDT). Assim,

$$FDT(H) = \sum_{i=n}^m IDD(H), \quad [^{\circ}C] \quad (1)$$

onde

FDT = fator de déficit total para a hora (H) ($^{\circ}C$);

n, m = início e término do período do ciclo vital da cultura no qual se realizam as leituras;

IDD = índice diário de déficit para a hora H ($^{\circ}C$).

Assim, o fator de déficit total representa o grau de estresse a que esteve submetida a cultura durante um determinado período do seu ciclo vital.

Portanto, quanto mais insatisfatória for a condição hídrica da planta, mais restrições a planta fará à transpiração. Com isso, a temperatura se elevará e o fator de déficit total tenderá a se elevar, acusando uma condição menos satisfatória em termos hídricos e, portanto, produtivos.

Como o fator de déficit total para cada horário é fruto do somatório de um número diferente de valores de índices diários de déficit, fica prejudicada a observação do comportamento médio de cada parcela quanto aos valores de ($T_d - T_a$) para cada horário do dia. Para que esse comportamento pudesse ser observado, foi estabelecido o índice diário de déficit médio (IDD médio) para cada horário. O IDD médio para determinado horário é obtido pela

divisão do fator de déficit total pelo número de dias em que houve observação para aquele horário.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de fator de déficit total (FDT) para todas as parcelas e horários estão apresentados na Tabela 1. Ao analisar esses resultados, tem de ser levado em conta que o número de dias que contribuiu para a formação do FDT para cada horário é variável. Assim, por exemplo, para o horário de 9 horas, têm-se 18 dias, enquanto para as 14 horas, têm-se 26. Portanto, a observação da Tabela 1 deve obedecer preferencialmente ao sentido vertical. O que se observa é que as parcelas que receberam alguma quantidade de água (sete, oito e nove) apresentam valores de FDT menores, o que indica que o estresse hídrico sofrido por essas parcelas durante o período de realização de leituras foi reduzido em relação ao restante das parcelas.

O experimento forneceu uma grande gama de valores cuja amplitude máxima de variação foi de 289,8°C, às 11 horas. Esse valor aproxima-se do encontrado por Idso et al. (1977) para trigo, às 14 horas. No presente experimento com milho, no Distrito Federal, a amplitude de variação encontrada para as 14:00 horas foi de 281,5°C.

Para a observação da variação de FDT entre as parcelas num horário, pode-se recorrer à Tabela 1 ou à Tabela 2. Consta-se que, pela manhã, ocor-

rem valores baixos de diferença de temperatura entre a planta e o ar, observando-se que, às 7 horas, todas as parcelas apresentam temperaturas de dossel inferiores à temperatura do ar. Nesta análise, foi suprimido o horário de 12 horas devido à pouca quantidade de dias de observação neste horário. A partir das 7 horas, a amplitude de IDD (Tabela 2) tende a ter um incremento acentuado até atingir o pico, às 11 horas (Fig. 3). A partir daí, inicia-se uma diminuição lenta da amplitude de IDD médio entre as parcelas até o final da tarde sem, porém, atingir o nível mais baixo das 7 horas. Numa análise individual das parcelas, o comportamento do IDD médio para os vários horários aproxima-se do comportamento de um dia observado por Ehler et al. (1978).

Assim, considerando a amplitude do IDD médio (Fig. 3), e tendo em vista a discriminação de parcelas, em diferentes temperaturas e condições hídricas, os horários de 11 horas e 13 horas apresentaram maior importância que o de 14 horas. Entretanto, este último é o mais utilizado na maioria dos trabalhos que se valem da radiometria de infravermelho termal para estudos que envolvem as relações solo-água-planta-atmosfera, como os de Gates (1964), Walker & Hatfield (1979) e Clawson & Blad (1982). O horário de 11 horas apresentou 3,0°C a mais de amplitude de IDD médio que o de 14 horas.

Para a análise da eficiência do fator de déficit

TABELA 1. Fator de déficit total (°C).

Hora	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Parcela										
1	-1,0	8,0	76,5	146,5	180,5	13,8	179,5	140,1	46,7	3,1
2	-4,4	4,7	42,6	93,1	106,3	12,1	133,0	88,1	16,4	-10,7
3	-3,4	4,9	33,9	65,2	61,1	5,7	57,7	20,5	-19,5	-29,1
4	-7,2	0,6	34,5	71,4	88,2	8,1	74,3	40,4	-10,1	-25,3
5	-1,4	16,7	78,6	150,1	173,6	17,9	201,8	138,3	34,1	-3,3
6	-2,0	14,8	75,7	157,9	197,9	20,9	202,4	141,4	38,5	-3,2
7	-8,6	-14,2	-10,8	-11,0	-22,0	-4,3	-51,9	-75,2	-73,9	-58,2
8	-5,7	-9,3	-1,6	3,6	-0,4	-3,0	-27,6	-51,0	-62,7	-49,7
9	-4,0	-1,4	12,9	30,0	25,2	3,6	-2,9	-27,1	-47,9	-37,3
10	-0,6	10,1	51,3	92,6	102,9	9,8	78,2	34,0	-22,0	-26,8
11	-2,7	28,1	119,5	225,9	238,7	21,1	208,4	142,3	27,6	-8,1
12	-3,6	14,7	92,1	213,2	267,8	30,4	234,5	206,3	78,0	29,5

TABELA 2. Índice diário de déficit médio (°C).

Hora	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Parcela										
1	-0,2	0,9	4,3	6,4	8,6	6,9	7,2	5,4	2,6	0,3
2	-1,1	0,5	2,4	4,0	5,1	6,1	5,3	3,4	0,9	-0,9
3	-0,9	0,5	1,9	2,8	2,9	2,8	2,3	0,8	-1,1	-2,4
4	-1,8	0,1	1,9	3,1	4,2	4,1	3,0	1,6	-0,6	-2,1
5	-0,4	1,9	4,4	6,5	8,3	9,0	8,1	5,3	1,9	-0,3
6	-0,5	1,6	4,2	6,9	9,4	10,5	8,1	5,4	2,1	-0,3
7	-2,2	-1,6	-0,6	-0,5	-1,0	-2,2	-2,1	-2,9	-4,1	-4,9
8	-1,4	-1,0	-0,1	0,2	0,0	-1,5	-1,1	-2,0	-3,5	-4,1
9	-1,0	-0,2	0,7	1,3	1,2	1,8	-0,1	-1,0	-2,7	-3,1
10	-0,2	1,1	2,9	4,0	4,9	4,9	3,1	1,3	-1,2	-2,2
11	-0,7	3,1	6,6	9,8	11,4	10,6	8,3	5,5	1,5	-0,7
12	-0,9	1,6	5,1	9,3	12,8	15,2	9,4	7,9	4,3	2,5
Amplitude	2,0	4,7	7,2	10,3	13,8	17,4	11,5	10,8	8,4	7,4

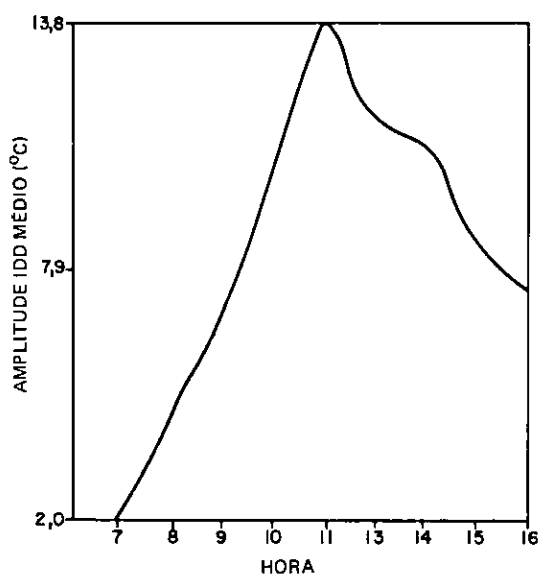


FIG. 3. Índice diário de déficit médio (IDD médio) nos vários horários do dia.

total para a avaliação da produtividade, quando influenciada pelo déficit hídrico, fez-se uso de regressões de primeiro e segundo grau utilizando os dados de FDT (Tabela 1) e produtividade (Tabela 3). Na Tabela 4 estão apresentados os resultados das regressões com os coeficientes a e b da reta e a, b e c da parábola, além dos coeficientes de cor-

TABELA 3. Produtividade do milho (kg/ha).

Parcela	Produtividade
1	1.680,6
2	1.905,6
3	2.968,8
4	1.925,7
5	1.881,3
6	1.797,2
7	3.707,6
8	4.129,9
9	3.230,6
10	2.247,9
11	2.155,6
12	1.627,8

relação correspondentes, para todos os horários. Como exemplo gráfico da relação FDT x produtividade é apresentada a Fig. 4, onde se tem o ajuste parabólico para as 14 horas, e a Fig. 5, onde se tem a relação 1:1 entre a produtividade real e a produtividade estimada pela parábola para o horário de 11 horas.

Todos os valores dos coeficientes de correlação são estatisticamente significativos ao nível de 1%, segundo Steel & Torrie (1960), exceto o horário de 7 horas. Pelos valores dos coeficientes de correlação, evidencia-se o potencial do índice

TABELA 4. Coeficientes de regressão da reta (a, b), da parábola (a, b, c) e de correlação (r).

Coeficiente	Regressão					Correlação (r)	
	Reta		Parábola			Reta	Parábola
	a	b	a	b	c		
Hora							
7	1723,62	- 192,27	1693,65	- 211,79	- 2,19	- 0,5566	- 0,5568
8	2790,18	- 54,36	2601,87	- 80,49	2,14	- 0,7452*	- 0,8525*
9	3315,60	- 17,40	3621,41	- 43,56	0,26	- 0,8038*	- 0,9286*
10	3365,24	- 8,98	3812,04	- 24,70	0,07	- 0,8111*	- 0,9377*
11	3342,74	- 7,64	3642,24	- 18,70	0,05	- 0,8425*	- 0,9388*
12	3239,29	- 70,63	3377,43	- 140,10	2,89	- 0,8486*	- 0,9336*
13	3250,26	- 7,57	3235,58	- 14,13	0,03	- 0,8891*	- 0,9277*
14	3000,47	- 8,45	2861,69	- 12,92	0,04	- 0,8890*	- 0,9372*
15	2445,22	- 16,17	2203,30	- 15,73	0,12	- 0,8966*	- 0,9403*
16	1881,45	- 30,49	1773,32	- 17,53	0,39	- 0,8717*	- 0,9312*

* Significativo ao nível de 1%.

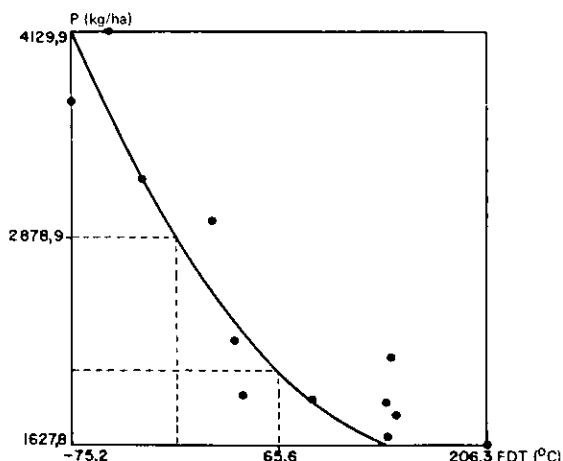


FIG. 4. Relação entre a produtividade e o fator de déficit total (FDT) (14:00 horas).

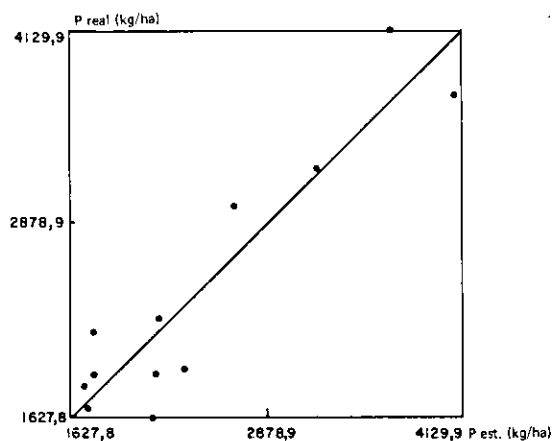


FIG. 5. Relação entre a produtividade real e a estimada pela parábola (11:00 horas).

fator déficit total como auxílio na avaliação de produtividade.

Na Fig. 4, alguns aspectos devem ser observados. Inicialmente é nítida a distribuição curvilínea dos pontos, o que se assemelha razoavelmente aos resultados obtidos por Idso et al. (1980). Outro ponto a ser observado desse comportamento não-linear é que, para atingir 50% da variação de produtividade, são necessários apenas cerca de 25% da variação de FDT, e que quando se atingem 50% da variação FDT, a variação da produtividade já

ultrapassou a marca dos 80%. Esse comportamento é mantido para todos os horários analisados. Portanto, a fase mais crítica do progresso do incremento de FDT está no início, ou seja, nos valores mais baixos.

Essa observação do comportamento FDT x produtividade assume maior importância quando se tem em mente, além da avaliação de produtividade, o acionamento de mecanismos de controle da deficiência hídrica, como a irrigação. Como o FDT é um índice que vai se acumulando diariamente,

pode-se ter a avaliação diária da condição da cultura, obtida através de sua temperatura radiante. Porém essa utilização do FDT como um indicador auxiliar no manejo de irrigação ainda está por ser estudada com mais profundidade.

Uma outra observação a ser tirada dos resultados é a de que, embora os valores de IDD médio (Tabela 2) tenham-se apresentado bem diferentes para vários horários, os coeficientes de correlação da Tabela 4 não se distinguem acentuadamente entre si, no transcorrer dos horários. Essa constatação sugere que, embora a diferença termal existente entre as parcelas seja pequena, no início e no final do dia, e grande, nos horários intermediários, é mantida uma acentuada proporcionalidade de resposta térmica à condição hídrica da cultura. Isso faz com que o comportamento das curvas não se altere significativamente.

CONCLUSÕES

1. O fator de déficit total (FDT), baseado em dados de sensoriamento remoto termal e meteorológicos, demonstrou ser um índice diagnóstico das condições hídricas a que esteve submetida a cultura do milho.

2. O fator de déficit total também apresentou-se significativamente correlacionado com a produtividade, desde 8 até 16 horas, o que indica o potencial desse índice como auxiliar importante em programas de estimativas de safras.

3. Cabe destacar que a utilização do sensoriamento remoto termal para fins agrícolas encontra-se nos seus primórdios. Com o advento do lançamento de satélites que possam fornecer esse tipo de dados, além de instrumentos de campo e de aeronave, essa área de pesquisa mostra-se com grande potencial de desenvolvimento.

4. Os resultados obtidos, apesar de indicarem a necessidade de estudos mais aprofundados, apresentam uma ferramenta que se mostra promissora para estudos que envolvam as relações solo-água-planta-atmosfera, do ponto de vista de pesquisa tanto básica quanto aplicada.

AGRADECIMENTOS

Ao CPAC-EMBRAPA, especialmente ao pesqui-

sador Ariovaldo Luchiari Jr., pelo apoio e cessão de dados essenciais à realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BAIER, W. & ROBERTSON, G.W. The performance of soil moisture estimates as compared with the direct use of climatological data for estimating crop yield. *Agric. Meteorol.*, 5(1):17-31, 1968.
- BARNES ENGINEERING. Instruction manual for precision radiation thermometer model PRT-5. Stanford, 1970.
- BLAD, B.L.; HEILMAN, J.L.; KANEMASU, E.T. & ROSENBERG, N.J. Thermal scanner measurement of canopy temperatures to estimate evapotranspiration. *Remote Sensing Environ.*, 5:137-45, 1976.
- CLAWSON, K.L. & BLAD, B.L. Infrared thermometry for scheduling irrigation of corn. *Agron. J.*, 74(2):311-6, 1982.
- EHLER, W.L.; IDSO, S.B.; JACKSON, R.D. & REGINATO, R.J. Diurnal changes in plant water potential and canopy temperature of wheat as affected by drought. *Agron. J.*, 70(6):999-1004, 1978.
- GATES, D.M. *Biophysical ecology*. New York, Springer, 1980. 611p.
- GATES, D.M. The energy environment in which we live. *Am. Sci.*, 51(3):327-48, 1964.
- HILER, E.A. & CLARK, R.N. Stress day index to characterize effects of water stress on crop yields. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 14:757-61, 1971.
- HILER, E.A.; HOWELL, T.A.; LEWIS, R.B. & BOSS, R.P. Irrigation timing by stress day index method. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 17:393-8, 1974.
- IDSO, S.B.; JACKSON, R.D. & REGINATO, R.J. Compensating for environmental variability in the thermal inertia approach to remote sensing of soil moisture. *J. Appl. Meteorol.*, 15(8):811-7, 1976.
- IDSO, S.B.; JACKSON, R.D. & REGINATO, R.J. Remote sensing for agricultural water management and crop water prediction. *Agric. Water Manage.*, 1:299-310, 1978.
- IDSO, S.B.; JACKSON, R.D. & REGINATO, R.J. Remote sensing of crop yields. *Science*, 196:19-25, 1977.
- IDSO, S.B.; REGINATO, R.J.; HATFIELD, J.L.; WALKER, G.K.; JACKSON, R.D. & PINTER JUNIOR, P.J. A generalization of the stress-degree-day concept of yield prediction to accommodate a diversity of crops. *Agric. Meteorol.*, 21:205-11, 1980.
- JACKSON, R.D.; REGINATO, R.J. & IDSO, S.B. Wheat canopy temperature: a practical tool for water requirements. *Water Resour. Res.*, 13(3):651-6, 1977.
- LILLESAND, T.M. & KIEFFER, R.W. *Remote sensing and image interpretation*. New York, John Wiley, 1979. 612p.
- LUCHT, L.A.M. O uso da temperatura de radiação para detectar o estresse de água da cultura de cana-de-açúcar. São José dos Campos, INPE, 1980. 148p. Tese Mestrado em Sensoriamento Remoto. (INPE-1767-TDL/028).

- MARCHETTI, D.A.B. & GARCIA, G.J. *Princípios de fotogrametria e fotointerpretação*. São Paulo, Nobel, 1977. 257p.
- NIX, H.A. & FITZPATRICK, E.A. An index of crop water stress related to wheat and grain sorghum yields. *Agric. Eng.*, 6: 321-37, 1969.
- PRICE, J.C. The potential of remotely sensed thermal infrared data to infer soil moisture and evaporation. *Water Resour. Res.*, 16(4): 787-95, 1980.
- REICHARDT, K. & LIBARDI, P.L. *A água, o solo e a planta. water, soil and the plant*. São Paulo, EPU-EDUSP, 1976. 170p.
- SCOTT, H.D.; JUNG, P.K. & FERGUSON, J.A. A comparison of soybean leaf water potential and leaf temperature under progressive drought. *Agron. J.*, 73(3): 574-6, 1981.
- SLATYER, R.O. *Plant-water relationships*. London, Academic, 1967. 366p.
- STEEL, R.G.D. & TORRIE, J.H. *Principles and procedures of statistics*. New York, McGraw-Hill, 1960. 482p.
- SUTHERLAND, R.A. & BARTHOLIC, J.F. Significance of vegetation in interpreting thermal radiation from a terrestrial surface. *J. Appl. Meteorol.*, 16(8): 759-63, 1977.
- WALKER, G.K. & HATFIELD, J.L. Test of the stress degree day concept using multiple planting dates of red kidney beans. *Agron. J.*, 71(5):967-71, 1979.
- WIEGAND, C.L. & NAMKEN, L.N. Influence of plant moisture stress, solar radiation, and air temperature on cotton leaf temperature. *Agron. J.*, 58(6):582-6, 1966.