

EFEITO DO ESTRESSE HÍDRICO E DA DENSIDADE DE PLANTIO NO USO DA RADIAÇÃO E PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO TRIGO *(Triticum aestivum L.)*

EFFECT OF WATER STRESS AND PLANT DENSITY ON RADIATION USE AND WHEAT (*Triticum aestivum* L.) YIELD

Antonio Francisco Perrone Oviedo

Departamento de Geografia da Universidade de Taubaté

Renato Herz

Departamento de Geografia – FFLCH/Universidade de São Paulo

Bernardo F. T. Rudorff

Departamento de Sensoriamento Remoto – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

RESUMO

Durante a safra de 1996, foi realizado um experimento a campo na Fazenda Piloto do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade de Taubaté, visando ampliar o conhecimento relacionado ao efeito interativo da densidade de plantio e do estresse hídrico sobre o cultivar de trigo IAC-24. A densidade de plantio foi de 400 e 600 plantas por m² e o estresse hídrico consistiu da testemunha e quatro períodos de estresse (perfilhamento, emborrachamento, enchimento de grãos e maturação fisiológica). O experimento foi em blocos ao acaso com três repetições. Foi utilizado o balanço hídrico modificado para determinar os “dias secos” e monitorar os turnos de irrigação. Medidas radiométricas nas faixas do visível e infravermelho próximo foram obtidas ao longo do ciclo da cultura. O índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) foi utilizado para estimar a radiação fotossinteticamente ativa absorvida e acumulada (AAPAR). Os resultados indicaram que não houve interação significativa entre os fatores densidade de plantio e estresse hídrico. Foi observado um aumento na produção de grãos de 7% para a densidade de 400 plantas m². A AAPAR foi reduzida em todos os níveis de estresse hídrico. O estresse hídrico reduziu também a eficiência do uso da radiação para produção de grãos (RUE) quando aplicado durante os estádios de perfilhamento (15,7%) e de emborrachamento (39,4%). A produção de grãos foi reduzida pelo estresse hídrico nos estádios de perfilhamento (22,7%), de emborrachamento (41,6%) e de enchimento de grãos (9,1%). Os resultados indicaram que o cultivar IAC-24 apresenta boa resistência ao estresse hídrico durante o enchimento de grãos e sugerem que os valores da RUE podem ser empregados em modelos de crescimento e de estimativa de produtividade, em condições de estresse hídrico semelhantes ao deste experimento.

PALAVRAS-CHAVE: balanço hídrico, radiometria de campo, radiação fotossinteticamente ativa.

INTRODUÇÃO

O aumento da produtividade agrícola, integrado à otimização do uso dos recursos naturais, para atender à demanda de alimentos em decorrência do crescimento populacional, é um dos problemas mais críticos a ser enfrentado durante a próxima década. Em geral, a escassez de água é o principal fator limitante para o crescimento e desenvolvimento de culturas agrícolas. A água exerce uma grande influência sobre diversos processos fisiológicos e bioquímicos da planta e, do total de água absorvido pela planta, menos de 1% fica retido.

Estimativas da produtividade agrícola em resposta ao armazenamento e demanda de água do sistema solo-planta-atmosfera são baseados nos efeitos morfológicos e fisiológicos do estresse causados na cultura.

Porém, tais estimativas devem considerar a dimensão da unidade espacial, a duração do estresse hídrico e o estágio fenológico em que a cultura se encontra na ocasião (GARDNER et al., 1985).

Nos últimos anos, a produção nacional de alimentos tem solicitado informações precisas em tempo real das principais culturas agrícolas. As mudanças globais, como o efeito *El Nino*, têm potencializado esta necessidade. Técnicas de sensoriamento remoto permitem estimar parâmetros agrônômicos sobre culturas e solos que podem ser utilizados em sistemas de previsão de safras (BAUER, 1985; RUDORFF, 1993). A aptidão do uso de dados multiespectrais obtidos de sensores orbitais para identificar e medir áreas de culturas tem sido relatada por vários autores (MAC DONALD; HALL, 1980; RUDORFF; BATISTA, 1988); contudo, poucos trabalhos têm sido conduzidos, sob condições de campo, para avaliar o potencial do uso de dados multiespectrais na estimativa de parâmetros que forneçam informações sobre as condições e produtividade das culturas. Se esta informação espectral puder ser combinada efetivamente com modelos de crescimento de culturas que relatem limitações impostas pelo clima e fertilidade, um melhor entendimento sobre a produtividade agrícola pode ser obtido.

A radiação solar é a fonte de energia para a fotossíntese, o processo inicial utilizado pelas culturas para converter água e dióxido de carbono em açúcares simples. Outros processos convertem este produto inicial da fotossíntese em produtividade biológica e produtividade econômica, incluindo carboidratos, proteínas e óleos (GARDNER et al., 1985). Essa radiação é disponível como uma fonte de energia para a cultura somente quando interage com o dossel agrícola, que é composto predominantemente por folhas. Numa cultura sadia, adequadamente suprida com água, a produção de fitomassa é proporcional à radiação solar absorvida pelo dossel (ASRAR et al., 1985a). Desse modo, a quantidade e duração da superfície do dossel fotossinteticamente ativo e a eficiência do uso da radiação são componentes importantes no crescimento e produtividade agrícola (DAUGHTRY et al., 1983). A produção de fitomassa durante um período dt , da emergência até a maturação fisiológica, está relacionada à fração da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) absorvida pela cultura (APAR), de acordo com modelo proposto por Monteith (1972). Os métodos desenvolvidos para a medição da fração PAR absorvida são laboriosos e complexos, o que limita o uso destes métodos a parcelas experimentais de pequenas dimensões. Se esta fração da PAR absorvida pela cultura puder ser estimada com precisão, a partir de dados multiespectrais, obtidos de sensores orbitais, a estimativa da produtividade para grandes áreas agrícolas pode ser implementada operacionalmente.

Na prática, apesar da radiação solar ser essencial para a fotossíntese, ela é somente um dos diversos fatores que interagem na produtividade agrícola. Outros fatores limitantes ao crescimento e produtividade agrícola são nutrientes, água, temperatura e CO_2 . O desenvolvimento de modelos que avaliem as condições de crescimento e produtividade das culturas deve monitorar o impacto destes fatores (MAAS, 1987). Diversos cenários têm sido propostos, os quais incorporam dados multiespectrais, meteorológicos e biofísicos em modelos de crescimento e produtividade de culturas agrícolas (DAUGHTRY et al., 1983; MAAS, 1987; WIEGAND et al., 1991; WIEGAND; RICHARDSON, 1990; GOWARD; HUENNRICH, 1992; GOUDRIAAN; LAAR, 1994), bem como métodos de avaliação das condições de estresse nas culturas agrícolas (CARLSON et al., 1991; THOMPSON; WEHMANEN, 1979; IDSO et al., 1979).

Nesse contexto, um dos parâmetros-chave em modelos de crescimento que se baseiam na radiação utilizada pela cultura para a produção de fitomassa e grãos é a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela cultura - f_A - (GOUDRIAAN; LAAR, 1994). Asrar et al. (1985a) demonstraram que este parâmetro pode ser estimado a partir da radiação multiespectral refletida pela cultura, convertida para um índice de vegetação que consiste na transformação linear de uma faixa espectral na região do vermelho (alta absorção da radiação pela folha) e outra na região do infravermelho próximo (alto espalhamento da radiação pelo dossel) do espectro eletromagnético. Este índice responde à porção fotossinteticamente ativa do dossel agrícola, e, por essa razão, oferece um avançado método para a avaliação da eficiência biológica da cultura (DAUGHTRY et al., 1992). Com os valores diários da f_A e da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) incidente, pode-se estimar a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa absorvida durante o ciclo da cultura. Com base na eficiência do uso da radiação, pode-se estimar a quantidade de fitomassa produzida (ASRAR ET AL., 1985b; MONTEITH, 1977). Valores do índice de colheita da cultura podem então fornecer o rendimento agrícola (GREEN, 1987).

A radiometria de campo tem sido uma técnica bastante utilizada para o estabelecimento destas relações, pois permite a obtenção de medidas quase que diárias, ao longo do ciclo de crescimento das culturas sob

condições favoráveis em termos de influência da atmosfera, quando comparado com os dados obtidos por sensores orbitais. Com frequência, a cultura do trigo (*Triticum aestivum* L.) tem sido utilizada como modelo para esse tipo de estudo, no Brasil (RUDORFF et al., 1989; RUDORFF; BATISTA, 1990; VALERIANO, 1992; MOREIRA, 1997), pois as condições meteorológicas geralmente são favoráveis para a aquisição de dados espectrais durante a época do ano em que se cultiva o trigo.

O objetivo deste estudo foi submeter a cultura do trigo ao estresse hídrico, em diferentes estádios fenológicos e densidades de plantio, avaliando seu efeito sobre a produtividade e parâmetros da cultura (produção de fitomassa e grãos, índice de colheita, radiação fotossinteticamente ativa absorvida e eficiência do uso da radiação).

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido, sob condições de campo, na Fazenda Piloto do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade de Taubaté. O cultivar de trigo IAC-24 desenvolveu-se num Latossolo Vermelho Amarelo – fase terraço, em parcelas onde foram adaptadas coberturas de plástico transparente, para simular a condição de estresse hídrico durante os estádios fenológicos. A data de plantio ocorreu no dia juliano 120 (29/04/1996), e a colheita, nos dias 239 (26/08) e 247 (03/09). O delineamento experimental utilizado foi de um experimento “split-plot” casualizado em blocos, com 2 fatores (estresse hídrico e densidade de plantio) e 3 repetições. O delineamento “split-plot” foi utilizado para aplicar o fator estresse hídrico nas parcelas principais (3,5 x 5m), e o fator densidade de plantio, nas subparcelas (3,5 x 2,5m), com espaçamento de 5m entre as parcelas principais.

Os níveis do fator estresse hídrico foram aplicados de acordo com o seguinte protocolo: a) EH1 - Testemunha; suprida com água (reposição de 100% da demanda evaporativa) durante todo o ciclo, segundo as necessidades da cultura, entre os dias julianos 130 e 236; b) EH2 - Estresse hídrico no período que compreendeu o estágio fenológico de perfilhamento (três folhas abertas, dia juliano 136) até o início do emborrachamento (dia juliano 168); c) EH3 - Estresse hídrico no período que compreendeu o estágio fenológico do emborrachamento (dia juliano 168) até o início do florescimento (dia juliano 190); d) EH4 - Estresse hídrico no período que compreendeu o estágio fenológico do florescimento (dia juliano 190) até o completo enchimento dos grãos (dia juliano 207); e e) EH5 - Estresse hídrico que compreendeu o estágio fenológico da maturação fisiológica (dia juliano 207) até a colheita (dias julianos 239 e 247). Cabe ressaltar que, antes de e após cada período de estresse hídrico, as parcelas foram supridas com água ao nível da testemunha. Os níveis do fator densidade de plantio foram os seguintes: a) D1 - Espaçamento de 0,2 m entre linhas e 80 plantas por metro linear, e b) D2 - Espaçamento de 0,2 m entre linhas e 120 plantas por metro linear.

As práticas de plantio e manejo da cultura seguiram as recomendações descritas por Raij et al. (1985). A caracterização dos estádios fenológicos de crescimento da cultura foi feita com base na escala de Feeks, modificada por Large (SCHEEREN, 1986). O manejo da irrigação foi aplicado conforme o protocolo definido para o fator estresse hídrico, e a reposição da demanda evaporativa foi aplicada em turnos de rega de 3 a 5 dias, de acordo com o Boletim 216 (CATI, 1994). Na eventual ocorrência de chuvas, as coberturas plásticas eram acionadas sobre as parcelas que se encontravam no período de simulação do estresse hídrico.

Dados meteorológicos diários da velocidade do vento, umidade relativa do ar, evaporação do Tanque Classe “A”, insolação total, temperatura e precipitação foram obtidos na Estação Meteorológica da Fazenda Piloto, localizada a menos de 100m do campo experimental. A radiação solar global diária foi calculada segundo a equação de Angstrom (TUBELIS; NASCIMENTO, 1980), e a PAR foi estimada em 50% da radiação solar global diária incidente (SZEICS, 1974). Para o monitoramento da disponibilidade de água no solo e verificação da eficiência dos níveis de irrigação aplicados para o fator estresse hídrico, foi utilizado o Balanço Hídrico Modificado (BRAGA, 1982).

As medidas radiométricas do dossel foram obtidas ao longo do ciclo da cultura, conforme as condições meteorológicas permitiram, utilizando-se o espectrorradiômetro portátil de campo SPECTRON, modelo SE-590 (Spectron Inc., EUA), fixado num mastro a cerca de 3m sobre a cultura, com visada a nadir e um ângulo de visada de 15°, que permitiu obter-se a radiância de uma superfície de aproximadamente 0,4m². Steffen (1995) e Moreira (1997) descrevem as condições e procedimentos para a obtenção do fator de reflectância bidirecional

espectral. As medidas obtidas com o espectrorradiômetro foram transformadas em reflectância para as faixas espectrais correspondentes ao sensor Landsat-TM na banda TM₃ (630 a 690 nm) e TM₄ (760 a 900 nm). Os valores de reflectância nestas bandas foram utilizados para o cálculo do índice de vegetação da diferença normalizada -NDVI (Tucker, 1979).

Utilizando-se o modelo apresentado por Asrar et al. (1985a), foi estimada a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida ($f_A = -0,019 + 1,253 \text{ NDVI}$), a partir dos valores do NDVI interpolados para valores diários (DAUGHTRY et al., 1992; Rudorff et al., 1997; Moreira, 1997). Para determinar a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) diária empregou-se a seguinte expressão ($APAR = f_A * PAR$). A radiação fotossinteticamente ativa absorvida acumulada (AAPAR) ao longo do ciclo da cultura foi estimada pela somatória da APAR diária no período de emergência (escala 1 de FEEKS; LARGE) até a maturação fisiológica (escala 11.2 de FEEKS; LARGE). Finalmente, a eficiência do uso da radiação para a produção de fitomassa (RUE_f) e grãos (RUE_g) foi obtida pela razão entre o peso da fitomassa e grãos, respectivamente, com a AAPAR.

A colheita se deu no dia juliano 239 (26/08), para os níveis do estresse hídrico EH1, EH3, EH4 e EH5; e no dia juliano 247 (03/09), para o nível EH2. Para evitar o efeito da bordadura, o trigo foi colhido na parte central de cada subparcela, numa área de 3m². O peso da fitomassa e dos grãos foram determinados no Campo de Pesquisa do DAEE, em Pindamonhangaba, SP. O índice de colheita (IC) foi determinado em cada subparcela, conforme método proposto por Green (1987).

Os dados foram analisados conforme procedimentos de análise de variância adequados para um delineamento experimental "split-plot". Diferenças entre as médias foram avaliadas por meio do teste estatístico de Duncan, utilizando-se o pacote estatístico Statistical Analysis Systems (1991).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O balanço hídrico modificado foi aplicado para as parcelas principais (estresse hídrico), não avaliando o balanço hídrico nas subparcelas (densidade de plantio). A Tabela 1 apresenta a síntese do balanço hídrico para os níveis de água do fator estresse hídrico. Observa-se que o tempo gasto para atingir o primeiro dia seco nos níveis EH2, EH3, EH4 e EH5 foi de 25, 14, 10 e 17 dias, respectivamente. O número de dias secos para os níveis EH2, EH3, EH4 e EH5 foi de 8, 9, 8 e 13, respectivamente. Para todos os níveis de água, o tempo gasto para atingir o primeiro dia seco foi elevado. Isso se deve aos fatores pedológicos, meteorológicos e de manejo do campo experimental que potencializaram a disponibilidade de água no solo.

TABELA1 - Síntese do balanço hídrico para o fator estresse hídrico

nível de água	ETM (mm/dia)	duração dos níveis de água	dias para ocorrência do 1º dia seco	dias secos	déficit hídrico (mm)	lâmina d'água suprimida (mm)
EH2	0,82	33	25	8	7,04	55,7
EH3	1,27	23	14	9	8,9	58,8
EH4	1,99	18	10	8	9,62	45,8
EH5	0,85	30	17	13	5,6	49,2

Considerando a perda de água por fluxo vertical constante, a diferença entre os dias necessários para a ocorrência do primeiro dia seco em cada nível de água está relacionada aos diferentes estádios fenológicos da cultura, que solicitam demandas de água diferenciadas, e às condições meteorológicas durante o período em que a cultura deixou de receber água por irrigação e/ou precipitação.

Para se ter uma idéia de qual destes níveis de água apresentou estresse hídrico mais prejudicial, aplicou-se o conceito de proporcionalidade entre eles, ou seja, multiplicando 8,90 mm de água (EH3) por 1,43 (razão proporcional de dias entre o perfilhamento-EH2 e o emborrachamento-EH3) resulta-se em 12,72 mm de água, que seria o déficit hídrico no estágio de emborrachamento, considerando-se apenas o fator tempo. Aplicando-se o mesmo raciocínio para os estádios de emborrachamento (EH3) e enchimento de grão (EH4), ou seja,

multiplicando 9,62 mm de água (EH4) por 1,27 (razão proporcional de dias entre o emborrachamento-EH3 e o enchimento de grãos-EH4), resulta-se em 12,21. Conclui-se que o estresse hídrico mais prejudicial, em déficit de água, ocorreu no estágio de enchimento de grãos, seguido pelos estágios de emborrachamento e perfilhamento. No entanto, pode-se dizer que o estresse hídrico nos estágios de perfilhamento, emborrachamento e enchimento de grãos foi, relativamente, da mesma magnitude.

A Tabela 2 apresenta a análise de variância dos fatores estresse hídrico e densidade de plantio para os resultados da produção de fitomassa, produção de grãos, índice de colheita (IC), radiação fotossinteticamente ativa absorvida e acumulada (AAPAR), eficiência do uso da radiação para produção de fitomassa (RUE_f) e eficiência do uso da radiação para produção de grãos (RUE_g).

TABELA 2 - Efeito dos fatores estresse hídrico e densidade de plantio sobre os parâmetros da cultura no ano safra 1996

Fatores		Fitomassa (kg ha ⁻¹)	Grãos (kg ha ⁻¹)	IC (%)	AAPAR (MJ m ⁻²)	RUE _f (g MJ ⁻¹)	RUE _g (g MJ ⁻¹)
Densidade Plantio	Estresse Hídrico						
D1		9.418,4	3.497,6 a	36,9 a	294,7 b	3,19	1,18 a
D2		9.473,6	3.253,8 b	34,2 b	307,2 a	3,08	1,06 b
	EH1	10.400,7,a	4.000,9 a	38,5 a	314,1 a	3,31 a	1,27 a
	EH2	8.878,4 bc	3.107,3 b	35,0 a	287,9 b	3,08 ab	1,07 b
	EH3	8.412,9 c	2.360,3 c	28,2 b	305,0 a	2,75 b	0,77 c
	EH4	9.639,8 ab	3.640,5 a	37,8 a	299,9 ab	3,21 a	1,21 ab
	EH5	9.899,2 ab	3.767,5 a	38,1 a	298,0 ab	3,32 a	1,26 ab
			ANOVA	Valores F			
EH		5,09 *	26,76 **	18,72 **	3,90 *	4,22 *	18,36 **
D		0,13 ns	15,92 **	14,11 **	22,79 **	3,91 ns	23,57 **
EH x D		1,74 ns	0,32 ns	0,69 ns	1,51 ns	0,76 ns	0,37 ns
CV %		4,43	4,94	5,53	2,37	4,85	6,21

Nível de significância estatística: ** p<0,01; * p<0,05 e ns não significativo. Níveis dos fatores estresse hídrico e densidade de plantio com letras iguais não diferem significativamente entre si ao nível de 5% de probabilidade

Os níveis do fator densidade de plantio adotados apresentaram uma população de 400 plantas m⁻² (D1) e 600 plantas m⁻² (D2). Apesar do aumento da AAPAR (4,2%) para a densidade D2, a produção de fitomassa foi a mesma para as duas densidades. Entretanto, as plantas das parcelas com menor densidade de plantio tiveram um aumento significativo na produção de grãos, (7%) por terem sido mais eficientes em translocarem seus carboidratos para os grãos, o que se observa na diminuição de 7,3% no índice de colheita (IC) para as plantas das parcelas com densidade superior (Tabela 2). Apesar de a densidade maior (D2) ter AAPAR superior (4,2%), a RUE_f não apresenta variação significativa, ou seja, a eficiência na conversão da energia em fitomassa foi a mesma para as duas densidades. Já a eficiência do uso da radiação para a produção de grãos (RUE_g) foi 10,2% maior para as plantas com densidade de plantio menor (D1).

Outro fator a ser considerado é que a quantidade de água aplicada em cada turno de irrigação foi a mesma para as duas densidades de plantio, bem como o Balanço Hídrico Modificado não considera variações na densidade de plantio. Dessa forma, a lâmina d'água a ser aplicada é calculada com base num stand padrão da cultura (neste caso, o nível D1) e pode ter sido consumida mais rapidamente na zona de raízes das parcelas com densidade superior (D2). Este estado de estresse hídrico, mesmo que moderado, reduziu a eficiência das plantas das parcelas com densidade superior na conversão da energia absorvida em grãos e translocação de carboidratos para os grãos, bem como não proporcionou um aumento da fitomassa nem da RUE_f, apesar de ter tido maior

AAPAR, conforme discutido acima. O efeito do aumento da densidade de plantio no adiantamento do estresse hídrico já foi observado por Ryhiner e Matsuda (1978).

Assim, considerando a variação significativa para os níveis de densidade de plantio e a dúvida levantada de que as parcelas do nível de água EH1 com densidade de plantio superior D2 (parcelas testemunhas) estiveram sob estresse hídrico, procedeu-se a uma nova análise de variância do fator estresse hídrico, considerando-se somente o nível de densidade de plantio D1 (Tabela 3).

A Tabela 3 mostra que o estresse hídrico teve um efeito significativo nos estádios fenológicos de perfilhamento (EH2), emborrachamento (EH3), enchimento de grãos (EH4) e maturação fisiológica (EH5) sobre a AAPAR, com reduções de 6,3, 3,9, 4,4 e 5,0%, respectivamente, em relação à testemunha. Isto indica que a suspensão da irrigação durante o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo deve ter afetado a absorção de nitrogênio e o crescimento celular, reduzindo o stand da cultura e a quantidade de clorofila nas folhas, elementos importantes para a absorção da PAR. Este resultado está de acordo com Asrar et al. (1985a) e Gardner, Pearce e Mitchell (1985), os quais afirmam que, durante o desenvolvimento vegetativo, até mesmo um estresse hídrico de pequena intensidade reduz a absorção da PAR. A redução na AAPAR decorrente do estresse hídrico durante a maturação fisiológica deve estar relacionada ao incremento de folhas senescentes e às alterações na arquitetura do dossel.

Analisando os resultados da RUE_f (Tabela 3), verifica-se que o estresse hídrico teve um efeito significativo apenas no estágio fenológico de emborrachamento (EH3), reduzindo em 19,0% em relação à testemunha. O efeito do estresse hídrico sobre a RUE_g para os estádios de perfilhamento (EH2) e emborrachamento (EH3) causou reduções de 15,7 e 39,4%, respectivamente, em relação à testemunha.

De acordo com resultados obtidos no Balanço Hídrico Modificado (Tabela 1), o estágio fenológico de enchimento de grãos (EH4) é o período de maior demanda de água pela cultura, porém o efeito do estresse hídrico durante este estágio não foi significativo para a RUE_f e RUE_g (Tabela 3). Este resultado pode ser entendido por meio da análise do balanço hídrico da cultura. De acordo com a Tabela 1, pode-se observar que, após a suspensão da água no nível EH4, foram necessários 10 dias para o início da seca agrônômica. Durante esse período, a cultura tinha um armazenamento de água no solo, mesmo que numa gradativa diminuição, temperatura menor do que nos períodos anteriores e aumento da velocidade do vento. De acordo com Kumar et al. (1996), essas condições aumentam a taxa de fotossíntese; assim, a cultura teve condições hídricas adequadas para conversão da energia absorvida em fitomassa e grãos.

Conclui-se que condições de estresse hídrico potencializam a redução da RUE, especialmente durante o desenvolvimento vegetativo, devido à diminuição da atividade fotossintética, concordando com os resultados apresentados por Moreira (1997). Parte da redução da RUE também pode estar relacionada com a mudança no padrão de alocação da biomassa em plantas estressadas. Estudos têm mostrado que plantas tendem a alocar mais biomassa nas raízes do que nos colmos e folhas, quando permanecem em períodos de estresse hídrico (CHAPIN; SCHULZE; MOONEY, 1990).

Com relação à produção de fitomassa, o estresse hídrico teve um efeito significativo, quando aplicado nos estádios fenológicos de perfilhamento (EH2) e emborrachamento (EH3), apresentando uma redução de 12,8 e 22,1%, respectivamente, em relação à testemunha (Tabela 3). Estes resultados indicam que a produção de fitomassa é mais severamente afetada quando o estresse hídrico ocorre durante o emborrachamento. Durante esse estágio, o efeito do estresse hídrico reduziu a absorção da PAR e a eficiência na conversão da energia em matéria seca. O efeito do estresse hídrico durante o florescimento/enchimento de grãos, período de maior demanda de água pela planta, não foi notado na produção de fitomassa em relação à testemunha, pelo fato de o estresse hídrico ter ocorrido 10 dias após o início da suspensão da irrigação.

TABELA 3 – Efeito do fator estresse hídrico na densidade de plantio nível D1 sobre os parâmetros da cultura do Trigo no ano safra de 1996

Fator	Fitomassa (kg ha ⁻¹)	Grão (kg ha ⁻¹)	IC (%)	AAPAR (MJ m ⁻²)	RUE (g MJ ⁻¹)	RUE (g MJ ⁻¹)
<u>Estresse Hídrico - D1</u>						
EH1	10.460,2 a	4.169,3 a	39,9 a	306,8 a	3,41 a	1,35 a
EH2	9.115,3 bc	3.219,7 c	35,3 b	287,5 b	3,17 a	1,12 b
EH3	8.148,3 c	2.432,1 d	29,8 c	294,8 b	2,76 b	0,82 c
EH4	9.734,0 ab	3.790,7 b	38,9 a	293,3 b	3,31 a	1,29 a
EH5	9.634,0 ab	3.872,8 ab	40,2 a	291,3 b	3,30 a	1,32 a
		ANOVA	Valores F			
Estresse Hídrico - D1	6,49 **	44,8 **	20,1 **	4,26 *	5,06 *	27,3 **
CV - D1 (%)	6,18	5,08	4,56	2,07	6,17	6,19

Nível de significância estatística: ** p < 0,01 e * p < 0,05. Níveis de água para o fator estresse hídrico com letras iguais não diferem significativamente entre si ao nível de 5% de probabilidade.

A produção de grãos da cultura do trigo é determinada pelo número de espigas por área, número de grãos por espiga e peso do grão. Analisando os dados da Tabela 3, verificamos que a cultura do trigo submetida ao estresse hídrico durante os estádios fenológicos de perfilhamento (EH2), emborrachamento (EH3) e enchimento de grãos (EH4) teve uma redução na produção de grãos de 22,7, 41,6 e 9,1%, respectivamente, em relação à testemunha. O efeito do estresse hídrico durante o estágio de perfilhamento reduziu a AAPAR e a RUE, o que pode ter afetado o número de espigas por área. Durante o estágio de emborrachamento, o estresse hídrico reduziu a AAPAR e a RUE, o que pode ter afetado o tamanho das espigas e o número de grãos por espiga. E o efeito do estresse hídrico durante o estágio de enchimento de grãos, apesar de não ter afetado a RUE, reduziu a AAPAR, o que pode ter afetado o peso dos grãos.

Referente ao índice de colheita (IC), os resultados indicam que a eficiência na translocação de carboidratos foi significativamente afetada pelo estresse hídrico durante os estádios fenológicos de perfilhamento (EH2) e emborrachamento (EH3), acarretando uma redução de 11,5 e 25,3%, respectivamente, em relação à testemunha. Estes resultados concordam com os de Kirkham e Kanemasu (1983), os quais relatam que a cultura do trigo submetida ao estresse hídrico durante o emborrachamento transloca menos carboidratos para os grãos. Com relação ao estágio de enchimento de grãos, observa-se que o IC não diferiu da testemunha. Isto pode ser entendido por duas razões: a) o Balanço Hídrico, conforme descrito anteriormente, proporcionou disponibilidade de água para a cultura durante os 10 primeiros dias após a suspensão da água (Tabela 1); e b) a importância da translocação de carboidratos da planta assimilados antes do florescimento para os grãos, conforme relatou Kiniry (1993), e em especial a remobilização dos carboidratos da folha bandeira e aristas para o grão, conforme relatou Barlow et al. (1980).

CONCLUSÃO

O efeito do estresse hídrico sobre os parâmetros estudados dependeu muito da duração e do estágio fenológico em que a cultura se encontrava na ocasião do estresse. Porém, não foi observado o efeito interativo entre o estresse hídrico e a densidade de plantio, nos parâmetros estudados.

Os parâmetros AAPAR e RUE mostraram-se eficientes para a avaliação das condições da cultura, especialmente durante os estádios fenológicos de perfilhamento e emborrachamento.

O efeito do estresse hídrico na AAPAR foi sensível em todos os níveis de água, porém o impacto do estresse na conversão da energia absorvida em biomassa dependeu mais da duração e do estágio fenológico em

que o estresse foi induzido. Os resultados obtidos para a RUE recomendam que sejam empregados em modelos de crescimento, para verificar se esses valores podem ser considerados padrões para esta variedade de trigo, na estimativa da produtividade em situações semelhantes de estresse hídrico.

A lâmina d'água suprimida de 49,2 mm durante o estágio de maturação fisiológica não alterou a produção de grãos em relação à testemunha, bem como a lâmina de 45,8 mm suprimida durante o estágio de enchimento de grãos reduziu a produção de grãos somente em 9,1%. Estas informações são valiosas para o planejamento e acompanhamento das condições da cultura e manejo da água, uma vez que o recurso hídrico muitas vezes não é totalmente disponível, ou mesmo, o recurso financeiro para a operação do sistema de irrigação é limitado.

O índice de colheita mostrou que o cultivar IAC-24 apresenta boa resistência à seca no estágio de enchimento de grãos.

Os parâmetros da cultura estudados que se relacionam com a disponibilidade de água para a cultura e produtividade puderam ser estimados e avaliados a partir da reflectância multiespectral do dossel. Esta metodologia representa uma abordagem viável para a integração de dados espectrais e meteorológicos em modelos de produtividade agrícola. Este conceito pode ser estendido para grandes áreas, utilizando-se o sensor TM e ETM⁺ a bordo dos satélites LANDSAT-5 e LANDSAT-7, respectivamente, juntamente com as observações meteorológicas registradas por uma rede de estações, formando uma base de dados para futuros sistemas de previsão de safras.

Por exemplo, a fitomassa, o índice de área foliar e a fração da PAR absorvida (f_A) influem fortemente na reflectância espectral do dossel agrícola. Estimativas do índice de área foliar e da f_A obtidas a partir de dados multiespectrais (sensores aerotransportados, LANDSAT-TM e ETM⁺), juntamente com a radiação solar global diária, obtida em estações meteorológicas ou satélites meteorológicos, permitem o cálculo da quantidade da PAR absorvida pela cultura. Esta APAR em combinação com dados ambientais (temperatura, precipitação, vento, umidade, balanço hídrico, dados físico-químicos do solo) e integrada sobre uma escala fenológica da cultura (base temporal) deve explicar as variações na quantidade de fitomassa produzida. Valores do índice de colheita podem então fornecer a produtividade agrícola. Atualmente, as tecnologias de geoprocessamento fornecem o suporte/ambiente para o desenvolvimento de tais modelos. Os dados multispectrais obtidos dos satélites podem gerar bases de dados para o monitoramento e previsão de safras agrícolas em regiões onde observações frequentes de campo podem ser difíceis de se obter.

A metodologia apresentada também parece adequada para o refinamento de estudos de adaptação de cultivares em diferentes condições climáticas e edáficas, importantes na atualização dos zoneamentos agroclimáticos, recomendações de cultivares e épocas de plantio.

Estudos futuros devem dar seqüência a esse processo de entendimento das relações solo-planta-atmosfera, e ao uso de dados de sensoriamento remoto e meteorológicos para o monitoramento da produtividade agrícola. A variedade IAC-24 e outras devem ser estudadas, no Vale do Paraíba e em outras regiões, para a obtenção de relações mais estáveis entre os efeitos do estresse hídrico e os parâmetros espectrais. Estudos também devem ser orientados visando estabelecer um número mínimo de aquisições de imagens ou campanhas radiométricas para a avaliação da produtividade agrícola.

ABSTRACT

During the crop year of 1996, a field experiment was performed in the Pilot Farm of UNITAU, in order to expand the knowledge related to the interactive effect of plant density and water stress on the wheat cultivar IAC-24. The plant density was 400 and 600 plants m² and water stress was a control and four water stress stages (tillering, booting, grain filling and physiological maturity). The experiment was a split-plot design with three replicates. The modified water balance was used to determine the "drought days" and monitor the irrigation schedule. Radiometric measurements in the visible and near infra-red were acquired over the crop growing cycle. The normalized difference vegetation index (NDVI) was used to estimate the accumulated absorbed photosynthetically active radiation (AAPAR). The results indicated that the interaction between plant density

and water stress was not significant. An increase of 7% in grain production was observed for the density of 400 plants m². The AAPAR was reduced by all water stress treatments. Water stress also reduced the radiation use efficiency for grain production (RUE) when applied during tillering (15,7%) and booting (39,4%). Grain production was reduced by water stress during tillering (22,7%), booting (41,6%) and grain fill (9,1%). The results indicated that the IAC-24 cultivar presented a good resistance to water stress during grain fill and suggest that RUE values can be used in crop growth and yield models under similar conditions of the present experiment.

KEY-WORDS: water balance, field radiometry, photosynthetically active radiation.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASRAR, G. et al. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal*, v. 76, n. 2, p. 300-306, 1985.

ASRAR, G.; KANEMASU, E. T.; JACKSON, R. D.; PINTER, P. J. Estimation of total above-ground phytomass production using remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, v. 17, p. 211-220, 1985.

BAUER, M. E. Spectral inputs to crop identification and condition assessment. *Proceedings of the IEEE*, v. 73, n. 6, p. 1071-1085, 1985.

BARLOW, E. W. et al. Water relations of the developing wheat grain. *Australian Journal of Plant Physiology*, v. 7, n. 5, p. 516-525, 1980.

BRAGA, H. J. *Caracterização da seca agrônômica através de novo modelo de balanço hídrico, na região de Laguna, litoral sul do estado de Santa Catarina*. 1982. 157 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - ESALQ, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

CARLSON, T. N.; BELLES, J. E.; GILLIES, R. R. Transiente water stress in a vegetation canopy: simulations and measurements. *Remote Sensing of Environment*, v. 35, p. 175-186, 1991.

CHAPIN, F. S.; SCHULZE, E. D.; MOONEY, H. A. The ecology and economics of storage in plants. *Annu. Rev. Ecology Systems*, v. 21, p. 423-448, 1990.

CATI - COORDENADORIA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA INTEGRAL. *Recomendação da comissão técnica de trigo para 1994*. Campinas: CATI, Boletim 216. 1994. 74 p.

DAUGHTRY, C. S. T.; GALLO, K. P.; BAUER, M. E. Spectral estimates of solar radiation intercepted by corn canopies. *Agronomy Journal*, v. 75, p. 527-531, 1983.

DAUGHTRY, C. S. T. et al. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. *Remote Sensing of Environment*, v. 39, p. 141-152, 1992.

GARDNER, P. F.; PEARCE, R. B.; MITCHELL, R. L. *Physiology of crop plants*. Iowa, Iowa State Univ. Press. 1985. 337p.

GOUDRIAAN, J.; LAAR, H. H. van. Modelling potential crop growth process - Textbook with exercises. In: Leffelaar ed., *Current Issues in production ecology*, v. 2. Dordrecht Netherlands, Klumer Academic Publishers. 1994. 238 p.

GOWARD, S. N.; HUENNRICH, K. F. Vegetation canopy PAR absorbance and the normalized difference vegetation index: an assessment using the SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, v. 39, p. 119-140, 1992.

- GREEN, C. F. Nitrogen nutrition and wheat growth in relation to absorbed solar radiation. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 41, p. 207-248, 1987.
- IDSO, S. B. et al. Grain yield prediction: extending the stress degree day approach to accommodate climatic variability. *Remote Sensing of Environment*, v. 8, p. 267-272, 1979.
- KINIRY, J. R. Nonstructural carbohydrate utilization by wheat shaded during grain growth. *Agronomy Journal*, v. 85, n. 4, p. 844-849, 1993.
- KIRKHAM, M. B.; KANEMASU, E. T. Wheat. In: I.D. Teare and M.M. Peet (Editors), Crop-water relations. John Wiley & Sons, p. 482-514, 1983.
- KUMAR, P. V. et al. Radiation and water use efficiencies of rainfed castor beans (*Ricinus communis L.*) in relation to different weather parameters. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 81, p. 241-253, 1996.
- MAAS, S. J. Use of remotely-sensed information in agricultural crop growth model. *Ecological Modelling*, v. 41, p. 247-268, 1987.
- MacDONALD, R. B.; HALL, F. G. *Global crop forecasting*. *Science*, v. 208, p. 670-679, 1980.
- MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, v. 9, p. 747-766, 1972.
- MONTEITH, J. L. *Climate and the efficiency of crop production*. Britain. Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. B, v. 281, p. 277-294, 1977.
- MOREIRA, M. A. *Deficit hídrico na cultura do trigo e o impacto na resposta espectral e em parâmetros agronômicos*. 1997, 142 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - ESALQ, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- RAIJ, B. van. et. al. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. *Boletim técnico 100*. IAC, Campinas, 1985.
- RUDORFF, B. T. F.; BATISTA, G. T. Relatório da fase I do projeto ESTIMA – *Desenvolvimento de um modelo para estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar baseado em dados Landsat e agrometeorológicos*. INPE-4466-RPE/560, 1988.
- RUDORFF, B. T. F. et. al. *Relatório da campanha de medidas radiométricas do trigo na região de Assis - safra 1988*. São José dos Campos, INPE (INPE-4949-rpe/598), 1989.
- RUDORFF, B. T. F. et. al. Spectral response of wheat and its relationships to agronomic variables in the tropical region. *Remote Sensing of Environment*, v. 31, p. 53-63, 1990.
- RUDORFF, B. F. T. *Interactive effects of enhanced tropospheric ozone and carbon dioxide on wheat and corn*. Ph.D. thesis, University of Maryland, College Park, 1993. 192 p.
- RUDORFF, B. F. T. et. al. *Efeito do nitrogênio e do déficit hídrico na resposta espectral de cultivares de trigo*. Cd rom Simp. Latino-Americano Percepção Remota, Mérida, Venezuela, 1997.
- RYHINER, A. H.; MATSUDA, M. Evapotranspiration in relation to crop density of winter wheat. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, v. 26, p.200-208, 1978.

SCHEEREN, P. L. *Informações sobre o trigo. Centro Nacional de Pesquisa de trigo*. EMBRAPA, CNPT, Passo Fundo, RS, 1986. 36 p.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEMS INSTITUTE INC. SAS System for linear models. Third Edition, Cary, NC: SAS Institute Inc., 1991. 329 p.

STEFFEN, C.A. *Reflectância*. São José dos Campos, INPE (INPE-5638-PUD/070). 1995. 40 p.

SZEICS, G. *Solar radiation for plant growth. J. Appl. Ecology*, v. 11, p. 617-637, 1974.

THOMPSON, D. R.; WEHMANEN, O. A. Using LANDSAT digital data to detect moisture stress. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 45, n. 2, p. 201-207, 1979.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. *Meteorologia descritiva - fundamentos e aplicações brasileiras*. São Paulo: Nobel. 1980. 374p.

TUCKER, C.J. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979.

VALERIANO, M. M. *Reflectância espectral do trigo irrigado (Triticum aestivum, L.) por espectrorradiometria de campo e aplicação do modelo SAIL*. (INPE-5426-TDI/483), 1992. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

WIEGAND, C. L.; RICHARDSON, A. J. Use of spectral vegetation indices to infer leaf area, evapotranspiration and yield: I - *Rationale. Agronomy Journal*, v. 8 n. 7, p. 1011-1032, 1990.

WIEGAND, C. L. et. al. Vegetation indices in crop assessment. *Remote Sensing of Environment*, v. 35, p. 105-119, 1991.