

# Aplicação de Sensores de Baixo Custo no Suporte a Tomada de Decisão em Irrigação de Precisão

Otto Alan P. De Sousa<sup>1,3</sup>, Cláudio José Reis de Carvalho<sup>2</sup>,  
Guilherme Alves<sup>1</sup>, Atslands R. da Rocha<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia em Teleinformática,  
Universidade Federal do Ceará (UFC) – Fortaleza - CE, Brasil

<sup>2</sup>Embrapa Agroindústria Tropical– Fortaleza, Ceará, Brasil

<sup>3</sup>Instituto Atlântico, Fortaleza, Ceará, Brasil

otto.pinto@atlantico.com.br, claudio.carvalho@embrapa.br

guialves@alu.ufc.br, atslands@ufc.br

**Abstract.** *Water is a crucial resource in agriculture, significantly influencing the health and yield of plants. Plant water stress can occur due to insufficient water in the soil, unfavorable climatic conditions, or inadequate agricultural practices such as insufficient irrigation. Generally, the detection techniques of water stress are expensive and difficult to implement for small and medium-sized farmers. This work proposes a low-cost system to detect plant water stress, using leaf temperature as an indicator. Validation was conducted in an experimental maize field, demonstrating the developed system's effectiveness and highlighting the collected data's potential to enhance precision irrigation techniques.*

**Resumo.** *A água é um recurso crucial na agricultura, influenciando significativamente a saúde e o rendimento das plantas. O estresse hídrico em plantas pode ocorrer devido a falta de água no solo, a condições climáticas desfavoráveis, ou mesmo a práticas agrícolas inadequadas, como irrigação insuficiente. Geralmente as técnicas usadas para detecção do estresse hídrico são caras e de difícil execução para agricultores de pequenos e médio porte. Neste trabalho, é proposto um sistema de baixo custo para detectar o estresse hídrico em plantas, usando a temperatura das folhas como indicador. A validação da proposta foi conduzida em uma plantação experimental de milho, demonstrando a eficácia do sistema desenvolvido e evidenciando o potencial dos dados coletados para o aprimoramento de técnicas de irrigação de precisão.*

## 1. Introdução

O atual cenário de mudanças climáticas aponta para a necessidade do uso criterioso dos recursos naturais para a agricultura. Entre esses recursos, a água é uma das principais forçantes do sucesso da agricultura e, portanto, da produção de alimentos. Esse recurso natural tem merecido especial atenção mundial, uma vez que já se nota o deslocamento das zonas de sua maior disponibilidade, concomitante ao aumento das temperaturas e, portanto, das demandas evapotranspiratórias nestas mesmas zonas do planeta. Assim, a aplicação parcimoniosa da água na agricultura vai ser mandatória no futuro imediato, especialmente nas atividades de irrigação, visto que são as que mais consomem água.

A estimativa da necessidade de água a ser aplicada nas culturas através da irrigação, vem sendo aperfeiçoada continuamente. No entanto, a metodologia mais utilizada para essas estimativas continua sendo aquela que utiliza o balanço derivado de variáveis meteorológicas combinadas a características físico-hídricas do solo e características das culturas. Entre esses balanços o mais utilizado é aquele conhecido como a versão de Penman-Monteith, publicado em um boletim da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) [Allen et al. 1998].

Em escala macro fisiográfica regional, esse tipo de abordagem pode ser conveniente uma vez que os outros métodos de maior precisão e escala mais localizada envolvem recursos de equipamentos caros e de difícil manutenção e geram dados que necessitam grande *expertise* para serem interpretados, como os métodos de *Eddy Covariance* [Burba and Anderson 2010] e *Bowen Ratio* [Todd et al. 2000]. Portanto, são de difícil aplicação prática.

Em escala local, os métodos mais comuns utilizam sensores de umidade do solo como os tensiômetros ou sonda de nêutrons. Tais elementos tem custo elevado e por mais automatizados que sejam, ainda demandam assistência intensiva e medem os teores de umidade em uma esfera limitada (a aproximadamente 20-30 cm de raio a partir da ponta sensora porosa ou radioativa) e, portanto, integram somente uma pequena área do terreno [Hodnett et al. 1995].

A agricultura industrial dispõe de recursos tecnológicos a seu dispor que possibilitam o uso de abordagens caras e complexas, como sensoriamento remoto e monitoramento por satélite, *drones*, acesso a água profunda e equipamentos para irrigação de grandes áreas, enquanto os médios e principalmente os pequenos produtores (onde se enquadram a maior parte dos produtores de alimentos) não tem acesso a essas tecnologias. Portanto, é essencial o desenvolvimento de soluções tecnológicas de baixo custo e acessíveis para os agricultores de todos os níveis econômicos. Uma estratégia interessante é o uso dos sinais fisiológicos das próprias plantas como guias para a necessidade de irrigação, que pode ser buscado aliando a eletrônica para captar os sinais das plantas e técnicas de análise dos dados para identificar os seus padrões de necessidade, que podem ser compilados e transformados em aplicativos de amplo consumo.

Em [Mendes et al. 2023], foram apresentados sensores de baixo custo para o monitoramento de características fisiológicas de plantas de caju como forma de possibilitar o suporte a tomada de decisão em atividades de agricultura. Contudo, devido a maturidade da planta escolhida nesse experimento, não foi possível analisar a eficiência desses sensores na detecção de alterações nas características monitoradas, tais como seu nível de estresse hídrico e a consequente necessidade de irrigação.

Nesse contexto, este trabalho propõe a utilização desses sensores com o objetivo principal de validar seu uso na detecção de respostas das plantas às necessidades hídricas. Para tal, foram construídas unidades adicionais desses sensores, os quais foram instalados em uma plantação experimental de milho, criada em uma casa de vegetação e contando com uma irrigação controlada.

## **2. Trabalhos Relacionados**

O estresse hídrico, também conhecido como déficit hídrico, refere-se à insuficiência de água no solo para atender às necessidades das plantas, o que resulta na redução da

absorção de água e nutrientes pelo sistema radicular, resultando em um crescimento mais lento e menor desenvolvimento [Campos et al. 2021]. Em casos extremos, a falta de água no solo pode levar à morte das plantas.

Existe uma relação entre a temperatura da folha e o déficit hídrico, mediada principalmente por alterações na condutância estomática e nas taxas de transpiração que regulam o balanço energético de seus tecidos evitando que eles superaqueçam. O monitoramento da temperatura das folhas pode fornecer informações valiosas sobre o estado hídrico das plantas e pode ser uma ferramenta útil para gerir a irrigação e melhorar a eficiência da utilização da água em ambientes agrícolas. Este processo tem uma base teórica sólida e constitui um dos métodos micro meteorológicos conhecido como Razão de Bowen [Roupsard et al. 2006].

O fenômeno de correlacionar a temperatura de folha e déficit hídrico tem sido utilizado como base para avaliar o estado de estresse hídrico das plantas em [Gräf et al. 2021, Gerhards et al. 2016]. É feito o uso, porém, de termometria de infravermelho, a qual é cara e de difícil instalação e manutenção em condições de campo, pois os dispositivos de infravermelho são frágeis. Todos esses trabalhos são voltados para o avanço do conhecimento, mas com uma perspectiva restrita da sua aplicação prática em grande escala em condições agrícolas tal como propomos para o sistema que estamos desenvolvendo.

Em [Simbeye et al. 2022] é proposto um sistema de monitoramento e controle do estresse hídrico nas culturas, que combina tecnologia de sensores, redes sem fio e algoritmos de controle para monitorar as condições de umidade do solo e das culturas. O sistema proposto utiliza sensores para medir a umidade do solo e das folhas, transmite esses dados para um servidor central que processa as informações e aciona o sistema de irrigação quando necessário. Essa abordagem fornece uma solução automatizada para a gestão dos recursos hídricos, reduzindo custos e diminuindo os impactos ambientais associados ao desperdício ou à falta de irrigação. Contudo, é importante considerar os desafios dessa solução, uma vez que a implementação do sistema proposto pode exigir um investimento significativo em equipamentos de sensoriamento, tecnologia de rede e software de controle, o que pode ser uma barreira para agricultores de pequena escala ou com recursos financeiros limitados. Além disso, o sistema precisa de uma conectividade confiável, o que pode ser um desafio em áreas remotas ou sujeitas a interrupções de energia.

Em [Risso et al. 2022], é apresentado um detector de estresse hídrico em plantas que utiliza um interruptor óptico micromecânico que pode detectar o teor de água nas folhas abaixo de um limite predefinido sem consumo de energia elétrica, desde que as folhas estejam saudáveis e vigorosas. O método de detecção emprega a energia de uma faixa espectral específica da radiação solar refletida pelas folhas, a qual está relacionada ao conteúdo de água das plantas. O biossensor combina sensores infravermelhos selecionados e *microcantilevers* sensíveis ao calor para capturar a energia solar refletida e gerar um sinal digital somente quando a folha monitorada é perturbada. O dispositivo é capaz de acionar bombas de água comerciais quando as plantas de soja enfrentam estresse hídrico. Contudo, embora o conceito básico utilize a luz solar como fonte de energia infravermelha para manter o sensor em estado inativo, a variabilidade da luz solar representa um desafio ao método de limiar para avaliar a pressão de água nas folhas. Assim, para implementar com sucesso esse sistema em ambientes reais, é necessário garantir uma fonte de luz estável e limitada (como em uma estufa) ou integrar sensores adicionais de

luz solar, o que pode ser crucial para a eficácia do sistema.

Em [Paulo et al. 2023] é proposto um sistema de detecção de estresse hídrico de baixo custo, combinando índices de temperatura de folha com sensores infravermelhos e processamento de imagens. O programa visa monitorar e controlar o uso da água com precisão por meio da irrigação de precisão, adaptando-se às necessidades hídricas das culturas com base em dados locais específicos. O sistema utiliza sensores infravermelhos de baixo custo para medir a temperatura das plantas e identificar condições de estresse hídrico, corroboradas por imagens térmicas. Apesar da acessibilidade dos sensores, o sistema pode ser complexo devido à necessidade de captura e processamento de imagens para detectar problemas no solo e nas plantas. Isso requer recursos adicionais de hardware e software, bem como conhecimento técnico para garantir resultados confiáveis. Assim, embora ofereça uma alternativa viável para a monitorização do estresse hídrico, sua implementação bem-sucedida requer considerações cuidadosas dos desafios associados à captura de imagens, análise de dados e monitoramento do estresse hídrico.

O diferencial do presente trabalho é o uso de sensores de baixo custo e fácil manutenção para monitorar as respostas morfo-fisiológicas das plantas às forçantes ambientais. Apesar de possuírem uma precisão ligeiramente menor que sensores profissionais, sua menor complexidade permite que diversas unidades possam ser construídas e usadas em plantações de pequenos e médios agricultores.

### 3. Metodologia

Os sensores usados para detecção de respostas das plantas às necessidades hídricas são descritos a seguir.

#### 3.1. Sensor de Temperatura de Folha

Para as medidas das temperaturas das folhas, foram criados seis unidades dos nós sensores descritos em [Mendes et al. 2023]. Termistores de encapsulamento em vidro foram selecionados e agrupados em conjuntos de quatro sensores e em seguida soldados a cabos de prolongamento. Cada termistor foi disposto em um suporte de plástico ABS fabricado em impressora 3D dotados de mini imãs (3x2mm) para permitir a fixação e contato contínuo da ponta do termistor com a superfície de uma folha (vide Figura 1).



**Figura 1. Sensores de folha instalados**

Esses termistores são conectados ao sistema embarcado coletor de dados, o qual utiliza a equação de Steinhart-Hart [Steinhart and Hart 1968] para calcular o valor atual da temperatura à partir da resistência elétrica apresentada por um termistor. As leituras de

temperatura são realizadas a cada minuto e esses dados são enviados imediatamente após a coleta, via rádio LoRa, ao servidor de dados utilizado.

### 3.2. Psicrômetro aspirado

Foram construídas três unidades do nó sensor psicrômetro aspirado apresentado em [Mendes et al. 2023] e instalados em posições diversas da plantação experimental. Esse sensor coleta dados de temperatura e umidade do ar, adiciona um carimbo de tempo a cada leitura e envia esse conjunto de informações ao servidor de dados.



Figura 2. Psicrômetro Aspirado Instalado

### 3.3. Piranômetro

Uma grandeza importante para ter um melhor entendimento do ambiente do experimento é o índice de radiação solar incidindo sobre as plantas. Essa medição é feita com um sensor piranômetro, instrumento utilizado para mensurar a intensidade da radiação solar que incide sobre uma superfície plana. Para este trabalho, foi criado um nó sensor de radiação solar com base no piranômetro modelo SP-110, da fabricante *Apogee Instruments*.

Por se tratar de um sensor que fornece informação em forma de sinais analógicos, foi criado um circuito de conversão analógico-digital que recebe as informações do sensor piranômetro, os converte para sinais discretos e, com o auxílio, de um microcontrolador, são realizados os cálculos necessários para se obter o valor do fluxo de radiação solar por unidade de área ( $W/m^2$ ) naquele instante. Esses valores são então enviados via interface sem fio Wi-Fi para o servidor de dados utilizado neste trabalho.

### 3.4. Experimento

Para o experimento foram utilizadas plantas de milho da variedade BRS Gorutuba com sementes fornecidas pela Embrapa Milho e Sorgo-MG e Embrapa Tabuleiros Costeiros-SE [Embrapa 2010]. Para o cultivo foram utilizados 40 vasos de plástico preto rígido preenchidos com aproximadamente 10 kg de uma mistura: duas partes de solo peneirado da camada superficial (0-20cm) retirado na Estação Experimental de Pacajús (Embrapa-CE) e uma parte de pó de casca de frutos de coqueiro.

Os vasos foram dispostos sobre pratos de plástico individuais arrumados em quatro filas de dez plantas cada sobre uma bancada provida de um sistema de irrigação

automático por gotejo (100mL/min). Este arranjo foi instalado dentro de uma casa de vegetação aberta lateralmente e coberta por um filme plástico transparente comercial que evitava 100% da incidência de chuvas, mas diminuía cerca de 5-10% da radiação solar incidente a qual foi monitorada a cada minuto usando o piranômetro criado.

O experimento teve início com a plantação de quatro sementes de milho por vaso e durante o período de germinação, todos os vasos foram hidratados diariamente sem atingir o ponto de saturação hídrica do solo. Houve também a aplicação de adubo líquido por três vezes nesse mesmo intervalo de tempo.

Após a germinação das sementes, foram selecionadas as plantas mais robustas de forma que houvessem duas plantas em cada vaso. Em seguida, os sensores de temperatura de folha foram dispostos em plantas selecionadas aleatoriamente, instalando os termistores na terceira ou quarta folha completamente expandida a partir do ápice. Concomitantemente foram instalados três psicrômetros aspirados pendurados na altura do dossel correspondente ao nível das folhas monitoradas com os sensores de temperatura.

Os dados foram monitorados por um período de três dias para verificar se os sensores estavam posicionados corretamente nas folhas e para evidenciar quaisquer medições inconsistentes. Foi constatado que tanto os dados de temperatura de folhas quanto os de temperatura e umidade do ar estavam consistentes. Em seguida, foram selecionados doze vasos subdivididos em dois grupos menores de seis vasos cada um. Durante o período do experimento, o primeiro subgrupo de seis vasos teve seu solo mantido hidratado, enquanto o segundo subgrupo teve o suprimento de água para irrigação de seu solo interrompido periodicamente, apenas pela eliminação da haste de gotejo.

Os sensores de temperatura das folhas foram instalados nas plantas dos vasos selecionados. Cada sensor foi colocado para monitorar a folha de uma planta de cada vaso, totalizando vinte e quatro plantas monitoradas das quais doze pertenciam a um subgrupo de vasos cujo suprimento de água era mantido normalmente (molhamento até a saturação), e doze pertencentes ao subgrupo de vasos cujo suprimento de água era interrompido iniciando o primeiro ciclo de seca do experimento que durou sete dias.

Após esse período, os sensores de temperatura das folhas foram mudados para a folha imediatamente superior e no limbo das folhas monitoradas foram coletados seis discos de 0,8cm de diâmetro com uma ferramenta adequada. Esses discos foram imediatamente colocados em frascos com tampa e posteriormente pesados e em seguida foram postos para flutuar em 10 mL de água destilada, novamente tampados e deixados para saturar durante 24 horas. Decorrido o tempo de saturação, esses discos de folha foram enxutos com papel absorvente e colocados novamente nos frascos para pesagem e em seguida foram colocados para secar em estufa a 70°C por 48 horas, para que uma nova pesagem fosse feita ao fim do tempo de secagem. Esses dados foram utilizados para estimar o teor relativo de água dos tecidos foliares através da equação:

$$RWC(\%) = \frac{W_{umido} - W_{seco}}{W_{saturado} - W_{seco}} \times 100$$

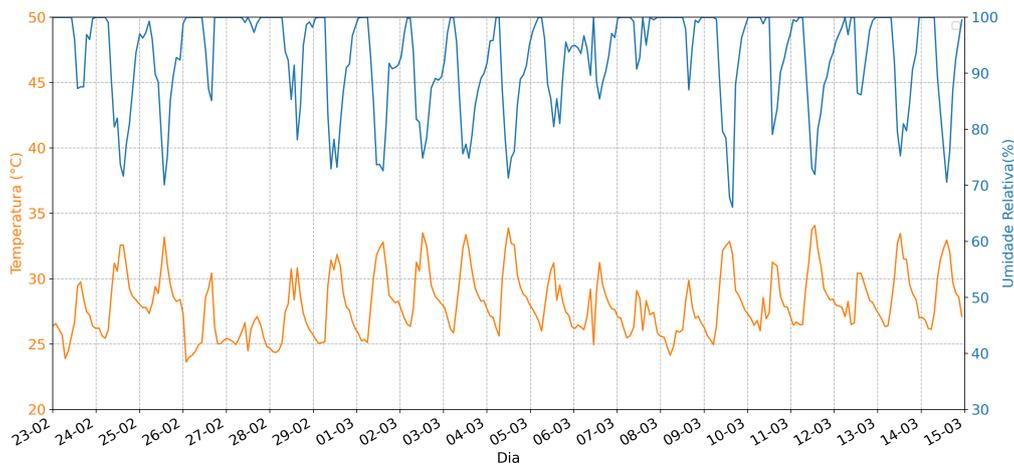
Onde:

- $RWC(\%)$  = teor relativo de água dos discos foliares em
- $W_{umido}$  = Peso fresco dos discos logo após a coleta (em gramas)

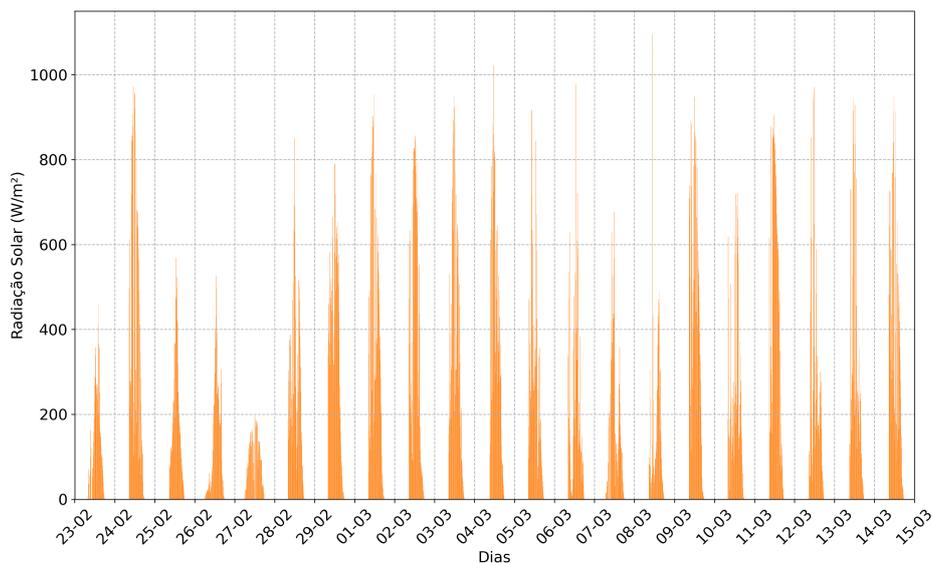
- $W_{sat}$  = Peso saturado após 24 horas imersos em água dos discos (em gramas)
- $W_{seco}$  = Peso seco em estufa dos discos (em gramas)

#### 4. Resultados

As características microclimáticas de umidade e temperatura do ar e de radiação solar incidente na casa de vegetação durante a execução das medidas podem ser vistas nas Figuras 3 e 4. Durante o período do experimento, pode-se notar que nos dias em que a radiação estava mais intensa, a temperatura do ar esteve elevada e a umidade relativa do ar esteve mais baixa durante todo o período do dia. Comportamento oposto pode ser identificado nos dias em que a radiação solar tem intensidade menor.



**Figura 3. Temperatura e umidade do ar na casa de vegetação.**



**Figura 4. Intensidade de radiação solar na casa de vegetação.**

O balanço energético das folhas em condições naturais é influenciado pelo seu estado de hidratação. Devido a grande capacidade calorífica da água, as plantas que não

estão sob estresse hídrico normalmente tem a temperatura de suas folhas abaixo da temperatura do ar ao seu redor, enquanto plantas que sofrem de falta de água tem suas temperaturas de folhas acima da temperatura do ar [Jackson et al. 1981]. Assim, para avaliação da efetividade da detecção do estresse hídrico nas plantas selecionados durante o experimento, foi feita uma comparação da série histórica de temperaturas de folhas com a série histórica de temperaturas do ar durante o período do experimento.

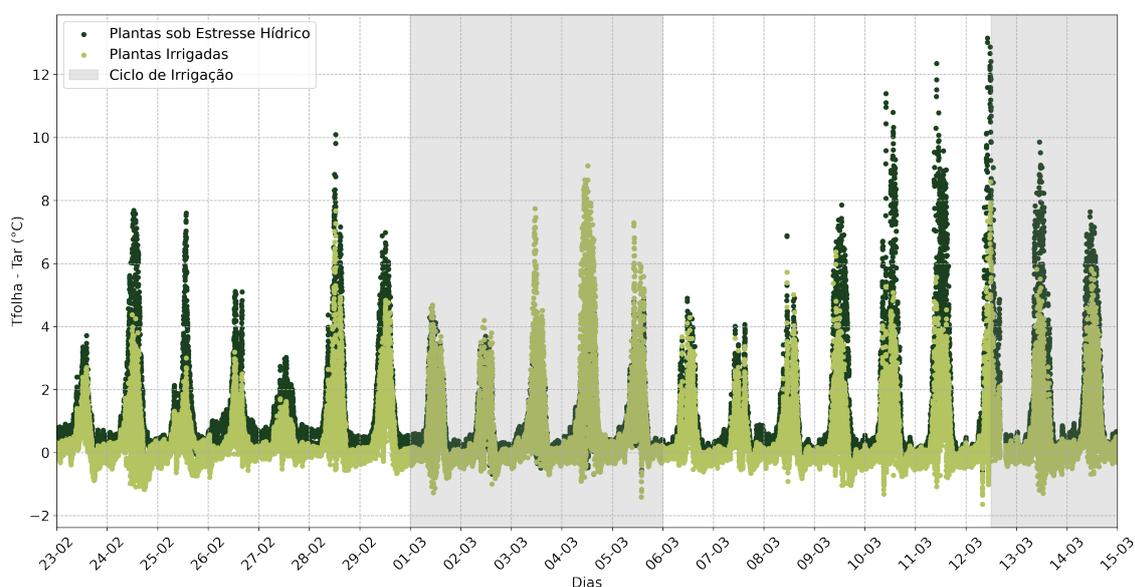
Para tal foi calculado a diferença entre cada leitura de temperatura de folha, de plantas sob estresse hídrico ou não, e a temperatura do ar em um determinado instante do dia, seguindo a Fórmula  $T_{folha} - T_{ar}$ , em que:

- $T_{folha} - T_{ar} < 0$ : A planta não está sofrendo de estresse hídrico.
- $T_{folha} - T_{ar} = 0$ : A planta não apresenta estresse no momento.
- $T_{folha} - T_{ar} > 0$ : A planta está sob estresse hídrico.

As diferenças de temperatura Folha-Ar (DTFA) calculadas podem ser analisados de acordo com a Figura 5. Nota-se uma variação da DTFA ao longo do dia em que assume valores negativos ou menores que zero durante a noite e nas primeiras horas do dia. Esses valores aumentam no decorrer do dia, devido ao aumento da incidência de luz solar sobre as plantas aumentando a temperatura de suas folhas em relação ao ar mesmo nas plantas irrigadas. Este fato é normal porque o fenômeno ocorre nas condições de campo uma vez que durante as horas mais quentes do dia a absorção de água pelas raízes não consegue suprir totalmente a demanda transpiratória do ar em que as folhas estão imersas. Porém com o esgotamento da reserva de água dos vasos, principalmente no caso das plantas não irrigadas, o déficit hídrico diário fica cada vez mais acentuado o que se reflete nas maiores diferenças de temperatura entre as folhas dessas plantas e o ar.

O teor relativo de água calculado, 84% para plantas hidratadas contra 50% das plantas sob estresse hídrico, constata que o período de suspensão da irrigação foi suficiente para causar um déficit hídrico acentuado nos tecidos foliares das plantas. De acordo com os especialistas da área, esse valor de déficit hídrico interno pode ser considerado normal entre plantas irrigadas e não irrigadas no campo e que portanto, apesar de serem cultivadas em vasos em casa de vegetação, os estresses sofridos pelas plantas não estão fora da realidade. A partir do final do período de reidratação pode ser visto um aumento expressivo das diferenças de temperatura foliares das plantas não irrigadas, mostrando que o dispositivo utilizado tem boa sensibilidade ao fenômeno do estresse hídrico foliar monitorado através da variação da temperatura das folhas, gerando padrões bem diferenciados. O segundo ciclo de reidratação mostrou uma recuperação mais lenta nas temperaturas das plantas não irrigadas em comparação com aquelas observadas no primeiro ciclo de reidratação (01 a 05 de março). Isto pode ser devido ao aumento de biomassa e área foliar

das plantas no segundo ciclo fazendo com que a reidratação fosse mais lenta.



**Figura 5. Curso diário das diferenças de temperaturas das folhas de plantas de milho em períodos de estresse hídrico e de suprimento hídrico normal.**

## 5. Considerações Finais

Neste trabalho é proposto o desenvolvimento de um sistema de dispositivos baseados em fisiologia vegetal para detecção das respostas das plantas às necessidades hídricas. Como ponto de partida, foram utilizados os sensores propostos em [Mendes et al. 2023], porém com a instalação desses em uma plantação experimental de milho em casa de vegetação.

Os resultados obtidos no experimento demonstraram que o dispositivo construído para monitorar a temperatura das folhas viabilizou a percepção entre os estados de boa hidratação e de déficit hídrico da cultura. Os teores relativos de água dos tecidos das plantas comprovam que as que tiveram sua irrigação interrompida estavam realmente sob estresse hídrico. Dessa forma, é possível notar que os sensores em estudo possuem de fato uma capacidade de identificar o estresse hídrico com base nas temperaturas das folhas das plantas. Como trabalhos futuros, pretende-se instalar os sensores em campo, com áreas sob irrigação e outras culturas como coqueiro, feijão e algodão.

## Referências

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., et al. (1998). Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-fao irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, 300(9):D05109.
- Burba, G. and Anderson, D. (2010). *A brief practical guide to eddy covariance flux measurements: principles and workflow examples for scientific and industrial applications*. Li-Cor Biosciences.
- Campos, A. J. d. M., Santos, S. M., and Nacarath, I. R. F. F. (2021). Water stress in plants: a review. *Research, Society and Development*, 10(15):e311101523155.

- Embrapa (2010). Milho BRS Gorutuba. <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/6329/milho-brs-gorutuba>. [Online: acesso em 20-março-2024].
- Gerhards, M., Rock, G., Schlerf, M., and Udelhoven, T. (2016). Water stress detection in potato plants using leaf temperature, emissivity, and reflectance. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 53:27–39.
- Gräf, M., Immitzer, M., Hietz, P., and Stangl, R. (2021). Water-stressed plants do not cool: Leaf surface temperature of living wall plants under drought stress. *Sustainability*, 13(7).
- Hodnett, M., da Silva, L., da Rocha, H., and Cruz Senna, R. (1995). Seasonal soil water storage changes beneath central amazonian rainforest and pasture. *Journal of Hydrology*, 170(1):233–254.
- Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., and Pinter Jr., P. J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17(4):1133–1138.
- Mendes, D., Carvalho, C., Sousa, O., Martins, M., and Rocha, A. (2023). Sistema de internet das coisas para captação de dados do microclima vegetal na agricultura. In *Anais do XIV Workshop de Computação Aplicada à Gestão do Meio Ambiente e Recursos Naturais*, pages 111–120, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Paulo, R. L. d., Garcia, A. P., Umez, C. K., Camargo, A. P. d., Soares, F. T., and Albiero, D. (2023). Water stress index detection using a low-cost infrared sensor and excess green image processing. *Sensors*, 23(3).
- Risso, A., Rajaram, V., Kang, S., Calisgan, S. D., Pavese, M., Qian, Z., and Rinaldi, M. (2022). Zero standby power crop water-stress detector leading to the optimization of water usage and yield. *Scientific Reports*, 12:12603.
- Roupsard, O., Bonnefond, J.-M., Irvine, M., Berbigier, P., Nouvellon, Y., Dautat, J., Taga, S., Hamel, O., Jourdan, C., Saint-André, L., Mialet-Serra, I., Labouisse, J.-P., Epron, D., Joffre, R., Braconnier, S., Rouzière, A., Navarro, M., and Bouillet, J.-P. (2006). Partitioning energy and evapo-transpiration above and below a tropical palm canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 139(3):252–268.
- Simbeye, D., Mkiramweni, M., Karaman, B., and Taskin, S. (2022). Plant water stress monitoring and control system. *Smart Agricultural Technology*, 3:100066.
- Steinhart, J. S. and Hart, S. R. (1968). Calibration curves for thermistors. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 15(4):497–503.
- Todd, R. W., Evett, S. R., and Howell, T. A. (2000). The bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103(4):335–348.