



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**DIAGNÓSTICO DO ESTADO NITROGENADO E MANEJO DA
ÁGUA NO CULTIVO DO ARROZ IRRIGADO TROPICAL**

MARCOS PAULO DOS SANTOS

Orientador:
Dr. Alexandre Bryan Heinemann



UFG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese

2. Nome completo do autor

Marcos Paulo dos Santos

3. Título do trabalho

DIAGNÓSTICO DO ESTADO NITROGENADO E MANEJO DA ÁGUA NO CULTIVO DO ARROZ IRRIGADO TROPICAL

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
- b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por Alexandre Bryan Heinemann, Usuário Externo, em 24/02/2021, às 15:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por MARCOS PAULO DOS SANTOS, Discente, em 25/02/2021, às 15:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 1894870 e o código CRC 8B92A720.

MARCOS PAULO DOS SANTOS

**DIAGNÓSTICO DO ESTADO NITROGENADO E MANEJO DA
ÁGUA NO CULTIVO DO ARROZ IRRIGADO TROPICAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Agronomia, da Universidade Federal de Goiás, como
requisito parcial à obtenção do título de Doutor em
Agronomia, área de concentração: Produção Vegetal.

Orientador:
Dr. Alexandre Bryan Heinemann

Goiânia, GO – Brasil
2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Santos, Marcos Paulo dos

Diagnóstico do estado nitrogenado e manejo da água no cultivo do arroz irrigado tropical [manuscrito] / Marcos Paulo dos Santos. - 2021. CIX, 109 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Bryan Heinemann.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Agronomia (EA), Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Goiânia, 2021.

Bibliografia.

Inclui lista de figuras, lista de tabelas.

1. Ecofisiologia. 2. Sensoriamento remoto de baixa altitude. 3. Inundação intermitente. 4. Arroz tropical. 5. Agricultura inteligente. I. Heinemann, Alexandre Bryan, orient. II. Título.

CDU 631/635

“Permitida a reprodução total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE AGRONOMIA

ATA DE DEFESA DE TESE

Ata Nº 12/2021 da sessão de Defesa de Tese de Marcos Paulo dos Santos que confere o título de Doutor em Agronomia, na área de concentração em Produção Vegetal.

Aos 23/02/2021 vinte e três dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e um, a partir das 08:00 oito horas, por videoconferência, realizou-se a sessão pública de Defesa de Tese intitulada "ALTERNATIVAS PARA O DIAGNÓSTICO DO ESTADO NITROGENADO E AUMENTO DA EFICIÊNCIA NO USO DA ÁGUA NO CULTIVO DO ARROZ IRRIGADO TROPICAL". Os trabalhos foram instalados pelo Orientador e Presidente da Banca Examinadora, Dr. Alexandre Bryan Heinemann (Embrapa Arroz e Feijão) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Dr. Luís Fernando Stone (Embrapa Arroz e Feijão), membro titular interno; Profa. Moemy Gomes de Moraes (ICB/UFG), membro titular interno; Dra. Mellissa Ananias Soler da Silva (Embrapa Arroz e Feijão), membro titular externo; Dra. Anna Cristina Lanna (Embrapa Arroz e Feijão), membro titular externo. Durante a arguição, os membros da banca fizeram sugestão de alteração do título do trabalho, conforme explicitado abaixo. Após a arguição, a Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Tese, tendo sido o candidat APROVADO pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Presidente da Banca Examinadora, Dr. Alexandre Bryan Heinemann, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos 23/02/2021 vinte e três dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e um.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

DIAGNÓSTICO DO ESTADO NITROGENADO E MANEJO DA ÁGUA NO CULTIVO DO ARROZ IRRIGADO TROPICAL



Documento assinado eletronicamente por Luís Fernando Stone, Usuário Externo, em 23/02/2021, às 13:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por Alexandre Bryan Heinemann, Usuário Externo, em 23/02/2021, às 14:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por Mellissa Ananias Soler da Silva, Usuário Externo, em 23/02/2021, às 15:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por Moemy Gomes De Moraes, Professora do Magistério Superior, em 24/02/2021, às 13:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por Anna Cristina Lanna, Usuário Externo, em 01/03/2021, às 14:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 1810883 e o código CRC 8DE17B5B.

*Ofereço este trabalho à razão humana da minha existência,
os quais não mediram esforços para que eu estudasse e
que nunca me deixaram desistir de meus sonhos por dificuldades financeiras!*

***Mãe,** obrigado pela constante
motivação, por suas orações e por
acreditar em meus sonhos.*

***Pai,** minha eterna gratidão por seus
ensinamentos, sua luta e pelo exemplo
de homem íntegro.*

*A vocês, com todo amor e carinho eu
dedico.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a DEUS, por todas as bênçãos e misericórdias acrescentadas em cada dia da minha vida. Pelas dificuldades impostas em minha trajetória pessoal e acadêmica, dificuldades estas que me tornaram mais forte, perseverante e incessante na busca por mais esta conquista.

À Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás, pela oportunidade e apoio institucional para realização desta formação.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), em especial ao Centro Nacional de Pesquisa em Arroz e Feijão (CNPAF), pelo apoio institucional, técnico e científico.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos durante parte deste curso de Doutorado.

Ao Dr. Alexandre Bryan Heinemann, pelo convívio amigável, confiança, dedicação, e por guiar contundentemente o meu caminhar em toda a Pós-Graduação.

Ao Dr. Alberto Baêta dos Santos, pelas experiências compartilhadas e concessão de parte dos dados utilizados nesta pesquisa.

Aos meus irmãos, cunhados, sobrinhos e sogros pelo apoio dado com suas existências e palavras motivadoras. Vocês constituíram um motivo a mais para eu seguir em frente. Creio que sem vocês minha vida não seria a mesma.

À tia Arlete e família pelo amparo e cuidado que sempre tiveram comigo durante o período em que fui acolhido em sua residência.

Aos amigos da pós-graduação, os quais permanecerão em minha memória para além deste rápido período: Fábio Miguel Knapp, Israel Mendes de Souza, João Rodrigo de Castro, Marcos Euzébio Nunes, Rafael Battisti, Renan da Silva Macedo, Sandro Alex Helrigel Abreu, obrigado pelos momentos de descontração e experiências compartilhadas.

Aos amigos Ênio e Leandro pelo auxílio nos ensaios de campo e por tornarem o trajeto Goianira - Santo Antônio sempre divertido. Não poderia deixar de fazer menção aos amigos (professores e alunos) do Centro Universitário UniAraguaia e do UNIGOIÁS Centro Universitário que sempre apoiaram e acreditaram neste meu sonho.

Um agradecimento especial eu reservo a minha esposa Nívea Patrícia Ribeiro Reges pelo companheirismo, amor, carinho e toda compreensão que teve nos momentos em que estive ausente por ocasião desta obra.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	9
LISTA DE FIGURAS.....	10
RESUMO.....	13
ABSTRACT.....	15
1 INTRODUÇÃO.....	17
2 ARROZ IRRIGADO: ECOFISIOLOGIA E ALTERNATIVAS PARA DIAGNÓSTICO DO ESTADO NITROGENADO DA PLANTA E REDUÇÃO DA QUANTIDADE DE ÁGUA APLICADA DURANTE O CULTIVO.....	21
2.1 CULTURA DO ARROZ.....	21
2.2 PRODUÇÃO DE ARROZ IRRIGADO NO BRASIL.....	22
2.3 ECOFISIOLOGIA DO ARROZ IRRIGADO.....	23
2.4 DIAGNÓSTICO DO ESTADO NITROGENADO EM PLANTAS USANDO REFLETÂNCIA DE DOSSEL.....	29
2.5 DEMANDA E SUFICIÊNCIA DE ÁGUA NA RIZICULTURA TROPICAL.	32
2.6 PERSPECTIVAS DE PESQUISA.....	35
2.7 REFERÊNCIAS.....	36
3 DETERMINAÇÃO DO NITROGÊNIO NO ARROZ IRRIGADO USANDO REFLETÂNCIA ESPECTRAL.....	45
3.1 INTRODUÇÃO.....	46
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	47
3.2.1 Descrição dos experimentos.....	47
3.2.2 Sensor, coleta de dados e índices vegetativos.....	49
3.2.3 Indicadores do estado de N para a cultura do arroz.....	51
3.2.4 Períodos de crescimento	52
3.2.5 Análises estatísticas.....	52
3.3 RESULTADOS.....	53

3.3.1	Variação dos indicadores de estado do N do arroz irrigado.....	53
3.3.2	Bandas espectrais isoladas.....	55
3.3.3	Calibração de índices de vegetação e indicadores do estado do N no arroz irrigado.....	56
3.3.4	Validação das relações entre índices de vegetação e indicadores do estado de N no arroz.....	59
3.4	DISCUSSÃO.....	63
3.5	CONCLUSÕES.....	69
3.6	REFERÊNCIAS.....	69
4	FENOLOGIA, TROCAS GASOSAS, ACÚMULO DE BIOMASSA E PRODUTIVIDADE DO ARROZ IRRIGADO SOB DIFERENTES MANEJOS DA LÂMINA D'ÁGUA.....	74
4.1	INTRODUÇÃO.....	76
4.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	78
4.2.1	Descrição dos experimentos.....	78
4.2.2	Quantificação dos graus-dia acumulados em cada fase de crescimento.....	80
4.2.3	Leituras fenológicas.....	80
4.2.4	Dinâmica da biomassa seca acumulada.....	81
4.2.5	Sensor, coleta de dados e indicadores de trocas gasosas.....	81
4.2.6	Produtividade e índice de colheita.....	82
4.2.7	Análises estatísticas.....	83
4.3	RESULTADOS E DICUSSÃO.....	85
4.4	CONCLUSÕES.....	102
4.5	REFERÊNCIAS.....	103
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	107
6	REFERÊNCIAS.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1.	Descrição dos experimentos, e dos conjuntos de dados utilizados neste estudo para calibração e validação.....	49
Tabela 3.2.	Índices vegetativos (IV) utilizados neste estudo.....	50
Tabela 3.3.	Estatística descritiva dos indicadores do estado de N: biomassa foliar seca (BFS), índice de área foliar (IAF), conteúdo de N foliar (CNF), acúmulo de N foliar (ANF) e índice de nutrição de N (INN) nos períodos de crescimento (vegetativo inicial: V1 a V9; vegetativo final: V10 a R1; reprodutivo: R2 a R4; enchimento de grãos: R5 a R8 e no ciclo todo: V1 a R8) para diferentes cultivares e safras de arroz irrigado. <i>n</i> representa o número de amostras.....	54
Tabela 3.4.	Melhores índices vegetativos, incluindo NDVI and RVI, na calibração de modelos para estimação dos indicadores do estado de N (biomassa foliar seca (BFS), conteúdo de N foliar (CNF), índice de área foliar (IAF), acúmulo de N foliar (ANF), e índice de nutrição de N (INN)) nos períodos de crescimento (vegetativo inicial: V1-V9; vegetativo final: V10-R1; reprodutivo: R2-R4; enchimento de grãos: R5-R8 e ciclo todo: V1-R8), para diferentes cultivares e safras de arroz irrigado.....	57
Tabela 3.5.	Resultados da validação de performance dos modelos ajustados com os índices (NDVI e RVI e dos sete melhores índices de vegetação) para estimação dos indicadores do estado de N (biomassa foliar seca (BFS), conteúdo de N foliar (CNF), índice de área foliar (IAF), acúmulo de N foliar (ANF), e índice de nutrição de N (INN)) nos períodos de crescimento (vegetativo inicial: V1-V9; vegetativo final: V10-R1; reprodutivo: R2-R4; enchimento de grãos: R5-R8 e ciclo todo: V1-R8), para diferentes cultivares e safras de arroz irrigado.....	60
Tabela 4.1.	Resumo da análise de variância para a fenologia de cultivares de arroz irrigado cultivados sob distintos manejos da lâmina d'água em duas safras sucessivas (2016/2017 e 2017/2018). Goianira, 2020.....	85
Tabela 4.2.	Valores acumulados de temperatura máxima (Tmax), mínima (Tmin), média (Tmed), graus dias (GD) precipitação e radiação global (RadSol) para os períodos de crescimento da cultura e período total.....	87
Tabela 4.3.	Valores de Akaike Information Criterion (AIC) dos modelos lineares de efeitos fixos (safras, blocos, parcelas e subparcelas) e misto (efeitos fixos para parcelas e subparcelas; efeitos aleatórios para safras e blocos). Goianira, 2020.....	99

LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1.** Coeficientes de correlação (r) para as relações entre bandas de refletância do sensor Crop Cicle ACS-430 e indicadores do estado de N no arroz irrigado no período vegetativo inicial (a), V1-V9), vegetativo final (b), (V10-R1), reprodutivo (c), R2-R4), enchimento de grãos (d), R5-R8 e no ciclo todo (e). Quadrantes tachados com X vermelho representam correlações não significativas ($p>0,05$) 55
- Figura 3.2.** Relações da biomassa seca foliar e do índice de área foliar com os índices de vegetação (NVDI (a) e (e); RVI (b) e (f); CIRE (c) e (g); MSR_RE (d) e (h), respectivamente). Círculos vazios, preenchidos, quadrados e triângulos representam os períodos: vegetativo inicial (V1-V9); vegetativo final (V10-R1); reprodutivo (R2-R4) e de enchimento de grãos (R5-R8) para diferentes cultivares safras de arroz irrigado..... 59
- Figura 3.3.** Relações entre o teor de N foliar e índices de vegetação NVDI (a), RVI (b), WICI1 (c) e WICI2 (d). Círculos vazios, preenchidos, quadrados e triângulos representam os períodos: vegetativo inicial (V1-V9); vegetativo final (V10-R1); reprodutivo (R2-R4) e de enchimento de grãos (R5-R8) para diferentes cultivares safras de arroz irrigado..... 62
- Figura 3.4.** Relações entre o índice de nutrição nitrogenada e índices de vegetação NVDI (a), RVI (b), M_RESAVI (c) e NDRE (d). Círculos vazios, preenchidos, quadrados e triângulos representam os períodos: vegetativo inicial (V1-V9); vegetativo final (V10-R1); reprodutivo (R2-R4) e de enchimento de grãos (R5-R8) para diferentes cultivares safras de arroz irrigado..... 63
- Figura 3.5.** Relações entre o acúmulo de N nas folhas e índices de vegetação NVDI (a), RVI (b), MSR_RE (c) e REDVI (d). Círculos vazios, preenchidos, quadrados e triângulos representam os períodos: vegetativo inicial (V1-V9); vegetativo final (V10-R1); reprodutivo (R2-R4) e de enchimento de grãos (R5-R8) para diferentes cultivares safras de arroz irrigado..... 64
- Figura 4.1.** Dinâmica das variáveis climáticas: temperatura máxima e mínima do ar, radiação global (a e b) precipitação (c e d), nas safras 2016/2017 e 2017/2018, respectivamente. Linhas tracejadas vertical cinza representam a média dos tratamentos de manejo de água para a iniciação da panícula. Linhas verticais sólidas marrom e pontilhadas púrpura vertical representam o florescimento para a média dos manejos de água: Inundação Contínua durante todo o ciclo (ICC); Inundação Intermitente com Aeração (IIA); Inundação Intermitente durante todo o ciclo (IIC) e; Inundação Intermitente até o Florescimento (IIF), respectivamente. Linhas tracejadas vertical vermelha representam a maturação de colheita para a médias dos manejos de água..... 79

Figura 4.2.	Área de colheita e determinação da umidade para correção da estimativa de produtividade.....	83
Figura 4.3.	Alterações nos DAE demandados por quatro cultivares de arroz irrigado para alcançar as fenofases V3 (a), V6 (b), V9 (c), R1 (d) e V12 (e) por ocasião da safra de cultivo. Goianira, 2020.....	86
Figura 4.4.	Alterações nos DAE demandados por cultivares de arroz irrigado para alcançar as fenofases V3 (a), V6 (b), V9 (c), R1 (d) e V12 (e). Goianira, 2020.....	86
Figura 4.5.	Alterações nos DAE demandados por cultivares de arroz irrigado para alcançar as fenofases R4 (a e b) e R9 (c e d) nas safras 2016/2017 e 2017/2018, respectivamente. Goianira, 2020.....	89
Figura 4.6.	Dinâmica da taxa fotossintética ao longo do ciclo de crescimento do arroz irrigado mediante o efeito de cultivar (a e b) e de manejos da lâmina d'água (c e d). Goianira, 2020. Os painéis b e d ilustram apenas as cultivares e manejos que diferiram, respectivamente. Linhas tracejadas representam o intervalo com 95% de confiança das estimativas.....	91
Figura 4.7.	Dinâmica da taxa transpiratória ao longo do ciclo de crescimento do arroz irrigado mediante o efeito de cultivar (a) e de manejos da lâmina d'água (b). Goianira, 2020. Linhas tracejadas representam o intervalo com 95% de confiança das estimativas para cada cultivar e manejo.....	93
Figura 4.8.	Dinâmica da eficiência instantânea de carboxilação ao longo do ciclo de crescimento do arroz irrigado mediante o efeito de cultivar (a e b) e de manejos da lâmina d'água (c e d). Goianira, 2020. Os painéis b e d ilustram apenas as cultivares e manejos que diferiram, respectivamente Linhas tracejadas representam o intervalo com 95% de confiança das estimativas.....	94
Figura 4.9.	Dinâmica da biomassa seca total de cultivares de arroz irrigado em razão de manejos da lâmina d'água nas safras 2016/2017 e 2017/2018, respectivamente. Goianira, 2020. Linhas tracejadas representam o intervalo com 95% de confiança das estimativas de biomassa seca total para cada cultivar e manejo.....	95
Figura 4.10.	Dinâmica da biomassa seca de folhas de cultivares de arroz irrigado em razão de manejos da lâmina d'água nas safras 2016/2017 e 2017/2018, respectivamente. Goianira, 2020. Linhas tracejadas representam o intervalo com 95% de confiança das estimativas de biomassa seca de folhas para cada cultivar e manejo.....	96
Figura 4.11.	Dinâmica da biomassa seca de colmos de cultivares de arroz irrigado em razão de manejos da lâmina d'água nas safras 2016/2017 e	

	2017/2018, respectivamente. Goianira, 2020. Linhas tracejadas representam o intervalo com 95% de confiança das estimativas de biomassa seca de colmos para cada cultivar e manejo.....	97
Figura 4.12.	Dinâmica da biomassa seca de panículas de cultivares de arroz irrigado em razão de manejos da lâmina d'água nas safras 2016/2017 e 2017/2018, respectivamente. Goianira, 2020. Linhas tracejadas representam o intervalo com 95% de confiança das estimativas de biomassa seca de panículas para cada cultivar e manejo.....	98
Figura 4.13.	Produtividade do arroz irrigado tropical em razão de manejos da lâmina d'água nas safras agrícolas 2016/2017 (a) e 2017/2018 (b), respectivamente. Goianira, 2020.....	99
Figura 4.14.	Produtividade do arroz irrigado tropical em razão da interação manejos da lâmina d'água × cultivares (a), cultivares (b) e manejo da lâmina d'água (c), respectivamente. Goianira, 2020. No painel (a) letras maiúsculas comparam cultivares em cada nível de manejo, enquanto letras minúsculas comparam manejos em cada nível de cultivar.....	100
Figura 4.15.	Índice de colheita do arroz irrigado tropical em razão da interação manejos da lâmina d'água × cultivares (a), cultivares (b) e manejo da lâmina d'água (c), respectivamente. Goianira, 2020. No painel (a) letras maiúsculas comparam cultivares em cada nível de manejo, enquanto letras minúsculas comparam manejos em cada nível de cultivar.....	101

RESUMO

SANTOS, M. P dos. **Diagnóstico do estado nitrogenado e manejo da água no cultivo do arroz irrigado tropical**. 2021. 109 f. Tese (Doutorado em Agronomia: Produção Vegetal)– Escola de Agronomia. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2021.¹

No Brasil a produção de arroz está concentrada na região Sul sob o sistema irrigado. Por motivos de segurança alimentar há a necessidade de se distribuir a produção no país. Ganhos significativos na produtividade de grãos tem sido associado com aplicações de altas quantidades de nitrogênio. Contudo, quando avaliada a eficiência do uso do nitrogênio (EUN) [kg de grão produzido / kg de N aplicado] tem-se observado aproveitamento inferior a 40%. Deste modo, o gerenciamento estratégico do nitrogênio é crucial para a produção agrícola de alta eficiência e agricultura sustentável. Aliada a necessidade de aumento da EUN há o interesse crescente na redução do volume de água utilizado na rizicultura irrigada com a aplicação da lâmina d'água contínua durante todo o ciclo. Com a redução do volume de água aplicada com este manejo, além da redução no custo de produção, vislumbra-se aumento da eficiência no uso da água e da EUN. Assim, intervenções inteligentes e premeditadas em relação aos recursos naturais devem ser realizadas de forma a otimizar o manejo do N e a reduzir o uso de água, sem redução da produtividade. Objetivou-se neste estudo determinar potenciais índices de vegetação para diagnóstico do estado nitrogenado da cultura e avaliar impactos do manejo da lâmina d'água nas características morfofisiológicas e na produtividade de grãos de cultivares contrastantes de arroz irrigado. O estado de N nas plantas foi avaliado a partir de índices de vegetação obtidos com a refletância do dossel à radiação ofertada por sensor óptico de baixa altitude. A partir da combinação de três bandas espectrais de refletâncias, 22 índices de vegetação (IV) foram calculados e avaliados quanto à sua eficiência em estimar o estado de N durante os períodos de crescimento do arroz irrigado. Os resultados deste estudo indicaram que os IV selecionados subestimam consideravelmente a biomassa seca de folhas e não estimaram com eficiência os indicadores de nitrogênio na cultura, como a concentração e o acúmulo de nitrogênio foliar, no período vegetativo. Maiores variações destes indicadores podem ser explicadas pelos IV nos períodos subsequentes. Os IV selecionados no processo de calibração mostraram-se altamente promissores para a explicação da variação da biomassa seca de folhas e do índice de área foliar nos períodos reprodutivo e de enchimento de grãos. Entretanto, performances modestas dos IV foram obtidas para estimativa da concentração de nitrogênio foliar no período reprodutivo. O índice de vegetação ajustado ao solo de borda vermelha modificado (M_RESAVI) e o índice de borda vermelha por diferença normalizada (NDRE) mostraram alta performance na estimativa do índice de nutrição nitrogenada (INN) em todos os períodos de crescimento, bem como no ciclo todo. Estes resultados mostram a importância do uso de sensores ativos com mais de duas bandas fixas, especialmente com a adição da banda de borda vermelha, para estimar com maior performance o estado de nitrogênio da cultura. Estudou-se também o efeito de manejos alternativos de irrigação no desenvolvimento fenológico, nas trocas gasosas, no acúmulo de biomassa e na produtividade do arroz irrigado tropical. Dois experimentos foram conduzidos em Goianira-GO de 2016 a 2018 para avaliar o efeito dos manejos de irrigação: inundação intermitente com aeração (IIA), inundação intermitente o ciclo todo (IIC) e inundação intermitente até o florescimento (IIF) em relação ao manejo de inundação contínua durante todo o ciclo (ICC). Nestes

¹Orientador: Dr. Alexandre Bryan Heinemann. Embrapa Arroz e Feijão.

experimentos, quatro cultivares de arroz foram estudadas: BRS A702 CL, BRS Catiana, BRS Pampeira e IRGA 424. Os dados de fenologia, trocas gasosas, dinâmica do crescimento e de produtividade foram submetidos à análise conjunta para produção de inferências gerais no cultivo. Os manejos da irrigação não afetaram o desenvolvimento vegetativo da cultura. A inundação intermitente com aeração prolongou o tempo para florescimento da cultivar BRS A702 CL. Constatou-se que é possível diminuir a oferta de água com a manutenção de solo saturado ou do uso da inundação intermitente até o florescimento, ou mesmo, durante todo o ciclo, sem comprometimentos à transpiração. Não foi observada relação direta entre o acúmulo de biomassa em virtude das diferenças na taxa fotossintética entre cultivares e manejos da irrigação. O acúmulo de biomassa seca foi reduzido pela ocorrência de menores acúmulos de radiação e graus-dia nas fases reprodutivas e de enchimento de grãos. A produtividade de grãos e o índice de colheita foram similares entre os manejos de irrigação investigados. Os resultados deste estudo permitem inferir que a gestão do estado de N no arroz irrigado pode ser feita a partir do INN estimado pelos índices M_RESAVI e NDRE e que estratégias que racionalizem o uso da água como: inundação intermitente com aeração (IIA) e inundação intermitente o ciclo todo (IIC) podem ser adotadas no cultivo do arroz irrigado tropical sem prejuízos à produtividade de grãos.

Palavras-chave: Ecofisiologia; Sensoriamento remoto de baixa altitude; Inundação intermitente; Arroz tropical; Agricultura inteligente.

ABSTRACT

SANTOS, M. P. dos. **Diagnosis of nitrogen status and water management in the cultivation of tropical irrigated rice**. 2021. 109 f. Thesis (Doctorate in Agronomy: Plant Production)–Escola de Agronomia. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2021.²

In Brazil rice production is concentrated in the South under the irrigated system. For reasons of food security, there is a need to distribute production in the country. Significant gains in grain yield have been associated with applications of high amounts of nitrogen. However, when assessing the efficiency of the use of nitrogen (EUN) [kg of grain produced / kg of applied N], utilization of less than 40% has been observed. Thus, strategic nitrogen management is crucial for high-efficiency agricultural production and sustainable agriculture. In addition to the need to increase the EUN, there is a growing interest in reducing the volume of water used in irrigated rice farming with the application of continuous water depth throughout the cycle. With the reduction in the volume of water applied with this management, in addition to the reduction in the cost of production, there is an increase in water use efficiency and EUN. Thus, intelligent and premeditated interventions in relation to natural resources must be carried out in order to optimize the management of N and to reduce water use, without reducing productivity. The objective of this study was to determine potential vegetation indices for diagnosing the nitrogen status of the crop and to evaluate impacts of water depth management on morphophysiological characteristics and grain yield of contrasting irrigated rice cultivars. The state of N in the plants was evaluated from vegetation indexes obtained with the canopy reflectance to the radiation offered by low altitude optical sensor. From the combination of three spectral bands of reflectance, 22 vegetation indices (IV) were calculated and evaluated for their efficiency in estimating the state of N during periods of growth of irrigated rice. The results of this study indicated that the selected IVs considerably underestimate the dry leaf biomass and did not efficiently estimate the nitrogen indicators in the crop, such as the concentration and accumulation of leaf nitrogen, in the growing season. Greater variations in these indicators can be explained by the IV in subsequent periods. The IV selected in the calibration process proved to be highly promising for explaining the variation of dry leaf biomass and the leaf area index in the reproductive and grain filling periods. However, modest IV performances were obtained to estimate leaf nitrogen concentration in the reproductive period. The vegetation index adjusted to the modified red edge soil (M_RESAVI) and the red edge index by normalized difference (NDRE) showed high performance in estimating the nitrogen nutrition index (INN) in all growth periods, as well as in the cycle whole. These results show the importance of using active sensors with more than two fixed bands, especially with the addition of the red border band, to better estimate the nitrogen status of the culture. The effect of alternative irrigation managements on phenological development, gas exchange, biomass accumulation and productivity of tropical irrigated rice was also studied. Two experiments were conducted in Goianira-GO from 2016 to 2018 to evaluate the effect of irrigation managements: intermittent flooding with aeration (IIA), intermittent flooding throughout the cycle (IIC) and intermittent flooding until flowering (IIF) in relation to management continuous flooding throughout the cycle (ICC). In these experiments, four rice cultivars were studied: BRS A702 CL, BRS Catiana, BRS Pampeira and IRGA 424. The data on phenology, gas exchange, growth dynamics and productivity were subjected to joint

²Adviser: Dr. Alexandre Bryan Heinemann. Embrapa Arroz e Feijão.

analysis to produce general inferences in cultivation. Irrigation management did not affect the vegetative development of the crop. The intermittent flooding with aeration prolonged the flowering time for cultivar BRS A702 CL. It was found that it is possible to decrease the water supply with the maintenance of saturated soil or the use of intermittent flooding until flowering, or even, throughout the cycle, without compromising transpiration. There was no direct relationship between the accumulation of biomass due to differences in the photosynthetic rate between cultivars and irrigation management. The accumulation of dry biomass was reduced by the occurrence of smaller accumulations of radiation and degree-days in the reproductive and grain filling phases. Grain productivity and harvest index were similar between the irrigation management investigated. The findings of this study allow us to infer that the management of the state of N in irrigated rice can be done from the INN estimated by the M_RESABI and NDRE indices and that strategies that rationalize water use such as: intermittent flooding with aeration (IIA) and intermittent flooding the whole cycle (IIC) can be adopted in the cultivation of tropical irrigated rice without damage to grain productivity.

Key words: Ecophysiology, Low-altitude remote sensing; Intermittent flooding; Tropical rice; Smart agriculture

1 INTRODUÇÃO

O arroz (*Oryza sativa* L.) é uma das principais culturas com potencial para aumento de produção e, possivelmente, de combate à fome no mundo. É ainda excelente fonte de energia, por apresentar carboidrato do tipo complexo e possuir elevada concentração de amido no grão (Santos & Rabelo, 2008).

A cultura pode ser cultivada em dois sistemas: sequeiro (terras altas) e irrigado. No Brasil a rizicultura irrigada em ambiente de várzeas (subtropical) é responsável por 80% da produção nacional, sendo considerada um estabilizador da safra (Breseghello & Neves 2016; Conab, 2020a). Embora o país não figure entre os principais produtores mundiais de arroz, no bloco econômico do Mercosul é responsável por mais de 75% da produção do grão (Conab, 2019).

Fatores genéticos (aptidão de cultivares), manejo nutricional, disponibilidade hídrica e condições ambientais influenciam diretamente no potencial produtivo da cultura (Teixeira et al., 2015). A interação destes fatores pode alterar a fenologia e o desenvolvimento da planta de arroz e, por sua vez, a produtividade (Walter et al., 2010). Atualmente, a produtividade média brasileira da cultura é de 6.714 kg ha⁻¹ (Conab, 2020b), considerada baixa frente ao potencial produtivo das cultivares modernas.

Do ponto de vista nutricional, o nitrogênio (N) é o nutriente mais requerido pela cultura, bem como para a maioria das culturas de interesse econômico. Para garantir a produção sustentável de alimentos, os produtores agrícolas investem em uma quantidade significativa de adubo nitrogenado. Zhang et al. (2013) relataram que a eficiência no uso de N (EUN) das principais culturas alimentares da China era inferior a 30%, e que em países desenvolvidos da Europa e da América esse índice estava em torno de 40%. O gerenciamento estratégico do uso de fertilizantes nitrogenados é, portanto, crucial para atingir os objetivos de alto rendimento, qualidade e eficiência na produção de arroz no Brasil. Soma-se a estas preocupações a ocorrência de distúrbios ambientais, incremento na susceptibilidade da cultura às pragas e doenças, e redução da qualidade nutricional quando o N é fornecido em excesso nas áreas de produção (Lu et al., 2017). O manejo de precisão do N é fundamental para otimizar o suprimento de N demandado pela cultura, tanto no espaço quanto no tempo. O sucesso dessa estratégia, contudo, é dependente do desenvolvimento de tecnologias

rápidas que diagnostiquem em tempo real o estado de N da cultura durante o período de crescimento.

O monitoramento em tempo real do estado nitrogenado por meio de sensores ativos de dossel de plantas constitui ferramenta potencial para incrementos na produtividade da cultura. A utilização de índices de vegetação obtidos por meio da refletância do dossel de plantas à bandas de radiação emitidas por sensores ativos permite a determinação do estado nitrogenado na cultura do arroz em fases específicas do crescimento, bem como no ciclo todo. Pode-se com isso diagnosticar o estado nitrogenado da cultura desde as fases iniciais até a entrada na fase reprodutiva, quando a demanda de nitrogênio (N) é maior. Além de subsidiar a tomada de decisão para o manejo da adubação nitrogenada, esse conhecimento pode ser útil ainda para a estimativa da produtividade da cultura, possibilitando o acompanhamento em tempo real da expectativa de produção previamente à colheita. A predição do estado nitrogenado e da produtividade da cultura é importante tanto para assegurar menor risco aos produtores em relação ao manejo da adubação nitrogenada, quanto por parte dos órgãos governamentais, visando à adoção de políticas públicas para o manejo das reservas de alimentos (Hoogenboom, 2000).

Aliada a necessidade de aumento da EUN há o interesse crescente na redução do volume de água utilizado na rizicultura irrigada com a aplicação da lâmina d'água contínua durante todo o ciclo. Com a redução do volume de água aplicada com este manejo, além da redução no custo de produção, vislumbra-se aumento da eficiência no uso da água e da EUN, pois as perdas de N por lixiviação podem ser minimizadas com a redução de entrada de água na área cultivada (Wang et al., 2017).

Ao longo dos últimos anos têm-se buscado flexibilizar o manejo da lâmina d'água contínua no cultivo do arroz irrigado a fim de que localidades situadas fora da região Sul do país possam também figurar expressivamente no cenário de produção do grão. Esta flexibilização é necessária porque nos ambientes tropicais (Sudeste, Centro-Oeste, Norte e Nordeste) manter a lâmina d'água constante durante todo o ciclo tem sido um grande desafio. Nestes locais condições climáticas como altas temperaturas e baixa umidade relativa do ar são desfavoráveis. Essas condições promovem elevação da temperatura da lâmina d'água e, conseqüentemente maximizam a evaporação da água e a respiração da cultura, intervindo negativamente em processos fisiológicos como a fertilização das espiguetas, refletindo em menores produtividades e baixa eficiência no uso da água. Por outro lado, a limitação no fornecimento de água para a cultura do arroz, do ponto de vista morfológico e fisiológico,

apresenta várias complicações, tanto na fase vegetativa, quanto reprodutiva; o que consequentemente, altera a massa dos grãos e a produtividade por área (Silva, 2012). Uma alternativa ao fornecimento da água de irrigação para o cultivo do arroz irrigado tropical seria a inundação intermitente. Esse manejo, que faz parte da agricultura inteligente em relação ao clima (Bayer et al., 2015), busca reduzir o uso de água na irrigação do arroz e as emissões de metano (CH₄) decorrentes do alagamento, alternando drenagem e inundação nas áreas de produção de arroz, sem afetar a produtividade.

A compreensão dos efeitos do uso de tecnologias de diagnóstico em tempo real com vistas ao uso racional do N e do manejo da lâmina d'água no cultivo do arroz irrigado principalmente nas regiões tropicais, ainda não está bem esclarecida. Neste contexto, a adoção de sensores ativos de dossel de plantas, e ainda, manejos alternativos da lâmina d'água no cultivo irrigado, podem constituir ferramentas potenciais para incrementos na produtividade da cultura.

Assim, intervenções inteligentes e premeditadas em relação aos recursos naturais devem ser realizadas de forma a otimizar o manejo do N e a reduzir o uso de água, sem redução da produtividade. Objetivou-se neste estudo determinar potenciais índices de vegetação para diagnóstico do estado nitrogenado da cultura e avaliar impactos do manejo da lâmina d'água nas características morfofisiológicas e produtividade de grãos de cultivares contrastantes de arroz irrigado.

CAPÍTULO 1

ARROZ IRRIGADO: ECOFISIOLOGIA E ALTERNATIVAS PARA DIAGNÓSTICO DO ESTADO NITROGENADO DA PLANTA E REDUÇÃO DA QUANTIDADE DE ÁGUA APLICADA DURANTE O CULTIVO³

Marcos Paulo dos Santos⁴, Alexandre Bryan Heinemann⁵

³ Capítulo elaborado conforme as normas do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (*PPGA - UFG*).

⁴ Universidade Federal de Goiás, Departamento de Fitotecnia, Goiânia, GO, Brasil. E-mail: marcospaulo_agronomo@hotmail.com;

⁵ Embrapa Arroz e Feijão, Departamento de Pesquisa, Santo Antônio de Goiás, GO, Brasil. E-mail: alexandre.heinemann@embrapa.br.

2 ARROZ IRRIGADO: ECOFISIOLOGIA E ALTERNATIVAS PARA DIAGNÓSTICO DO ESTADO NITROGENADO DA PLANTA E REDUÇÃO DA QUANTIDADE DE ÁGUA APLICADA DURANTE O CULTIVO

2.1 CULTURA DO ARROZ

O arroz (*Oryza sativa* L.) é uma espécie hidrófila, cujo processo evolutivo tem levado a sua adaptação às mais variadas condições edafoclimáticas. É também a cultura com maior potencial para aumento de produção e, possivelmente, de combate a fome no mundo. O continente asiático é responsável pelo cultivo de aproximadamente 90% de todo o arroz produzido no mundo, basicamente no sistema irrigado (Silva, 2014). Em seguida figuram os continentes americano, africano, europeu e oceânico, com 5%, 4%, 0,5% e 0,5% da produção mundial de arroz, respectivamente (Silva, 2014).

O arroz constitui uma excelente fonte de energia devido ao tipo de carboidrato presente (complexo) e à elevada concentração do amido no grão. A ingestão diária de 150 g de arroz cru (cerca de 400 a 450 g de arroz cozido) contribui com aproximadamente 20% do aporte energético e 35% da ingestão de carboidratos em uma dieta de 2.500 kcal, o que corresponde a um valor médio aproximado das necessidades energéticas de indivíduos do sexo masculino, com mais de 18 anos, 70 kg e atividade física leve, de acordo com a Organização Mundial de Saúde (Santos & Rabelo, 2008).

Na Ásia, estão localizados os oito maiores produtores mundiais de arroz, com destaque expressivo para China e Índia, 1º e 2º maiores produtores do cereal no mundo, respectivamente (Silva, 2014). A China responde por 27% da produção mundial seguida pela Índia com 21%. Embora apresente expressiva participação na produção do cereal, a China não participa de forma ativa no comércio internacional, sendo a sua produção fortemente controlada pelo governo, visando equilibrar a oferta e a demanda interna (Conab, 2019). O Brasil situa-se em 9º lugar, sendo, portanto, o maior produtor de arroz fora do continente asiático, com uma produção correspondente a menos de 2% da mundial (Conab, 2019).

No bloco econômico do Mercosul, o Brasil responde por mais de 75% da produção de arroz (Conab, 2019). Na safra 2019/20 foram produzidas 11.126,1 mil toneladas em uma área de 1,657 milhões de hectares. A produtividade média foi de 6.714 kg ha⁻¹ (Conab, 2020a), e o consumo *per capita* de arroz polido foi estimado em 35 kg habitante⁻¹ ano⁻¹.

Entre 1975 e 2005, o Brasil reduziu a área de plantio em torno de 26% e, mesmo assim, aumentou sua produção de arroz em 69%, graças ao aumento de 128% na produtividade média. O crescimento da produção permitiu ao país tornar-se autossuficiente em arroz na safra 2003/2004. Em 2005, o Brasil exportava apenas 5,45% do arroz produzido, o que correspondia a 728 mil das 130.355 mil toneladas de arroz produzida. Atualmente, embora tenha ocorrido decréscimo no cenário de projeção da produção (10568,8 mil toneladas) em comparação a safra 2004/2005, o percentual de exportação aumentou de 5,45 para 10,40% da produção (Conab, 2020b).

2.2 PRODUÇÃO DE ARROZ IRRIGADO NO BRASIL

O arroz irrigado é um dos cultivos milenares da humanidade, sendo atualmente cultivado nos cinco continentes do mundo. Razão pela qual mostra sua excelência e adaptabilidade como planta cultivada. É ainda uma das poucas espécies que pode germinar e crescer em solos permanentemente encharcados (Perata & Alpi, 1993), devido à presença de aerênquima no colmo e nas raízes da planta, que possibilitam a passagem de oxigênio do ar para a camada da rizosfera. No Brasil mais de 75% da área de cultivo do arroz predomina sob sistema irrigado, especialmente no ecossistema de várzeas. O uso da irrigação possibilita a cultura produtividade média de 7943 kg ha⁻¹, valor que contrasta bastante com a média de produtividade no cultivo de terras altas, que é de apenas 2441 kg ha⁻¹ (Conab, 2020a).

A importância socioeconômica da cultura do arroz para o Brasil vai além da região Sul que é responsável por mais de 80% do total produzido no país (Conab, 2020b). Na região tropical (regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste) a área cultivada com arroz irrigado gira em torno de 10%, contribuindo com cerca de 11% da produção total brasileira nesse ecossistema. As características dos solos e condições de hidromorfismo tornam estas áreas aptas à orizicultura irrigada (Santos & Rabelo, 2008).

Na região Sul do país, merece destaque o estado do Rio Grande do Sul. Grande impulsionador do cultivo do arroz no Brasil, que aumentou em 88,97% sua produção entre

as safras 1990/91 e 2012/13 e na safra 2018/19 foi responsável sozinho por 70% de toda a produção do grão no Brasil (Conab, 2020b). Destaque especial deve ser dado também ao vale do Araguaia, pois, constitui uma das regiões com condições de solo e de clima promissoras para a expansão da orizicultura brasileira. Soma-se aos fatores citados anteriormente, sua localização na região central do país, o que possibilita o atendimento do mercado das regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste (Santos & Rabelo, 2008).

Na região Norte do país, segunda maior produtora, Tocantins é um caso à parte. Nesse estado, as lavouras de sequeiro têm perdido área nos últimos anos, enquanto as lavouras irrigadas têm crescido. Isso explica o ganho expressivo de produtividade nas últimas 10 safras, sendo atualmente responsável por mais de 65% da produção da região Norte (Conab, 2020b).

A região Centro-Oeste, onde está localizado o estado de Goiás, é a antepenúltima colocada no ranking das regiões brasileiras, com 5,5% do total produzido, estando a frente das regiões Nordeste e Sudeste do país que produzem 2,9 e 0,43%, respectivamente. O principal estado produtor de arroz irrigado dessa região é o Mato Grosso do Sul. Já, no estado do Mato Grosso, a produção irrigada é de baixa expressão, em virtude das condições de topografia e drenagem do solo, que não são favoráveis. No estado de Goiás foram elaboradas iniciativas de ampliar a produtividade e fixar a cultura em alguns municípios com aptidão para o cultivo irrigado. Flores de Goiás, São João d'Aliança, Formosa e São Miguel do Araguaia são os principais municípios onde há o cultivo irrigado, correspondendo a aproximadamente 16.600 hectares e produtividade média de 6.000 kg ha⁻¹ (Conab, 2020c).

Na região Sudeste, o cultivo do arroz em sistema de várzea exerce pouca expressão sobre a produção nacional. O arroz irrigado do Nordeste tem grande importância, uma vez que, na região, o cultivo é realizado predominantemente por pequenos agricultores, o que torna uma renda segura para o produtor (Rangel et al., 1999). Nesse sistema de cultivo, a cultura não depende das variações na precipitação pluvial, tão comuns na região.

2.3 ECOFISIOLOGIA DO ARROZ IRRIGADO

Os critérios morfológicos e/ou fisiológicos da planta de arroz não possibilitam a diferenciação do ecossistema ao qual o arroz está adaptado, várzea ou terras altas (Chang & Bardenas, 1965; Pinheiro, 2006). Entretanto, sabe-se que o arroz cultivado sob o sistema de sequeiro evoluiu do arroz irrigado, devido à pressão exercida pelo homem, com sua migração

de áreas baixas para locais mais elevados. Com isso, alterações e adaptações se deram principalmente na disposição do sistema radicular para o arroz de sequeiro, alterando a relação raiz-parte área para possibilitar adaptação às condições de menor disponibilidade hídrica desse ambiente. Embora os processos fisiológicos das plantas de arroz não se diferenciem entre ecossistemas de cultivo, eles podem ser otimizados por ocasião destes, influenciando na produtividade (Pinheiro, 2006).

As cultivares de arroz irrigado cultivados no Brasil são pertencentes à subespécie *indica*, sendo que as seleções locais de materiais se deram a partir de coleções de linhagens semianãs do grupo *Indica* introduzidas dos programas de melhoramento do International Rice Research Institute (IRRI), localizado nas Filipinas e do Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Colômbia, e de resultado do cruzamento entre os referidos materiais (Pinheiro, 2006; Conab, 2015). Os materiais oriundos da subespécie *indica* possuem colmos espessos, baixa estatura, alta capacidade de perfilhamento, folhas curtas e eretas com baixo ângulo de inserção e ciclo tardio. Em relação aos grãos, eles são longos, estreitos e levemente planos (Evans et al., 1984).

O ciclo da planta de arroz pode ser dividido em três fases: vegetativa, reprodutiva e fase de maturação (enchimento de grãos). Na busca por caracterizar os eventos fenológicos que ocorrem durante o ciclo da cultura diversas escalas foram confeccionadas (Vergara, 1970; Yoshida, 1981; Counce et al., 2000). Dentre essas, a escala proposta por Counce et al. (2000) é uma das mais utilizadas no Brasil. Nessa proposta, a fase de plântula é separada da fase vegetativa e a fase de enchimento de grãos é considerada como parte da fase reprodutiva. A avaliação da ontogenia da planta utilizada pela escala subdivide o crescimento e desenvolvimento da planta em três subperíodos: desenvolvimento da plântula, vegetativo e reprodutivo, sendo as suas subdivisões representadas pelas letras S, V e R. A fase de plântula é composta de quatro estádios de crescimento. Já a fase vegetativa é variável, i.e, 1 a n , cujo número precedido da letra V, indica o número de folhas completamente expandidas presentes no colmo principal. A fase reprodutiva é composta de dez estádios, variando de 0 a 9, cujo número precedido da letra R, representa o estádio de desenvolvimento dos grãos (Sosbai, 2010).

O desenvolvimento da planta de arroz é geralmente expresso pela idade cronológica, ou seja, em número de dias após emergência, e não pela idade fisiológica. Os intervalos de tempo específicos entre os estádios e os números totais de folhas desenvolvidas podem variar entre cultivares, estações de crescimento, épocas de semeadura e regiões de

cultivo (Freitas et al., 2006). Esses dois últimos têm sido alvo de pesquisas em várias partes do mundo, na tentativa de otimizar o desenvolvimento da planta em um período que propicie elevadas produtividades.

A atividade fotossintética, área foliar das plantas e a partição de compostos orgânicos produzidos pela fotossíntese para os grãos são os principais processos fisiológicos que interferem nos padrões de crescimento, desenvolvimento e rendimento econômico da cultura (Pinheiro, 2006; Pinzón-Torres & Schiavinato, 2008; Heinemann et al., 2009). Em vegetais com fotossíntese C3, grupo no qual a cultura do arroz se insere, a relação CO_2/O_2 é menor devido à ausência do mecanismo concentrador (ciclo de carboxilação do fosfenolpiruvato nas células do mesófilo e descarboxilação nas células da bainha vascular). O uso de CO_2 absorvido da atmosfera na etapa de carboxilação faz com que sua concentração reduza sem o mecanismo concentrador de CO_2 , tornando o interior celular mais concentrado em O_2 , favorecendo a oxidação da rubisco (enzima ribulose bifosfato carboxilase/oxigenase localizada no cloroplasto) e conseqüentemente a fotorrespiração. Essa é a causa das plantas C4 serem mais eficientes na conversão de CO_2 em compostos orgânicos em comparação às plantas C3. Experimentos de simulação indicaram que a supressão da fotorrespiração em arroz poderia causar acréscimos de produtividade de 6 a 9% (Penning de Vries et al., 1991). Contudo, eliminar essa reação em plantas C3 não tem sido tarefa fácil, mesmo com o advento da engenharia genética.

Outro processo que reduz a eficiência de fixação de carbono em plantas de arroz é a respiração de manutenção, que consome cerca de 25% do carbono fixado. Soma-se a esta baixa eficiência a alta exigência em água pela cultura. Via de regra por ser uma planta C3, o arroz demanda 500 moléculas de água para cada molécula de CO_2 fixado, o que contrasta basta com a demanda de plantas C4 e CAM, que é de apenas 250 e 50 moléculas de água, respectivamente, para cada molécula de CO_2 fixada. Isso faz com a eficiência no uso água (EUA) pela cultura seja baixa. No Brasil e em outros países, onde predomina o cultivo da cultura por irrigação via inundação contínua durante todo o ciclo isso é ainda mais agravante. Neste sistema o volume de água aplicado varia entre 8000 e 10.000 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ (Pimenta, 2018), que relacionado com um acúmulo médio de biomassa de grãos da ordem de 6.500 kg ha^{-1} resulta em um valor de EUA (biomassa de grãos/volume de água utilizado) de apenas 0,72 g L^{-1} .

A eficiência da fotossíntese é a chave para a determinação do potencial produtivo, sendo dependente do tipo de planta, superfície foliar ativa, agentes bióticos, como

insetos-praga e patógenos durante o estabelecimento da cultura, disponibilidade hídrica, fatores climáticos, e ainda, do manejo nutricional. Dos elementos químicos que atuam na fotossíntese, merece destaque o papel do nitrogênio (N). Ele pode regular a fotossíntese em estado estacionário das folhas através de várias estratégias, como um grande investimento de N da folha para a Rubisco, regulando ainda, a abertura estomática (Sun, 2016).

Para atingir uma alta taxa fotossintética, aproximadamente 75% do N foliar é alocado para os cloroplastos (Evans & Terashima, 1987; Pooter & Evans, 1998), dos quais cerca de 27% são utilizados na Rubisco (Evans, 1989; Makino et al., 1997). Devido ao vasto investimento de N para formação da Rubisco e fornecimento insuficiente de CO₂ aos cloroplastos, o estado de ativação da Rubisco geralmente é muito baixo, especialmente sob alto suprimento de N (Warren, 2004; Li et al., 2013). Isso sugere que, em comparação com uma baixa oferta de N, uma fração menor de Rubisco (e talvez de outras enzimas do ciclo de Calvin-Benson) é necessária para ser ativada sob alto suprimento de N para recuperação da fotossíntese ao mudar de níveis baixos a altos de radiação solar (Sun, 2016). Em outras palavras, a resposta rápida da fotossíntese à mudança de irradiância pode ser mais rápida sob alta oferta de N do que sob baixa oferta de N.

Comparado com o suprimento suficiente de N, a deficiência de N pode diminuir a abertura estomática aumentando sua sensibilidade ao ácido abscísico endógeno (Radin et al., 1982), diminuindo o status hídrico da planta através da repressão da expressão da aquaporina, aumentando a formação de aerênquima e diminuindo a abertura estomática (Ishikawa-Sakurai et al., 2014). Assim, é importante que a combinação da oferta de N sob alta e baixa radiação solar seja investigada também em culturas como o arroz, pertencente ao grupo C3, onde a eficiência da fotossíntese é reduzida por ocasião da fotorrespiração, em comparação às plantas C4 e CAM (Taiz & Zeiger, 2017).

Dentre os fatores meteorológicos, a temperatura do ar e a radiação solar são os que mais influenciam o potencial produtivo da cultura do arroz. As faixas de temperaturas prejudiciais variam de acordo com o estágio fenológico da planta, sendo que as faixas de temperaturas ótimas variam de 20 a 35°C para a germinação, de 30 a 33°C para a floração e de 20 a 25°C para a maturação (Yoshida, 1981). Temperaturas superiores a 35°C podem ser prejudiciais a cultura chegando a causar esterilidade das espiguetas, efeito também observado com temperaturas abaixo de 15°C (Steinmetz et al., 2013) e 12°C (Yoshida, 1981), segundo o último, desde que ocorram por um período acima de 6 dias.

No Brasil o principal risco relatado em relação a temperatura é o estresse por frio, observado principalmente em semeaduras mais tardias no estado do Rio Grande do Sul. As plantas de arroz quando submetidas a temperaturas abaixo de 15°C durante a microsporogênese podem ser impactadas de maneira irreversível, refletindo diretamente na produtividade já que nessa condição ocorre a esterilidade das espiguetas. Contudo, além da esterilidade verificada por condições de frio, a planta de arroz também é suscetível a temperaturas elevadas, sendo este um dos motivos que podem afetar a produtividade. Os dois ambientes de produção (tropical e subtropical) de arroz irrigado no Brasil estão susceptíveis a esses limiares de temperatura extrema (abaixo de 15°C e acima de 35°C) (Santos et al., 2017). Assim há necessidade do zoneamento estratégico de cultivares e janelas de semeadura para cada ambiente, visando a fuga de condições desfavoráveis quanto a temperatura.

A discussão do efeito da mudança climática na variável temperatura tem motivado alguns estudos, que buscam correlacionar também o aumento da concentração de CO₂ disponível para fotossíntese. Embora esse aumento de CO₂ possa ser favorável, estudos indicam que esse efeito positivo pode não ser percebido devido ao efeito negativo do aumento da temperatura do ar. Com as temperaturas maiores, se espera que ocorra um gasto energético maior da planta devido a exposição à maiores temperaturas noturnas, que impactarão em uma maior respiração.

De forma semelhante à temperatura, a radiação solar contribuiu significativamente para o sucesso no cultivo do arroz. Seu impacto se dá especialmente nas fases reprodutiva (da diferenciação da panícula à floração; quando um aporte de radiação abaixo do ideal afeta o número de grãos por panícula) e de maturação (da floração à maturação fisiológica do grão; quando a baixa incidência reduz o enchimento e a massa ideal dos grãos) (Steinmetz et al., 2013). Estudos realizados no Sul do Brasil e em Goianira (Santos et al., 2017) mostraram que maiores produtividades são obtidas com níveis crescentes de radiação solar, sendo observada relação linear.

A eficiência no uso da radiação é um fator importante sob o ponto de vista genético. Cultivares que apresentam maior eficiência no uso da radiação tendem a ter melhor desempenho produtivo e este fator pode ser decisivo na escolha de qual cultivar deve ser adotada pelos produtores. Santos et al. (2017) mostraram que em Goianira-GO ocorre a diminuição da produtividade em comparação à produtividade observada em Cachoeirinha-RS, devido ao menor acúmulo de radiação solar fotossinteticamente ativa durante o período

reprodutivo. Nessa fase, a demanda por carboidratos é alta devido à formação e enchimento das espiguetas que atuam como drenos e, por isso, quando há menor acúmulo desse fator o declínio na produtividade também é observado. Nesse mesmo estudo, também foi verificado que há uma diferença importante em relação à radiação fotossinteticamente ativa (PAR) acumulada se comparados os ambientes tropical e subtropical, sendo observados até 400 MJ m⁻² dia⁻¹ de PAR acumulada de no ambiente subtropical, enquanto na região tropical a PAR acumulada ficou próxima a 300 MJ m⁻² dia⁻¹. Aportes menores de radiação solar durante o período reprodutivo impactam substancialmente o número e a massa das espiguetas, o que afeta, em última instância, a produtividade obtida.

Dada essa importância, o trabalho do melhoramento genético para a cultura do arroz passou por um período no qual buscou-se a geração de cultivares com atributos morfológicos que favorecessem a interceptação de radiação solar. Por isso, plantas com folhas eretas (cultivares modernas) passaram a ter preferência no cultivo, pois essa arquitetura de folhas possibilita maior penetração de energia radiante no dossel, permitindo melhor eficiência no uso da radiação solar (Pinheiro, 2006; Dingkuhn et al., 2015). Esse tipo de planta apresenta outras características que promovem uma melhor utilização da radiação solar, tais como folhas e colmos curtos, e também alta capacidade de perfilhamento (Sakamoto et al., 2006). A associação desses elementos permite a observação de maior área foliar disponível para interceptação da energia radiante, o que contribui dentre outros fatores, para que cultivares desse tipo apresentem alto potencial produtivo.

De forma geral a deficiência hídrica não causa prejuízos muito severos à produção quando ocorre na fase vegetativa da planta de arroz (Pinheiro et al., 2006). Dentre os períodos da fase reprodutiva, destacam-se como especialmente sensíveis o período de redução da célula-mãe do pólen e o de florescimento (Matsushima, 1968). Como a água participa de todos os processos fisiológicos, a deficiência hídrica exerce efeito tanto sobre a produção de biomassa quanto no rendimento de grãos. Sua intensidade pode ser estimada pela aferição do potencial de água na folha, sendo que na fase de floração e de enchimento de grãos, potenciais de água na folha inferiores a -1,75 MPa pode anular completamente a fotossíntese (Machado et al., 1996; Pinheiro, 2006)

Além do suprimento adequado de N e zoneamento climático estratégico para aproveitamento da radiação solar pela cultura, fatores como: época e densidade de semeadura, espaçamento e manejo da aplicação de nutrientes, principalmente os de alta solubilidade, interferem diretamente na fotossíntese, com reflexos sobre o índice de área

foliar (IAF). Este índice, por sua vez, determina a interceptação de luz pelo dossel das plantas. Nesse sentido, estratégias visando inter-relacionar esses fatores, para obtenção de IAF adequado ao alcance de altas produtividades, têm sido buscadas para o arroz irrigado em todos os locais de produção no país.

Os padrões de alocação de fitomassa para os grãos também exercem grande influência na produtividade. As condições culturais e ambientais desempenham um papel importante nessa partição. Altas doses de nitrogênio tendem a reduzi-la (Yoshida & Ahn, 1968), bem como limitações hídricas e de radiação solar na fase de enchimento de grãos (Dingkuhn et al., 2015).

Ainda no tocante ao tipo de planta de arroz ideal para o cultivo irrigado, Dingkuhn et al. (2015) propuseram que deveriam ser buscadas alterações fisiológicas, como o prolongamento do período de maturação, aumento do gradiente vertical do dossel, redução do crescimento das folhas no final da fase vegetativa e reprodutiva e expansão da capacidade de armazenamento de compostos orgânicos no caule. O aumento do índice de colheita e da massa dos grãos e a redução da esterilidade das espiguetas devido às suas altas correlações com a produtividade são considerados prioritários em programas de melhoramento de arroz que visem obter cultivares mais produtivas (Guimarães et al., 2008).

Recentemente, o uso de ferramentas moleculares tem sido enfoque nas diversas instituições de pesquisa no mundo. Nessas pesquisas tem se buscado a identificação, bem como o isolamento de genes responsáveis por conferir modificações morfofisiológicas na planta que possam influenciar positivamente a produtividade, como por exemplo, bainhas das folhas de coloração verde, folhas eretas (Sakamoto et al., 2006), senescência vagarosa (Hörtensteiner, 2009), panículas longas (Lestari et al., 2016), maior capacidade de rebrota da soca, entre outras características desejáveis, que possam ser empregadas em programas de melhoramento genético do arroz (Sutario, 2014).

2.4 DIAGNÓSTICO DO ESTADO NITROGENADO EM PLANTAS USANDO REFLETÂNCIA DE DOSSSEL

Após a água, o nitrogênio (N) é sem dúvida o fator limitante mais importante para a produção agrícola. A deficiência de N na planta de arroz resulta em baixo acúmulo de biomassa da parte aérea e reduz o rendimento, enquanto o excesso de nitrogênio causa doenças e uma série de problemas ambientais (Yuan, 2016). Ganhos significativos na

produtividade de grãos tem sido associado com aplicações de altas quantidades desse nutriente. Contudo, quando avaliada a eficiência de sua aplicação (kg de grão produzido / kg de N aplicado) tem-se observado ineficiência do uso deste recurso (Wang et al., 2017, Guo et al., 2016). Deste modo, o gerenciamento ideal de N é crucial para a produção agrícola de alta eficiência e agricultura sustentável. Associado às altas taxas de entrada de fertilizantes nitrogenados, o momento inadequado da aplicação contribui para a baixa eficiência no uso de N pelas culturas agrícolas no mundo (Zhang et al., 2019). Uma das razões para esse uso inadequado de N na agricultura é a falta de ferramentas práticas de diagnóstico do N na produção agrícola.

Tradicionalmente, parâmetros agronômicos, como índice de área foliar (IAF) e a biomassa seca de plantas (BSP) são obtidos em diferentes estádios de crescimento e usados para prever o rendimento potencial da cultura. Modelos regressivos são construídos para relacionar quantitativamente esses parâmetros com o rendimento final, resultando na recomendação de taxas de aplicação de N em fases específicas do crescimento da cultura (Kulig et al., 2010). Contudo, o IAF não tem relação direta com o aporte de N na folha, pois o acúmulo de N não acompanha o acúmulo de biomassa (Li et al., 2012; Wang et al., 2016), o que dificulta o gerenciamento do fornecimento de N para a cultura pelo uso do IAF e da BSP.

As duas principais abordagens para satisfazer a demanda de N as culturas são o uso de métodos de diagnóstico do N orgânico do solo e do teor de N na planta. Durante muitos anos, a concentração de N na folha (CNF) foi usada para monitorar o estado de N da cultura do arroz (Peng et al., 1993; Tian et al., 2011). No entanto, esse método, que utiliza amostragem foliar e análise laboratorial, é destrutivo, demorado e caro. Em alguns locais, devido à demora para obtenção dos resultados das análises, esse método não possibilita a correlação da deficiência de N na planta no mesmo ano agrícola, servindo apenas com critério indicativo para os próximos anos.

Medidas indiretas da CNF constituem uma maneira simples, rápida e não destrutiva de estimar o teor de N das folhas de arroz. Entre os vários métodos indiretos, a detecção mais amplamente adotada é o detector de clorofila (Feng et al., 2015a; Yuan et al., 2016; Zhiadi et al., 2008; Zhao et al., 2016), contudo as leituras são em pontos específicos das folhas, que por sua vez apresentam variada atividade metabólica em uma mesma planta, além de ser trabalhoso para aplicação em grandes áreas. Os sensores de dosséis de plantas, por outro lado, apresentam maior praticidade para uso em áreas extensas. Outra vantagem

do uso de sensores de dosséis é que estes, por serem ativados artificialmente, não são dependentes da disponibilidade de luz ambiental (Feng et al., 2015b; Padilla et al., 2018; Yao et al., 2012;).

A literatura reporta o uso de alguns sensores como o GreenSeeker sensor (Trimble Navigation Limited, Sunnyvale, California, USA), Crop Circle ACS-210 (Holland Scientific Inc., Lincoln, Nebraska, USA) and Crop Spec (Topcon Positioning Systems, Inc., Livermore, California, USA) para obtenção de índices de vegetação e estimação do estado de N em arroz (Martin et al., 2012; Yu et al., 2013). Todavia estes sensores, embora muito utilizados, são limitados no fornecimento de bandas de radiação (geralmente apenas duas bandas fixas: vermelho e infravermelho próximo (NIR); NIR e verde ou ainda NIR e vermelho distante, respectivamente) o que permite a obtenção de índices restritivos como o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e índice de vegetação de razão (RVI, NIR/Red). Isto pode ser uma limitação porque os comprimentos de onda e os índices de vegetação ótimos variam para diferentes parâmetros biofísicos da cultura e estádios de crescimento.

Por exemplo, nas fases iniciais do crescimento do arroz à água no fundo pode influenciar significativamente a refletância da copa. Por outro lado, o NDVI pode se tornar saturado com alto índice de área foliar (por exemplo, para $IAF > 3\text{m}^2.\text{m}^2$) ou médio a altas condições de biomassa (por exemplo, para biomassa $> 3,74\text{ t ha}^{-1}$ como no caso do trigo de inverno), dificultando o uso do NDVI para sistemas de alto rendimento (Cao et al., 2013; Li et al., 2010). Outros trabalhos têm mostrado que também em fases mais avançadas do crescimento vegetal, o NDVI tem mostrado ser limitado para estimar a produtividade. Spitzkó et al. (2016) detectaram baixa relação entre NDVI e rendimento após antese no milho ($r < 0,5$), no arroz Tubaña et al. (2012) também verificaram baixa explicação ($R^2 < 0,5$) do rendimento relativo pelo NDVI no período compreendido entre a diferenciação da panícula e as duas semanas subsequentes. Neste sentido, sensores de dosséis ativos com mais de duas bandas espectrais, como o Crop Circle ACS-430 e ACS-470 (Holland Scientific, Inc., Lincoln, NE, EUA), podem ter o potencial de melhorar o desempenho na predição do estado de N e conseqüentemente no rendimento de grãos da cultura do arroz (Cao et al., 2016).

Esses sensores podem ser configurados pelo usuário possibilitando a escolha simultânea de três bandas espectrais entre seis disponíveis, que cobrem as regiões azul (450 nm), verde (550 nm), vermelha (650 nm, 670 nm), vermelho distante (730 nm) e infravermelho próximo ($> 760\text{ nm}$). Como resultado, muitos índices de vegetação espectral

potenciais podem ser derivados pelos dados coletados. Esses índices podem ser adequados para estimação de vários indicadores do estado nitrogenado como a concentração de N na Folha, o acúmulo de N na folha, índice nutricional de N (INN), e a curva crítica de diluição de N (N_c), tornando-se úteis e práticos para descrever o status de N durante um estágio de crescimento específico do arroz (Zhang et al., 2019). Dentre esses indicadores, o INN é amplamente aplicável, pois, apresenta uma relação bem estabelecida entre CNF e a biomassa vegetal (Guo et al., 2019). Quando o valor do $INN = 1$, a nutrição de N é considerada ideal, enquanto $INN > 1$ e $INN < 1$ indicam excesso e nutrição deficiente de N, respectivamente (Lemaire et al., 2008; Zha et al., 2020; Zhao et al., 2016;).

Outro ponto interessante é o que o INN do arroz captura as variações de estádios de crescimento, taxas de fornecimento de N, cultivares e locais de cultivo (Guo et al., 2019), o que pode possibilitar a gestão desse nutriente em fases específicas do crescimento da planta. Relações robustas ($R^2 > 0,98$) entre o INN e a necessidade de N (NN, em $kg\ ha^{-1}$) foram observadas por Ata-UI-Karim et al. (2017) nos estádios de inicialização da panícula e de emborrachamento “booting”. Em razão da explicação precisa que o INN exerce sobre a variação NN os autores sugerem que esse índice poderia ser usado para a estimativa da NN no decorrer do ciclo da cultura sob condições limitantes e não limitantes de N. O rendimento relativo (RR) do arroz em diferentes estádios também pode ser previsto com alta precisão ($R^2 > 0,98$) pelo INN (Ata-UI-Karim et al., 2016). Portanto, as relações NN-INN e RR-INN com base na curva de diluição de N_c podem identificar com sucesso as situações de nutrição deficiente e excessiva de N no arroz. Na prática o uso de sensores de dossel constitui um método rápido e não-destrutivo para determinação do INN (Yuan et al., 2016; Ata-UI-Karim et al., 2017), que, por sua vez, pode ser aplicado para estimativa da necessidade da aplicação corretiva de N nos estádios críticos de crescimento, bem como para o ajuste preciso da NN para uma expectativa de rendimento na colheita.

Tecnologias recentes têm sugerido o uso combinado de informações de sensoriamento remoto com dispositivos portáteis teleguiados. Esta combinação apresenta-se como uma abordagem promissora para diagnósticos quantitativos e espacialmente distribuídos para apoio à aplicação de N em taxas variáveis, possibilitando a criação de mapas do INN. Na Itália a aplicação de N em taxa variável por meio dessa abordagem possibilitou reduzir o impacto ambiental da fertilização nitrogenada de 13,6 para 11% no cultivo do arroz (Bacanetti et al., 2020). Portanto, os interesses em tecnologias que permitem a estimativa não destrutiva de INN em grandes áreas são crescentes e promissores.

2.5 DEMANDA E SUFICIÊNCIA DE ÁGUA NA RIZICULTURA TROPICAL

A orizicultura irrigada demanda alta quantidade de água e energia e é considerada uma das principais fontes na agricultura de emissão de CH₄ e N₂O, contribuindo para o aquecimento global (Van Groeningen et al., 2013; Koirala, 2016). Assim, intervenções inteligentes em relação aos recursos naturais devem ser realizadas de forma a reduzir o uso de água, sem redução da produtividade e também potencializar a mitigação de gases de efeito estufa (GEE). A terceira maior região produtora de arroz irrigado no Brasil está localizada na bacia do Araguaia-Tocantins, no sudoeste do estado do Tocantins e norte do estado de Goiás, e engloba uma área de aproximadamente 132 mil hectares (G1-TV Anhanguera, 2015). A atual situação hídrica dessa bacia é considerada crítica. Por questões de segurança alimentar e logística, essa região é importante, pois estados do centro-norte do país não podem depender somente do arroz proveniente do sul do Brasil.

O manejo da irrigação do arroz nessa região ainda é semelhante ao conduzido nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, ou seja, inundação contínua durante todo o ciclo da cultura (Stone, 2004). Os efeitos da manutenção de lâmina d'água sobre a superfície do solo são observados tanto nas plantas de arroz como no solo. Estes efeitos estão relacionados, entre outros, a aspectos fisiológicos das plantas, bem como ao controle de plantas daninhas e algumas pragas e doenças (Cordeiro et al., 2010). Todavia, essa estratégia de manejo de irrigação, na região tropical, contribui para a baixa eficiência no uso da água devido às condições climáticas desfavoráveis, como altas temperaturas e baixa umidade relativa do ar. Essas condições desfavoráveis promovem elevação da temperatura da lâmina d'água e, conseqüentemente aumentam a evaporação da água e a respiração da cultura, intervindo negativamente em processos fisiológicos como a fertilização das espiguetas, refletindo em menores produtividades.

Outro agravante diz respeito ao fato de que a água está se tornando mais escassa devido ao rápido aumento da população, da demanda urbana e industrial, diminuição da disponibilidade devido à contaminação de recursos hídricos por poluentes pontuais e não pontuais (produtos químicos, sais e sedimentos) e depleção de recursos hídricos (Rijsberman, 2006). As mudanças climáticas também apresentam um cenário alarmante para o setor agrícola, particularmente devido à crescente escassez de água, o que ameaça a produção agrícola irrigada. Na China por exemplo, maior país produtor, consumidor e

importador de arroz no mundo esses efeitos já são realidade. Neste *player* para safra 2019/20 foi estimada redução na produção nacional de 2,5 milhões de toneladas, tendo como causa para este arrefecimento o efeito combinado pela redução de área e produtividade, que são resultados do declínio de áreas aráveis, redução na disponibilidade de água e mão-de-obra (Conab, 2019). Com a diminuição da disponibilidade de água para a agricultura, economizar água e aumentar a eficiência de seu uso tornaram-se grandes desafios para a humanidade.

Assim, há a necessidade de se implementar uma agricultura que aumente de forma sustentável a produtividade, melhore a resiliência (adaptação), reduza os GEE (mitigação) quando possível e aumente a segurança e o desenvolvimento alimentar nacional. Frente a estas limitações, uma alternativa no fornecimento da água de irrigação para o cultivo do arroz irrigado tropical seria a inundação intermitente. Esse manejo, que faz parte da agricultura inteligente em relação ao clima (Bayer et al., 2015), busca reduzir o uso de água na irrigação do arroz e emissões de metano (CH₄), alternando drenagem e inundação nas áreas de produção de arroz, sem afetar a produtividade.

Na reposição de água ao solo via inundação intermitente, a irrigação é interrompida e a água pode diminuir até que o solo atinja uma determinada condição de umidade, após o qual o solo é re-irrigado. Essa prática tem potencial para mitigar a emissão de GEE, principalmente, o metano (Wassmann et al., 2010), em média 48% a menos quando comparado ao manejo tradicional de irrigação, inundação contínua, durante o ciclo da cultura do arroz (Richards & Sander, 2014). Outros benefícios dessa prática são: a) redução de arsênio no grão (Yang et al., 2017; Das et al., 2016; Linquist et al., 2014), b) redução da concentração de metilmercúrio no solo (Rothenberg et al., 2016), c) redução no uso de energia/combustível em sistemas no qual a irrigação é suprida por bombeamento (Nalley et al., 2015) e d) aumento da eficiência do uso de nitrogênio, minimizando sua lixiviação. O emprego da inundação intermitente, juntamente com a agricultura conservacionista e agroflorestal, são os manejos em larga escala mais incentivados no contexto de uma agricultura inteligente em relação ao clima (CSA).

Diversos estudos mostram o efeito significativo dessa prática na redução do uso de água, mantendo uma produtividade semelhante a que se obtém no manejo tradicional (inundação contínua) (Bouman e Tuong, 2001; Tabbal et al., 2002; Belder et al., 2004; Mandal et al., 2009; Mishra e Salokhe, 2010; Howell et al., 2015; Carrijo et al., 2017). Entretanto, a maioria desses estudos foram realizados na Ásia e alguns poucos na América do Norte. No Brasil, existem poucos estudos sobre a inundação intermitente e geralmente

são voltados para culturas em rotação ao arroz, como soja e milho, especificamente no Rio Grande do Sul (Silva e Parfitt, 2005).

Estudos “in loco” são fundamentais para adoção dessa prática, pois seu efeito benéfico depende de vários fatores: a) propriedades do solo, b) manejo: fase da cultura na qual a inundação intermitente é aplicada, vegetativa, reprodutiva ou durante todo o ciclo (Carrijo et al., 2017); c) variação climática interanual (Bouman e Tuong, 2001) e d) cultivares (Price et al., 2013). Esses estudos podem servir de suporte para a calibração e validação de modelos de processos bioquímico (quantificação de emissões de gases), de simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade do arroz, e experimentos de campo, podem ser utilizados para gerar evidências de que o manejo de irrigação por inundação intermitente economiza recurso hídrico, tem potencial para minimizar/mitigar gases de efeito estufa e promover a resiliência (adaptação) nos sistemas de produção de arroz irrigado tropical.

2.6 PERSPECTIVAS DE PESQUISA

O interesse em estratégias que otimizem o uso de recursos sintéticos e naturais nos ambientes de produção de arroz é crescente. Fatores bióticos e abióticos podem impactar negativamente o crescimento e a produtividade da cultura quando estes recursos não são manejados corretamente, por exemplo: atraso no perfilhamento por déficit de nitrogênio, prolongamento do período vegetativo por excesso na oferta de N, esterilidade de espiguetas por temperaturas elevadas da lâmina d’água, enfim, complicações variadas, que afetam direta e indiretamente o rendimento da cultura.

Medições indiretas do estado de N na planta possibilitam o acompanhamento em tempo da condição nitrogenada da cultura (desequilíbrio, equilíbrio ou excesso). Assim, pode-se reduzir o tempo para tomada de decisões e antecipar ações corretivas quando a cultura apresentar deficiência do nutriente, o que aumenta a eficiência do uso de N.

Outro agravante que impulsiona pesquisas nesta linha é o perfil de cultivo do arroz no Brasil. A safra irrigada demanda elevadas quantidades de água e pode promover escapes de nutrientes, em especial do nitrogênio, seja por lixiviação ou desnitrificação em virtude da lâmina d’água na superfície do solo. Na agricultura a elevada quantidade de água e energia utilizada são consideradas as principais fontes de emissão de CH₄ e N₂O, contribuindo para o aquecimento global. Existe ainda a preocupação quanto a regulação de

estoque e de mercado, o que faz com que iniciativas de pesquisa busquem estratégias para difusão do cultivo irrigado, com menor aplicação de água. Neste sentido, trabalhos que avaliem estratégias alternativas para manejo destes fatores de produção contribuem para que a produção de arroz torne-se mais sustentável e competitiva no cenário nacional.

2.7 REFERÊNCIAS

ATA-UL-KARIM, S. T.; LIU, X.; LU, Z.; YUAN, Z.; ZHU, Y.; CAO, W. In-season estimation of rice grain yield using critical nitrogen dilution curve. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 195, p. 1–8, 2016.

ATA-UL-KARIM, S. T.; LIU, X.; LU, Z.; ZHENG, H.; CAO, W.; ZHU, Y. Estimation of nitrogen fertilizer requirement for rice crop using critical nitrogen dilution curve. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 201, p. 32–40, 2017.

BACENETTI, J. et al. May smart technologies reduce the environmental impact of nitrogen fertilization? A case study for paddy rice. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 715, p. 136956, 2020.

BAYER, C.; ZSCHORNACK, TC.; CAMARGO, E.; SCIVITTARO, W. B.; SOUZA, R. O.; Estratégias mitigadoras de emissão de gases do efeito estufa pela lavoura de arroz. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 9., 2015, Pelotas. Resumos... Pelotas: SOSBAI, 2015. p. 443.

BELDER, P. et al. Effect of water- saving irrigation on rice yield and water use in typical lowland conditions in Asia. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 65, p. 193–210, 2004.

BOUMAN, B.; T. TUONG. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 49, p. 11-30, 2001.

CAO, Q.; MIAO, Y.; WANG, H.; HUANG, S.; CHENG, S.; KHOSLA, R.; JIANG, R. Non-destructive estimation of rice plant nitrogen status with Crop Circle multispectral active canopy sensor. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 154, p. 133–144, 2013.

CAO, Q. et al. Improving in-season estimation of rice yield potential and responsiveness to topdressing nitrogen application with Crop Circle active crop canopy sensor. **Precision Agriculture**, Basel, v. 17, n. 2, p. 136–154, 2016.

CARRIJO, D. R.; LUNDY, M. E.; LINQUIST, B. A. Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis, *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 203, p. 173-180, 2017.

CHANG, T.; BARDENAS, E. A. **The morphology and varietal characteristics of the rice plant**. Los Baños: IRRI, 1965.

- CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de grãos - Safra 2019/20. Nono levantamento, Brasília, v. 7, p. 1-69, jun. 2020a.
- CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Arroz**: Análise Mensal. Brasília, v. 1, p. 1-4, março/abril. 2020b.
- CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de grãos - Safra 2019/20. Quarto levantamento, Brasília, v. 7, p. 1-104, jan. 2020c.
- CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Perspectivas para a agropecuária - Safra 2019/20. Brasília, v. 7, p. 1-102, set. 2019.
- CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **A cultura do Arroz**. Org: Aroldo Antônio de Oliveira-Neto. Brasília, v. 1, p. 1-182, set. 2015.
- CORDEIRO, A. C. C.; SUHRE, E.; MEDEIROS, R. D. De; VILARINHO, A. A. Sistemas de cultivo e manejo de água na produção de diferentes genótipos de arroz em várzea, no estado de Roraima. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, Goiânia, v. 40, n. 3, p. 362–369, 2010.
- COUNCE, P. A.; KEISLING, T. C.; MITCHELL, A. J. A uniform, objectives, and adaptive system for expressing rice development. **Crop Science**, Madison, v. 40, n. 2, p. 436–443, 2000.
- DAS, S.; CHOU, M. L.; JEAN, J. S.; LIU, C. C.; YANG, H. J. Water management impacts on arsenic behavior and rhizosphere bacterial communities and activities in a rice agro-ecosystem. **The Science of the total environment**, Amsterdam, v. 542, p. 642-652, 2016
- DINGKUNH, M. et al. Improving yield potential of tropical rice: Achieved levels and perspectives through improved ideotypes. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 182, n. 1, p. 43–59, 2015.
- EVANS, J. R. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C3 plants. **Oecologia**, New York, v. 78, p. 9–19, 1989.
- EVANS, J.; TERASHIMA, I. Effects of nitrogen nutrition on electron transport components and photosynthesis in spinach. **Australian Journal of Plant Physiology**, Collingwood, v. 14, n. 1, p. 59–68, 1987.
- EVANS, L. T.; VISPERAS, R. M.; VERGARA, B. S. Morphological and physiological changes among rice varieties used in the Philippines over the last seventy years. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 8, n. 1, p. 105–124, 1984.
- FENG, W.; HE, L.; ZHANG, H. Y.; GUO, B. Bin; ZHU, Y. J.; WANG, C. Y.; GUO, T. C. Assessment of plant nitrogen status using chlorophyll fluorescence parameters of the upper leaves in winter wheat. **European Journal of Agronomy**, Montrouge, v. 64, p. 78–87, 2015a.

FENG, W. et al. Remote estimation of above ground nitrogen uptake during vegetative growth in winter wheat using hyperspectral red-edge ratio data. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 180, p. 197–206, 2015b.

FREITAS, T. F. S. de; SILVA, P. R. F. da; STRIEDER, M. L.; SILVA, A. A. da. Validação de escala de desenvolvimento para cultivares brasileiras de arroz irrigado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 404–410, 2006.

G1 – TV ANHANGUERA. Tocantins ocupa o terceiro lugar na produção de arroz irrigado do país: Safra crescerá 2,5% em relação à produção anterior. 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/to/tocantins/noticia/2015/11/tocantins-ocupa-o-terceiro-lugar-na-producao-de-arroz-irrigado-do-pais.html>>. Acesso: 30 set. 2017.

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; NEVES, P. D. C. F. Eficiência produtiva de cultivares de arroz com divergência fenotípica Production efficiency of rice cultivars with phenotypic diversity. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 5, p. 465–470, 2008.

GUO, J.; WANG, Y.; FAN, T.; CHEN, X.; CUI, Z. Designing corn management strategies for high yield and high nitrogen use efficiency. **Agronomy Journal**, Madison, v. 108, n. 2, p. 922–929, 2016.

GUO, J. et al. Nitrogen nutrient index and leaf function affect rice yield and nitrogen efficiency. **Plant and Soil**, The Hague, v. 445, p. 7–21, 2019.

HEINEMANN, A. B.; STONE, L. F.; FAGERIA, N. K.; CASTRO, L. M. de. Evaluation of physiological traits in upland rice for adaptation to no-tillage system. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v. 21, n. 2, p. 113–122, 2009.

HÖRTENSTEINER, S. Stay-green regulates chlorophyll and chlorophyll-binding protein degradation during senescence. **Trends in Plant Science**, Kidlington, v. 14, n. 3, p. 155–162, 2009.

HOWELL, K. R.; SHRESTHA, P.; DODD, I. C. Alternate wetting and drying irrigation maintained rice yields despite half the irrigation volume, but is currently unlikely to be adopted by smallholder lowland rice farmers in Nepal. **Food and Energy Security**, Oxford, v. 4, n. 2, p. 144–157, 2015.

ISHIKAWA-SAKURAI, J.; HAYASHI, H.; MURAI-HATANO, M. Nitrogen availability affects hydraulic conductivity of rice roots, possibly through changes in aquaporin gene expression. **Plant and Soil**, The Hague, v. 379, n. 1–2, p. 289–300, 2014.

KOIRALA, S. Rice paddies raise methane threat. 2016. Disponível em: <<http://climatenetwork.net/rice-puddling-raises-methane-threat/>>. Acesso: 30 set. 2017.

KULIG, B.; LEPIARCZYK, A.; OLEKSY, A.; KOŁODZIEJCZYK, M. The effect of tillage system and forecrop on the yield and values of LAI and SPAD indices of spring wheat. **European Journal of Agronomy**, Montrouge, v. 33, n. 1, p. 43–51, 2010.

- LEMAIRE, G.; JEUFFROY, M. H.; GASTAL, F. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage. Theory and practices for crop N management. **European Journal of Agronomy**, Montrouge, v. 28, n. 4, p. 614–624, 2008.
- LESTARI, P.; UTAMI, D. W.; ROSDIANTI, I.; SABRAN, M. Morphological variability of Indonesian rice germplasm and the associated SNP markers. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, United Arab Emirates, v. 28, n. 9, p. 660–670, 2016.
- LI, F.; ZHANG, H.; JIA, L.; BARETH, G.; MIAO, Y.; CHEN, X. Estimating winter wheat biomass and nitrogen status using an active crop sensor. **Intelligent Automation and Soft Computing**, London, v. 16, n. 6, p. 1221–1230, 2010.
- LI, F. et al. Remotely estimating aerial N status of phenologically differing winter wheat cultivars grown in contrasting climatic and geographic zones in China and Germany. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 138, p. 21–32, 2012.
- LI, Y.; REN, B.; DING, L.; SHEN, Q.; PENG, S.; GUO, S. Does Chloroplast Size Influence Photosynthetic Nitrogen Use Efficiency? **PLoS ONE**, San Francisco, v. 8, n. 4, p. 1–10, 2013.
- LINQUIST, B.; ANDERS, M. M.; ADVIENTO-BORBE, M. A. A.; CHANEY, R. L.; NALLEY, L. L.; DA RODA, E. F. F.; VAN KESSEL, C. Reducing greenhouse gas emissions, water use, and grain arsenic levels in rice systems. *Global Change Biology*. Oxford, v. 21, p. 407-417, 2014.
- MACHADO, E. C.; LAGÔA, A. M. M. A.; AZZINI, L. E.; TISSELLI FILHO, O. Trocas gasosas e relações hídricas em dois cultivares de arroz de sequeiro submetidos à deficiência hídrica, em diferentes fases de crescimento. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Brasília, DF, v. 8, n. 2, p. 139-147, ago. 1996.
- MAKINO, A. et al. Does decrease in ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase by antisense *rbcS* lead to a higher N-use efficiency of photosynthesis under conditions of saturating CO₂ and light in rice plants? **Plant Physiology**, Lancaster, v. 114, n. 2, p. 483–491, 1997.
- MANDAL, S. N.; REGMI, A.; LADHA, J.; TUONG, T. 2009. Crop establishment, tillage, and water management effects on crop and water productivity in the rice-wheat rotation in Nepal. In: LADHA, J. K.; SINGH, Y.; ERENSTEIN, O.; HARDY, B. (eds) *Integrated crop and resource management in the rice-wheat system of South Asia*. International Rice Research Institute, Los Baños (Philippines).
- MARTIN, K.; RAUN, W.; SOLIE, J. By-plant prediction of corn grain yield using optical sensor readings and measured plant height. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 35, n. 9, p. 1429–1439, 2012.
- MATSUSHIMA, S. Water and physiology of Indica rice. **Proceedings of the Crop Science Society of Japan**, Tokyo, p. 102-109, Mar. 1968.
- MISHRA, A.; SALOKHE, V. M. The effects of planting pattern and water regime on root morphology, physiology and grain yield of rice. *Journal of agronomy and crop science*, Berlin, v. 196: 368-378, 2010.

NALLEY, L. L.; LINQUIST, B.; KOVACS, K. F.; ANDERS, M. M. The economic viability of alternate wetting and drying irrigation in Arkansas rice production. *Agronomy Journal*, Madison, v. 107, p.579-587, 2015.

PADILLA, F. M.; GALLARDO, M.; PEÑA-FLEITAS, M. T.; SOUZA, R. De; THOMPSON, R. B. Proximal optical sensors for nitrogen management of vegetable crops: A review. **Sensors (Switzerland)**, Basel, v. 18, n. 7, p. 1–23, 2018.

PENG, S.; GARCÍA, F. V.; LAZA, R. C.; CASSMAN, K. G. Adjustment for specific leaf weight improves chlorophyll meter's estimate of rice leaf nitrogen concentration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 85, n. 5, p. 987–990, 1993.

PENNING DE VRIES, F. W. T.; KROPFF, M. J.; TENG, P. S.; KIRK, G. J. D. **Systems simulation at IRRI**. Los Baños: IRRI, 1981. 67 p. (IRRI. Research Paper Series, 151).

PERATA, P.; ALPI, A. Plant responses to anaerobiosis. **Plant Science**, Irlanda, v. 93, n. 1-2, p. 1–17, 1993.

PINHEIRO, B. S. Características morfofisiológicas da planta relacionadas à produtividade. In: SANTOS, A. B.; STONE, L. F.; VIEIRA, N. R. A. (Eds.). **A cultura do arroz no Brasil**. 2ª. ed. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. p. 209–256.

PINZÓN-TORRES, J. A.; SCHIAVINATO, M. A. Crescimento, eficiência fotossintética e eficiência do uso da água em quatro espécies de leguminosas arbóreas tropicais. **Hoehnea**, São Paulo, v. 35, n. 3, p. 395–404, 2008.

POORTER, H.; EVANS, J. R. Photosynthetic nitrogen-use efficiency of species that differ inherently in specific leaf area. **Oecologia**, New York, v. 116, p. 26–37, 1998.

PRICE, A. H. et al. Alternate wetting and drying irrigation for rice in Bangladesh: Is it sustainable and has plant breeding something to offer? *Food and Energy Security*, Oxford, v. 2, p. 120-129, 2013.

RADIN, J. W.; PARKER, L. L.; GUINN, G. Water Relations of Cotton Plants under Nitrogen Deficiency. **Plant Physiology**, Lancaster, v. 70, n. 4, p. 1066–1070, 1982.

RANGEL, P. H. N.; GUIMARÃES, E. P.; RABELO, R. R. Melhoramento genético do arroz irrigado no Nordeste do Brasil. In: QUEIROZ, M. A.; GOEDERT, C. O.; RAMOS, S. R. (Eds.). **Recursos genéticos e melhoramento de plantas para o Nordeste brasileiro**. 1. ed. Petrolina-PE/Brasília-DF: Embrapa Semi-Árido/Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 1999. p. 1–14.

RICHARDS, M.; SANDER, B. O. Alternate wetting and drying in irrigated rice: implementation guidance for policy makers and investors. CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security, Montpellier. 2014.

RIJSBERMAN, F. R. Water scarcity: Fact or fiction? **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 80, n. 1-3, p. 5-22, 2006.

ROTHENBERG, S. E.; ANDERS, M.; AJAMI, N. J.; PETROSINO, J. F.; BALOGH, E. Water management impacts rice methylmercury and the soil microbiome. **The Science of the total environment**, Amsterdam, v. 572, p. 608-617, 2016.

SAKAMOTO, T. et al. Erect leaves caused by brassinosteroid deficiency increase biomass production and grain yield in rice. **Nature Biotechnology**, New York, v. 24, n. 1, p. 105–109, 2006.

SANTOS, A. B.; RABELO, R. R. **Informações técnicas para a cultura do arroz irrigado no Estado do Tocantins**. Documentos: Embrapa Arroz e Feijão, 2008. 136p

SANTOS, M. P. dos; ZANON, A. J.; CUADRA, S. V.; STEINMETZ, S.; CASTRO, J. R. De; HEINEMANN, A. B. Yield and morphophysiological indices of irrigated rice genotypes in contrasting ecosystems. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 47, n. 3, p. 253–264, 2017.

SILVA, C. A. S. da; PARFITT, J. M. B. **Irrigação por Inundação Intermitente para Culturas em Rotação ao Arroz em Áreas de Várzea do Rio Grande do Sul**. Circular Técnica n. 45. Embrapa Clima temperado, Pelotas, 2005.

SILVA, O. F. **Árvore do conhecimento arroz**: estatísticas da produção. Agência Embrapa de informação tecnológica. 2014. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/arroz/arvore/CONT000fe7457q102wx5eo07qw4xezy8czjj.html>>. Acesso: 22 nov. 2015.

SOSBAI. SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ. **ARROZ IRRIGADO**: Recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. Bento Gonçalves, RS. - Porto Alegre: SOSBAI, 2010. 188p.

STEINMETZ, S.; DEIBLER, A. N.; SILVA, J. B. Estimativa da produtividade de arroz irrigado em função da radiação solar global e da temperatura mínima do ar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 2, p. 206-211, 2013.

STONE, L. F. **Cultivo do Arroz Irrigado no Estado do Tocantins: Método de irrigação**. Embrapa Arroz e Feijão, Sistemas de Produção, n. 3, 2004.

SPITKÓ, T.; NAGY, Z.; ZSUBORI, Z. T.; SZÓKE, C.; BERZY, T.; PINTÉR, J.; MARTON, C. L. Connection between normalized difference vegetation index and yield in maize. **Plant, Soil and Environment**, Prague, v. 62, n. 7, p. 293–298, 2016.

SUN, J.; YE, M.; PENG, S.; LI, Y. Nitrogen can improve the rapid response of photosynthesis to changing irradiance in rice (*Oryza sativa* L.) plants. **Scientific Reports**, London, v. 6, p. 1–10, 2016.

SUTARIO, B. Performance of Agro-Morphology and Genetic Parameter of 12 Rice Genotypes at Lowland Rice Irrigation. **Ilmu Pertanian**, Barhasa, v. 17, n. 1, p. 13–24, 2014.

TABBAL, D. F.; BOUMAN, B. A. M.; BHUIYAN, S. I.; SIBAYAN, E. B.; SATTAR, M. A. On- farm strategies for reducing water input in irrigated rice; case studies in the

- Philippines. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 56, p.93-112, 2002.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. Max; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.
- TIAN, Y. C.; YAO, X.; YANG, J.; CAO, W. X.; HANNAWAY, D. B.; ZHU, Y. Assessing newly developed and published vegetation indices for estimating rice leaf nitrogen concentration with ground- and space-based hyperspectral reflectance. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 120, n. 2, p. 299–310, 2011.
- TUBAÑA, B. S.; HARRELL, D. L.; WALKER, T.; TEBOH, J.; LOFTON, J.; KANKE, Y. In-season canopy reflectance-based estimation of rice yield response to nitrogen. **Agronomy Journal**, Madison, v. 104, n. 6, p. 1604–1611, 2012.
- VAN GROENIGEN, K. J.; VAN KESSEL, C.; HUNGATE, B. A. Increased greenhouse-gas intensity of rice production under future atmospheric conditions. **Nature Climate Change**, London, v. 3, p. 288-291, 2013
- VERGARA, B. S. Plant growth and development. In: UNIVERSITY OF THE PHILIPPINES: Rice production manual. Laguna, 1970. p. 17-37.
- WANG, Y.; SHI, P.; ZHANG, G.; RAN, J.; SHI, W.; WANG, D. A critical nitrogen dilution curve for japonica rice based on canopy images. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 198, p. 93–100, 2016.
- WANG, M.; WANG, L.; CUI, Z.; CHEN, X.; XIE, J.; HOU, Y. Closing the yield gap and achieving high N use efficiency and low apparent N losses. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 209, p. 39–46, 2017.
- WARREN, C. R. The photosynthetic limitation posed by internal conductance to CO₂ movement is increased by nutrient supply. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 55, n. 406, p. 2313–2321, 2004.
- WASSMANN, R.; NELSON, G. C.; PENG, S.B.; SUMFLETH, K.; JAGADISH, S. V. K.; HOSEN, Y.; ROSEGRANT, M. W. 2010. Rice and global climate change. In: PANDEY, S.; BYERLEE, D.; DAWE, D.; DOBERMANN, A.; MOHANTY, S.; ROZELLE, S.; HARDY, B. eds. *Rice in the global economy: strategic research and policy issues for food security*. Los Banos, Philippines: International Rice Research Institute (IRRI).
- YANG, J.; ZHOU, Q.; ZHANG, J. Moderate wetting and drying increases rice yield and reduces water use, grain arsenic level, and methane emission. **Crop Journal**, Amsterdam, v. 5, n. 2, p. 151-158, 2017.
- YAO, Y. et al. Active canopy sensor-based precision N management strategy for rice. **Agronomy for Sustainable Development**, Les Ulis, v. 32, n. 4, p. 925–933, 2012.
- YOSHIDA, S.; AHN, S. B. The accumulation process of carbohydrate in rice varieties in relation to their response to nitrogen in the tropics. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 14, n. 4, p. 153–161, 1968.
- YOSHIDA, S. **Fundamentals of rice crop science**. Los Baños: IRRI, 1981. 269p.

YU, K.; LI, F.; GNYP, M. L.; MIAO, Y.; BARETH, G.; CHEN, X. Remotely detecting canopy nitrogen concentration and uptake of paddy rice in the Northeast China Plain. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 78, p. 102–115, 2013.

YUAN, Z.; ATA-UL-KARIM, S. T.; CAO, Q.; LU, Z.; CAO, W.; ZHU, Y.; LIU, X. Indicators for diagnosing nitrogen status of rice based on chlorophyll meter readings. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 185, p. 12–20, 2016.

ZHA, H. et al. Improving unmanned aerial vehicle remote sensing-based rice nitrogen nutrition index prediction with machine learning. **Remote Sensing**, Basel, v. 12, p. 1–22, 2020.

ZHANG, K. et al. Predicting rice grain yield based on dynamic changes in vegetation indexes during early to mid-growth stages. **Remote Sensing**, Basel, v. 11, n. 4, p. 1–24, 2019.

ZHAO, B. et al. Rapid and nondestructive estimation of the nitrogen nutrition index in winter barley using chlorophyll measurements. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 185, p. 59–68, 2016.

ZIADI, N. et al. Chlorophyll measurements and nitrogen nutrition index for the evaluation of corn nitrogen status. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, n. 5, p. 1264–1273, 2008.

CAPÍTULO 2

DETERMINAÇÃO DO NITROGÊNIO NO ARROZ IRRIGADO USANDO REFLETÂNCIA ESPECTRAL⁶

Marcos Paulo dos Santos⁷, Alexandre Bryan Heinemann⁸

⁶ Capítulo elaborado conforme as normas do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (*PPGA - UFG*).

⁷ Universidade Federal de Goiás, Departamento de Fitotecnia, Goiânia, GO, Brasil. E-mail: marcospaulo_agronomo@hotmail.com;

⁸ Embrapa Arroz e Feijão, Departamento de Pesquisa, Santo Antônio de Goiás, GO, Brasil. E-mail: alexandre.heinemann@embrapa.br.

3 DETERMINAÇÃO DO NITROGÊNIO NO ARROZ IRRIGADO USANDO REFLETÂNCIA ESPECTRAL

Resumo – O manejo de precisão do N com uso de sensores ópticos de radiação é uma estratégia promissora. A partir da combinação de três bandas espectrais de refletâncias, 22 índices de vegetação (IV) foram calculados e avaliados quanto à sua eficiência em estimar o estado de N durante os períodos de crescimento do arroz irrigado. Os resultados deste estudo indicaram que os IV selecionados subestimam consideravelmente a biomassa seca de folhas e não estimaram com eficiência os indicadores de nitrogênio na cultura, como a concentração e o acúmulo de nitrogênio foliar, no estágio vegetativo. Maiores variações destes indicadores podem ser explicadas pelos IV nos períodos subsequentes. Os IV selecionados no processo de calibração mostraram-se altamente promissores para a explicação da variação da biomassa seca de folhas e do índice de área foliar nos períodos reprodutivo e de enchimento de grãos. Entretanto, performances modestas dos IV foram obtidas para estimação da concentração de nitrogênio foliar no estágio reprodutivo. O índice de vegetação ajustado ao solo de borda vermelha modificado e o índice de borda vermelha por diferença normalizada mostraram alta performance na estimativa do índice de nutrição nitrogenada em todos os períodos de crescimento, bem como no ciclo todo. Estes resultados mostram a importância do uso de sensores ativos com mais de duas bandas fixas, especialmente com a adição da banda de borda vermelha, para estimar com maior performance o estado de nitrogênio da cultura.

Palavras-chave: Ecofisiologia; *Oryza sativa* L.; Sensoriamento remoto de baixa altitude.

NITROGEN DETERMINATION IN IRRIGATED RICE USING SPECTRAL REFLECTANCE

Abstract – Precision N management using optical radiation sensors is a promising management strategy. Using a combination of three spectral reflectance bands, 22 vegetation indices (VI) were calculated and evaluated for their efficiency in estimating N status in irrigated rice during growth stages. The results indicated that the selected VI considerably underestimated dry leaf biomass and did not efficiently estimate N status parameters, such as leaf N concentration and leaf N uptake, at the vegetative stage. The large variations in these N status parameters can be explained by the VI in subsequent stages. The VI selected in the parametrization process were promising for explaining variation in dry leaf biomass and leaf area index at the reproductive and grain-filling stages. However, the VI showed low performance in estimating leaf N concentration at the reproductive stage. The modified red-edge soil adjusted VI and normalized difference red-edge index showed high performance in estimating the N nutrition index in all growth stages and across the whole cropcycle. These results show the importance of using active sensors with more than two fixed bands, preferably including a red-edge band, for effective crop N status estimation.

Keywords: Ecophysiology; *Oryza sativa* L.; Low-altitude remote sensing.

3.1 INTRODUÇÃO

O uso excessivo de fertilizantes nitrogenados em áreas de produção de arroz é um grave problema, que resulta não só apenas na baixa eficiência de utilização de nitrogênio (N), mas ocasiona distúrbios ambientais, incrementa a susceptibilidade das culturas à pragas e doenças, e reduz a qualidade nutricional, o cozimento dos grãos e, conseqüentemente, o retorno econômico (Lu et al., 2017). O manejo de precisão do nitrogênio (N) é fundamental para otimizar o suprimento de N demandado pela cultura, tanto no espaço quanto no tempo. O sucesso dessa estratégia, contudo, é dependente do desenvolvimento de tecnologias rápidas que diagnostiquem em tempo real o estado de N da cultura durante o período de crescimento.

A concentração de N na planta (CNP) tem sido utilizada como um dos principais indicadores para monitoramento do estado de N. Entretanto, esse indicador é dependente da biomassa acumulada, o que o torna ineficiente para comparar o estado de N em plantas que possuem a mesma CNP e divergem no acúmulo de biomassa (Cao et al., 2015). Além disso, a absorção de N pela planta é influenciada pela interação GxAxM (genótipo x ambiente x manejo). Em cultivos adensados, a CNP decresce de forma não-linear (Li et al., 2012; He et al., 2017). Isso ocorre em virtude da diluição do N absorvido na biomassa acumulada. A relação entre a CNP e o acúmulo de biomassa permite estabelecer um teor crítico de N, definido como um valor mínimo de CNP necessário para o alcance do máximo acúmulo de biomassa (Lemaire et al., 2008). Assim, o teor crítico de N pode ser incorporado em um índice de nutrição de N (INN) que indica o estado relativo de N nas plantas (Lemaire et al., 2008; Cao et al., 2015; Zhang et al., 2019). O INN é calculado pela razão do valor do CNP e da concentração crítica de N no cultivo. Neste sentido, o INN passa a indicar o estado nitrogenado da cultura.

Apesar de úteis, índices derivados de análise laboratorial que indicam o estado de N na planta não possuem aplicação prática em grandes áreas de cultivos, devido à dificuldade de se obter em tempo real essas medidas, pois requerem análises destrutivas

químicas de amostras de plantas, que são demoradas, consomem tempo e são de alto custo e muitas vezes podem ser não representativas do estado de N na lavoura.

Equipamentos como o clorofilômetro têm sido utilizados para a determinação em tempo real do estado de N em culturas, entretanto, as leituras são realizadas em folhas específicas, que apresentam variadas atividades metabólicas em uma mesma planta, dificultando a sua aplicação em grandes áreas. Já os sensores ativos de leitura de refletância do dossel de plantas apresentam praticidade para uso em áreas extensas e não são dependentes da disponibilidade de luz ambiental (Yao et al., 2012; Padilla et al., 2018). Na literatura, são reportados vários sensores ativos de refletância, como o GreenSeeker (Trimble Navigation Limited, Sunnyvale, California, USA), Crop Circle ACS-210 (Holland Scientific Inc., Lincoln, Nebraska, USA) e Crop Spec (Topcon Positioning Systems, Inc., Livermore, California, USA) para obtenção de índices de vegetação e estimação do estado de N em arroz (Martin et al., 2012; Yu et al., 2013). Entretanto, esses sensores permitem a leitura de somente duas bandas de radiação e limitam o cálculo de índices vegetativos restringindo à obtenção de apenas alguns índices. Isso é uma limitação, porque os comprimentos de onda e, conseqüentemente, os índices de vegetação variam em relação aos parâmetros biofísicos da cultura e estádios de crescimento (Zhang et al., 2019). Neste sentido, sensores de dosséis ativos com mais de duas bandas espectrais podem ter o potencial de melhorar o desempenho na predição do estado de N devido à possibilidade de obtenção de vários índices de vegetação espectral. Shirastsuchi et al. (2011) encontraram dois índices obtidos de três bandas espectrais capaz de diferenciar o estado de N na cultura do milho sob diferentes manejos de N e água. Cao et al. (2013) verificaram que o índice de refletância de absorção de clorofila modificada 1 (MCARI1), calculado por meio de três bandas espectrais (verde, vermelho distante e infravermelho próximo (NIR)) apresentou correlações consistentes com a biomassa de arroz e a absorção de N pela planta.

O objetivo deste estudo foi analisar se índices vegetativos podem ser usados para estimar o estado de N nos períodos de crescimento da cultura do arroz irrigado.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Descrição dos experimentos

Seis experimentos de campo, de 2014 a 2017, foram conduzidos na Estação Experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), em Goiás (latitude: -16,41, longitude: -49,38, altitude: 757 m). De acordo com Köppen, o clima é classificado como tropical de savana (Aw) (Alvares et al. 2014). O solo das áreas experimentais foi classificado como Gleissolo Háptico distrófico de várzea. Esses ensaios foram denominados como: GO_14/15 (1, C), GO_14/15 (2, V), GO_15/16 (1, V), GO_16/17 (1, V), GO_16/17 (2, V) e GO_17/18 (1, C), onde os números separados por barras (14/15, 15/16, 16/17 e 17/18) representam safras e os números (1 ou 2) e letras (C ou V) dentro dos parênteses são os números dos experimentos por safra (1 ou 2) utilizados nos modelos de calibração (C) e validação (V), respectivamente. Os dados dos ensaios GO_14/15 (1, C) e GO_17/18 (1, C) foram empregados para calibração dos modelos devido as coletas terem sido efetuadas em intervalos menores que nos demais ensaios. O delineamento experimental utilizado em todos os ensaios foi o de blocos completos casualizados (DBC), com quatro repetições.

Todos os ensaios foram implantados por semeadura em linha, exceto os ensaios GO_14/15 (1, C) e GO_14/15 (2, V), que foram por transplântio. As parcelas experimentais foram constituídas de seis linhas de 15 m, espaçadas de 0,17-0,20 m. O manejo de nitrogênio para GO_15/16 (1, V), GO_16/17 (1, V), GO_16/17 (2, V) e GO_17/18 (1, C) foi similar, com três aplicações: na semeadura (12 kg ha^{-1}), em cobertura no início do perfilhamento (50 kg ha^{-1}) e em cobertura na iniciação da panícula (50 kg ha^{-1}). Para GO_14/15 (1, C) e GO_14/15 (2, V) o N também foi aplicado em três momentos: no transplântio (10 kg ha^{-1}), em cobertura no início do perfilhamento (60 kg ha^{-1}) e em cobertura na iniciação da panícula (60 kg ha^{-1}). Em todos os ensaios o controle de insetos-praga, doenças e plantas daninhas foi realizado conforme necessidades da cultura nos respectivos anos de cultivo. As características de crescimento das cultivares de arroz irrigado estão listadas na Tabela 3.1. Detalhes dos ensaios utilizados nesse estudo também são descritos em Santos et al. (2017).

Tabela 3.1. Descrição dos experimentos, e dos conjuntos de dados utilizados neste estudo para calibração e validação.

Ensaio	Safra	Cultivares	Semeadura/Transplântio Data (dia/mês)	Data dos estádios fenológicos	Data da Colheita
Calibração					
GO_14/15(1, C)	14/15	1; 2; 3 e 4*	18/12/2014	05/02 ⁺ , 21/02 ⁺⁺ , 20/03 [#]	30/03/2015
GO_17/18(1, C)	17/18	1; 5; 6 e 7	27/10/2017	05/01 ⁺ , 03/02 ⁺⁺ , 01/03 [#]	06/03/2018
Validação					
GO_14/15(2, V)	14/15	1;2; 3 e 4	10/11/2014	03/01 ⁺ ; 24/01 ⁺⁺ ; 17/02 [#]	26/02/2015
GO_15/16(1, V)	15/16	1; 2; 3; 4 e 5	28/09/2015	27/11 ⁺ , 20/12 ⁺⁺ , 16/01 [#]	24/01/2016
GO_16/17(1, V)	16/17	1 e 5	27/09/2016	04/12 ⁺ , 30/12 ⁺⁺ , 25/01 [#]	30/01/2017
GO_16/17(2, V)	16/17	1 e 5	18/10/2016	16/12 ⁺ , 16/01 ⁺⁺ , 10/02 [#]	19/02/2017

* Identificação de cultivares, em que: 1 = BRS Catiana; 2 = BRS Jaçanã; 3 = BRS Pampa; 4 = BRS Taim; 5 = IRGA 424; 6 = BRS Pampeira e 7 = A 702 – CL.⁺, ⁺⁺, [#] Correspondem a iniciação da panícula, florescimento e maturação fisiológica.

3.2.2 Sensor, coleta de dados e índices vegetativos

Nesse estudo foi utilizado o sensor Crop Circle ACS-430 para coletar a refletância do dossel nos períodos de crescimento (vegetativo inicial (V1 a V9, aproximadamente 40 dias após a emergência (DAE), vegetativo final (V10 a R1), reprodutivo, e enchimento de grãos). O sensor Crop Circle ACS-430 incorpora fonte de luz policromática, permitindo a leitura concomitante de três bandas espectrais, 670±11 nm (vermelho, V), 730±10 nm (vermelho distante, VD) e > 760 nm (infravermelho próximo, IVP). As leituras do sensor foram coletadas entre 0,7 a 0,9 m acima do dossel da cultura do arroz irrigado, a 10 Hz (10 leituras por segundo) e assumindo uma velocidade constante. O campo de visão do Crop Circle ACS-430 é um orifício oval de ~30° por ~14°, resultando em aproximadamente uma área de 0,09 m² (Holland Scientific, 2010).

O tecido vegetal absorve prontamente a luz na parte do espectro visível (refletindo uma pequena quantidade, tipicamente de 2% a 10%) e reflete a luz IVP (35% a 60%) devido a uma descontinuidade nos índices de refração entre paredes celulares e lacunas de ar intercelular. Quando a luz visível e IVP emitida pelo sensor é direcionada para o dossel da planta, uma parte dessa luz é refletida de volta ao sensor. A luz emitida que é refletida de volta ao sensor é detectada por uma matriz de fotossensores espectralmente sensíveis. Além disso, modulando a fonte de luz (pulsando e ligando a fonte de luz rapidamente várias vezes por segundo), o ACS-430 pode distinguir seu próprio sinal de luz daquele da luz ambiente

circundante. Isso permite que o sensor detecte refletância de dossel em todas as condições de iluminação ambiente: céu nublado, sol pleno, escuridão completa ou iluminação artificial. Por meio dos sinais de refletância das três bandas do Crop Circle ACS-430 é possível calcular vários índices vegetativos (IV) (Holland Scientific, 2010). Neste estudo foram calculados 22 IV, os quais estão descritos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Índices vegetativos (IV) calculados utilizados neste estudo.

ID	Índices	Fórmula	Referência
1	Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)	$(IVP - V)/(IVP + V)$	Holland Scientific (2010)
2	Índice de vegetação de razão (RVI)	IVP / V	Holland Scientific (2010)
3	Índice de clorofila de borda vermelha (CHL)	$(IVP / VD) - 1$	Holland Scientific (2010)
4	Índice de proporção simples pela banda vermelho (SRI)	IVP/V	Holland Scientific (2010)
5	Índice de vegetação não-linear (NLI)	$((IVP^2) - V) / ((IVP^2) + V)$	Holland Scientific (2010)
6	Índice de Vegetação por diferença renormalizada (RDVI)	$((IVP - V)/(IVP + V)^{1/2})$	Holland Scientific (2010)
7	Proporção simples modificada (MSR)	$((IVP / V)-1)/(((IVP / V)^{1/2}+1)$	Holland Scientific (2010)
8	Índice de clorofila invariante em água 1 (WICI1)	$(IVP - VD) / (IVP + V)$	Holland Scientific (2010)
9	Índice de clorofila invariante em água 2 (WICI2)	$(IVP - VD)/(VD + V)$	Holland Scientific (2010)
10	Índice de refletância de banda infravermelha próximo (NIR)	IVP	Holland Scientific (2010)
11	Índice de vegetação por razão de borda vermelha (RERVI)	IVP / VD	Jasper et al. (2009)
12	Índice de vegetação de diferença de borda vermelha (REDVI)	$IVP - VD$	Cao et al. (2013)
13	Borda vermelha por diferença normalizada (NDRE)	$(IVP - VD) / (IVP + VD)$	Barnes et al. (2000)
14	Índice de vegetação de faixa dinâmica ampla de borda vermelha (REWDRVI)	$(a * IVP - VD) / (a * IVP + VD)$ (a = 0,12)	Cao et al. (2013)
15	Índice de vegetação otimizado 1 (Vplot 1)	$100 * (\ln IVP - \ln VD)$	Jasper et al. (2009)

Tabela 3.2. *Continuação...*

ID	Índices	Fórmula	Referência
16	Índice de clorofila de borda vermelha (CIRE)	$IVP/VD-1$	Gitelson et al. (2005)
17	Proporção simples da borda vermelha modificada (MSR_RE)	$(IVP / VD - 1) / RAIZ(IVP / VD + 1)$	Cao et al. (2013) modificado de Chen (1996)
18	Índice de vegetação ajustado ao solo de borda vermelha (RESAVI)	$1,5*[(IVP - VD) / (IVP + VD + 0,5)]$	Cao et al. (2013) modificado de Sripada et al. (2006)
19	Índice de vegetação ajustado ao solo de borda vermelha modificado (M_RESAVI)	$0,5*[2*IVP + 1 - RAIZ((2*IVP + 1)^2 - 8*(IVP - VD))]$	Cao et al. (2013) modificado de Qi et al. (1994)
20	Índice de vegetação de borda vermelha ajustado ao solo ideal (REOSAVI)	$(1 + 0,16)*(IVP - VD)/(IVP + VD + 0,16)$	Cao et al. (2013) modificado de Rondeaux et al. (1996)
21	Índice de vegetação de borda vermelha renormalizada diferente (RERDVI)	$(IVP - VD) / RAIZ(IVP + VD)$	Cao et al. (2013) modificado de Roujean and Breon (1995)
22	Índice de vegetação de faixa dinâmica ampla de borda vermelha modificado (REWDRVI2)	$(a * (IVP-VD)) / (a * (IVP+VD))$ (a = 0,12)	Adaptado de Cao et al. (2015)

3.2.3 Indicadores do estado de N para a cultura do arroz

Neste estudo utilizou-se cinco indicadores do estado de N para mensurar a eficiência do uso de IV para cultura do arroz: Biomassa foliar seca (BFS); índice de área foliar (IAF); concentração de N foliar (CNF), acúmulo de N foliar (ANF) e o INN.

Para determinação dos indicadores do estado do N na cultura amostras de plantas foram coletadas de 0,5 m por parcela após obtenção das leituras realizadas pelo sensor Crop Circle ACS-430. Essas coletas foram semanais para os ensaios utilizados na calibração e quinzenais nos ensaios de validação. Dessa forma, foi possível obter um conjunto de dados para os períodos vegetativo (emergência à iniciação da panícula [R1]), reprodutivo (R1 ao florescimento [R4]) e enchimento de grãos (R4 à maturação fisiológica [R8]). Subamostras de plantas frescas (50% do material coletado) foram separadas em folha verde (folha), seca (folha morta), colmo + bainha (caule) e panículas. A área foliar (AF, m²) foi determinada

por medidor fotoelétrico, modelo LI-3100 (LI-COR), e o índice de área foliar (IAF) calculado conforme a equação 3.1.

$$IAF = \frac{AF}{AS} \quad (3.1)$$

Em que: *AF* a área foliar amostrada e *AS* a área de solo correspondentes a coleta da *AF* amostrada.

Após a coleta, as amostras frescas foram secas a 75°C em estufa de ventilação forçada até atingirem massa constante. Assim, obteve-se a biomassa foliar seca (BFS) e dos demais órgãos da planta que, uma vez somados, constituem a biomassa seca total (BST) da parte aérea. Parte da BFS (~250 g) foi utilizada para determinar a CNF por meio do método padrão de Kjeldahl-N (Galvani & Gaertner, 2006). O ANF foi determinado pela multiplicação da concentração de N pela BFS. O INN foi calculado de acordo com o descrito em Lemaire et al. (2008):

$$INN = \frac{Na}{Nc} \quad (3.2)$$

Em que: *Na* corresponde a concentração real de N medido em função de um percentual de BFS e *Nc* a concentração crítica de N para as plantas de cada parcela dada a sua quantidade de BFS, conforme descrito por Sheehy et al. (1998):

$$Nc = 5,18 * W^{-0,52} \quad (3.3)$$

Em que: *W* é a BFS em Mg ha⁻¹.

3.2.4 Períodos de crescimento

Para analisar se IV podem ser usados para estimar o status N em diferentes períodos de crescimento do arroz irrigado, dividiu-se o ciclo da cultura do arroz em quatro períodos: vegetativo inicial (V1 a V9, por volta de 40 DAE), vegetativo final (V10 a R1), reprodutivo (R2 a R4) e enchimento de grãos (R5 a R8). Também foi analisado a predição do estado nitrogenado por meio dos IV considerando todo o ciclo da cultura, V1 a R8.

3.2.5 Análises estatísticas

Dados coletados nos ensaios de calibração (GO_14/15 (1, C) e (GO_17/18 [1, C]) foram usados para o desenvolvimento de modelos de regressão linear, quadrática,

logarítmica, exponencial e de potência, e os dados coletados nos ensaios de validação foram posteriormente utilizados para validar os modelos de regressão selecionados. Os coeficientes de determinação (R^2) para as relações entre IV e os indicadores do estado de N na cultura do arroz (BFS, CNF, IAF, ANF e INN) foram calculados usando o software R (R Core Team, 2019). O R^2 foi utilizado para seleção de modelos na calibração por se tratar de um índice que relaciona o percentual da variabilidade do indicador capaz de ser explicada por um índice, sendo buscados índices com alto percentual de explicação dessa variabilidade ($> R^2$). Vários autores (Cao et al., 2015, He et al., 2017; Zhang et al., 2019) utilizaram esse índice estatístico para a seleção de modelos. Somente os nove melhores modelos (maiores R^2) que explicaram a variabilidade entre os indicadores do estado de N na cultura e IV foram selecionados para a validação. A performance da validação dos modelos selecionados na calibração foi comparada pela raiz do erro quadrático médio (RMSE), pelo percentual de viés (PBIAS, %) e pelo índice de agregação de Willmott (d , que varia entre $0 < d < 1$). Esses índices aferem a capacidade do modelo em prever a resposta de interesse com dados independentes, sendo mais efetivo que o R^2 na avaliação de modelos, pois medem o erro entre a predição e a observação (RMSE), o desvio percentual entre um valor predito e o observado (PBIAS) e ainda a agregação ($d =$ convergência) do modelo selecionado na calibração em prever o comportamento do indicador com dados independentes, ou seja, o quanto o modelo pode se adequar a situação que não foi alvo da calibração (Cao et al., 2015; Bigiarini, 2020). Entretanto, se a função de melhor ajuste não for linear, a sensibilidade do índice de vegetação para o indicador do estado de N não é constante e, portanto, d e RMSE podem ser enganosos (Gitelson, 2013; Cao et al., 2015). Nesse caso, o percentual de viés (PBIAS, %) pode ser considerado um melhor indicador da performance dos IV na estimativa do estado de N da planta. Quanto maiores os valores de d na validação e quanto menores os valores de RMSE e PBIAS (valor absoluto), maior a precisão e acurácia do modelo para prever o estado de N na cultura.

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Variação dos indicadores de estado do N do arroz irrigado

Os indicadores do estado de N variaram amplamente através dos períodos analisados (Tabela 3.3). Considerando todo o ciclo da cultura, o IAF apresentou o maior

Tabela 3.3 – Estatística descritiva dos indicadores do estado de N: biomassa foliar seca (BFS), índice de área foliar (IAF), conteúdo de N foliar (CNF), acúmulo de N foliar (ANF) e índice de nutrição de N (INN) nos períodos de crescimento (vegetativo inicial: V1 a V9; vegetativo final: V10 a R1; reprodutivo: R2 a R4; enchimento de grãos: R5 a R8 e no ciclo todo: V1 a R8) para diferentes cultivares e safras de arroz irrigado. *n* representa o número de amostras.

Indicador do estado de N	Períodos de crescimento											
	Vegetativo inicial (n = 40)				Vegetativo final (n = 52)				Reprodutivo (n = 105)			
	Variação	Média	DP	CV (%)	Variação	Média	DP	CV (%)	Variação	Média	DP	CV (%)
BFS (kg ha ⁻¹)	185.5-2683.1	1238.4	647.4	52.3	774-3305	1877.4	657.5	35	1581-5156	2524	704	27.9
CNF (g kg ⁻¹)	20.4-53.3	35.7	10.03	28.1	19.5-36.6	29.2	4.1	14	19.1-36.3	26.6	2.86	10.7
ANF (kg ha ⁻¹)	9.6-68.2	40.2	17.5	43.5	22-87.2	54.2	19.2	35.4	39.1-161	67.6	23	34.1
IAF (m ² m ²)	0.29-5.47	2.27	1.41	62.2	1.22-5.74	3.07	1.16	37.8	1.69-8.3	3.74	1.51	40.4
INN	0.41-1.05	0.70	0.18	26.1	0.48-1.06	0.76	0.17	21.7	0.53-1.45	0.83	0.17	20

Indicador do estado de N	Growth stages							
	Enchimento de grãos (n = 83)				Ciclo todo (n = 280)			
	Variação	Média	DP	CV (%)	Variação	Média	DP	CV (%)
BFS (kg ha ⁻¹)	599-3838	1936	850	44	185-5156	2046	850	41.6
CNF (g kg ⁻¹)	14.36-32.1	23.5	4.5	19.3	14.3-53.3	27.5	6.4	23.4
ANF (kg ha ⁻¹)	8.6-106	47	24	51	8.6-161	55.1	24.2	44
IAF (m ² m ²)	0.46-7.69	2.6	1.85	71.1	0.29-8.32	3.07	1.64	53.6
INN	0.21-1.07	0.64	0.22	34.5	0.21-1.46	0.74	0.20	27.2

DP: desvio padrão, CV: coeficiente de variação (%).

coeficiente de variabilidade, seguido pelo ANF, BFS, INN e CNF. A BFS e a CNF apresentaram maior variabilidade no estágio vegetativo inicial (V1 a V9), enquanto o ANF, IAF e o INN tiveram maior variabilidade no estágio de enchimento de grãos (R5 a R8). A CNF diminuiu consideravelmente ao longo do ciclo: de 35,7 g kg⁻¹ para 29,2 g kg⁻¹, 26,6 g kg⁻¹ e 23,5 g kg⁻¹ no estágio vegetativo inicial (V1 a V9), estágio vegetativo final (V10 a R1), reprodutivo (R2 a R4) e no enchimento de grãos, respectivamente. Já, os valores dos indicadores do estado de N: BFS, ANF, IAF e INN aumentaram do estágio vegetativo inicial para o reprodutivo com imediato decréscimo desse último para o estágio de

enchimento de grãos, apresentando a mesma tendência dos fotoassimilados nos tecidos vegetais (Tabela 3.3).

3.3.2 Bandas espectrais isoladas

A correlação das bandas espectrais (V, VD, IVP) com os indicadores do estado do N variou de acordo com os períodos de crescimento do arroz (Figura 3.1). A BFS, a CNF e o IAF não apresentaram correlação significativa ($p > 0,05$) com as V, VD e IVP no período vegetativo inicial (Figura 3.1a). Contudo, no final do vegetativo, apenas a correlação destes indicadores com a banda V permaneceu não significativa ($p > 0,05$) (Figura 3.1b). As outras bandas (VD e IVP) associaram-se de forma negativa e positiva com a BFS e o IAF, respectivamente, enquanto o CNF não esteve correlacionado com nenhuma das bandas neste período de crescimento.

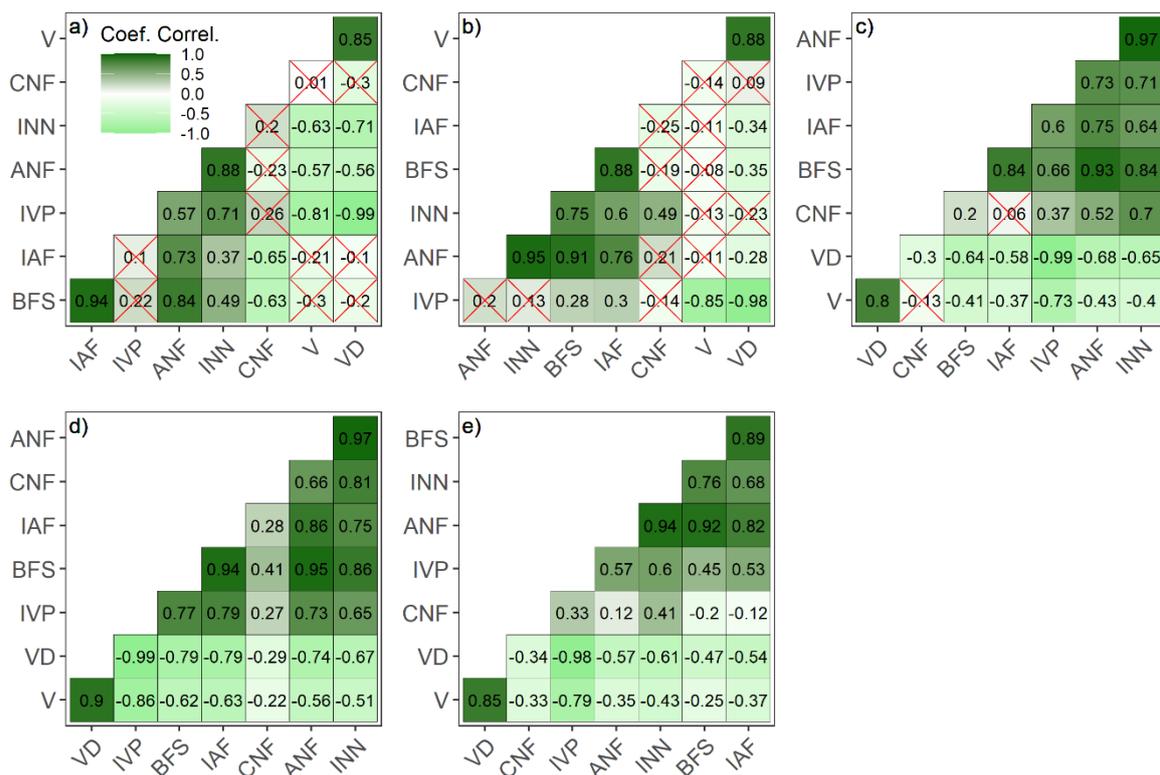


Figura 3.1. Coeficientes de correlação (r) para as relações entre bandas de refletância do sensor Crop Circle ACS-430 e indicadores do estado de N no arroz irrigado no período vegetativo inicial (a), V1-V9), vegetativo final (b), (V10-R1), reprodutivo (c), R2-R4), enchimento de grãos (d), R5-R8 e no ciclo todo (e). Quadrantes tachados com X vermelho representam correlações não significativas ($p > 0,05$).

Nos demais períodos (reprodutivo e enchimento de grãos) e quando considerado todo o ciclo, as correlações desses indicadores com as bandas testadas foram significativas

(Fig. 3.1c-e). A banda IVP correlacionou-se positivamente com a BFS (aumento da BFS com o aumento da reflexão dessa banda), contrastando com a associação das bandas V e VD, que se associaram negativamente com a BFS (Fig. 3.1b, c e d). Isso também foi observado para a CNF na planta (Fig. 3.1c-e).

O ANF e o INN correlacionaram-se positivamente com a banda IVP e negativamente com as bandas V e VD no vegetativo inicial, reprodutivo, enchimento de grãos e ciclo todo (Figura 3.1a, c-e). No vegetativo final, apenas o ANF esteve correlacionado com banda VD ($r < -0,30$). Variações na magnitude e direção das correlações entre as bandas espectrais V, VD e IVP com os indicadores do estado de N entre períodos de crescimento dificultam o estabelecimento de uma banda mais efetiva para compreensão da variação do estado nutricional de N nos períodos de crescimento da planta de arroz, bem como quando se considera o ciclo todo. Isso ilustra a importância de utilizar combinação de bandas de refletância, que permitem inferências mais consistentes do estado de N da planta nos períodos de crescimento.

3.3.3 Calibração de índices de vegetação e indicadores do estado do N no arroz irrigado

No período vegetativo inicial, os IV calculados se mostraram eficientes ($R^2 \geq 0,60$) na estimativa dos indicadores do estado de N em plantas de arroz. (Tabela 3.4). Já no vegetativo final, os IV não foram eficientes ($R^2 \leq 0,20$). Nos demais períodos de crescimento, os IV também explicaram eficientemente a variação dos indicadores do estado de N, exceto para CNF, cujas capacidade de explicação da variabilidade pelos índices selecionados foi menor comparada à observada no estágio vegetativo inicial. O ranqueamento dos melhores índices de vegetação variou entre os indicadores do estado de N nos diferentes períodos de crescimento da cultura que, de modo geral, foram levemente superiores ($> R^2$) aos índices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e RVI (Ratio Vegetation Index) para explicar a variabilidade dos indicadores (Tabela 3.4). Efeitos saturados característicos para as relações entre BFS e IAF com o índice de vegetação NDVI foram observados a partir de valores de NDVI igual a 0,70 (Fig. 3.2a, e). A variabilidade da concentração de N na folha foi melhor explicada no estágio vegetativo inicial, com acentuada queda em sua explicação pelos modelos selecionados nos demais estádios de crescimento (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 – Melhores índices vegetativos, incluindo NDVI and RVI, na calibração de modelos para estimação dos indicadores do estado de N (biomassa foliar seca (BFS), conteúdo de N foliar (CNF), índice de área foliar (IAF), acúmulo de N foliar (ANF), e índice de nutrição de N (INN)) nos períodos de crescimento (vegetativo inicial: V1-V9; vegetativo final: V10-R1; reprodutivo: R2-R4; enchimento de grãos: R5-R8 e ciclo todo: V1-R8), para diferentes cultivares e safras de arroz irrigado.

Vegetativo inicial			Vegetativo final			Reprodutivo			Enchimento de grãos			Ciclo todo		
**IV	*Equação	#R ²	**IV	*Equação	#R ²	**IV	*Equação	#R ²	**IV	*Equação	#R ²	**IV	*Equação	#R ²
BFS (kg ha⁻¹)														
NDVI	Qua	0.87	NDVI	N/A	ns	NDVI	Qua	0.67	NDVI	Pot	0.59	NDVI	Exp	0.10
RVI	Exp	0.82	RVI	N/A	ns	RVI	Lin	0.68	RVI	Lin	0.62	RVI	Lin	0.14
NLI	Qua	0.90	M_RESAVI	Exp	0.13	WICI1	Lin	0.69	REWDRVI2	Lin	0.75	Chl	Lin	0.27
RDVI	Qua	0.90	NDRE	Exp	0.11	M_RESAVI	Lin	0.69	NDRE	Lin	0.74	NIR	Lin	0.27
WICI2	Lin	0.89	REOSAVI	Exp	0.11	REWDRVI2	Lin	0.69	RESAVI	Lin	0.74	RERVI	Lin	0.27
Chl	Lin	0.88	RESAVI	Exp	0.11	NDRE	Lin	0.69	REOSAVI	Lin	0.74	REDVI	Lin	0.27
NIR	Lin	0.88	RERDVI	Exp	0.10	RESAVI	Lin	0.69	RERDVI	Lin	0.74	CIRE	Lin	0.27
RERVI	Lin	0.88	-	N/A	ns	REOSAVI	Lin	0.69	VPLOT1	Lin	0.74	REWDRVI	Lin	0.27
CIRE	Lin	0.88	-	N/A	ns	RERVI	Log	0.69	MSR_RE	Lin	0.74	MSR_RE	Lin	0.26
CNF (g kg⁻¹)														
NDVI	Lin	0.45	NDVI	Lin	0.11	NDVI	Qua	0.41	NDVI	Pot	0.20	NDVI	Pot	0.21
RVI	Lin	0.55	RVI	Lin	0.13	RVI	Lin	0.30	RVI	Pot	0.15	RVI	Pot	0.21
WICI1	Qua	0.75	MSR	Lin	0.13	Chl	Lin	0.45	WICI1	Qua	0.26	WICI1	Pot	0.25
NLI	Qua	0.73	SRI	Lin	0.13	NIR	Lin	0.45	REWDRVI2	Qua	0.26	REWDRVI2	Pot	0.25
VPLOT1	Qua	0.71	-	N/A	ns	RERVI	Lin	0.45	NDRE	Qua	0.25	M_RESAVI	Pot	0.24
WICI2	Lin	0.62	-	N/A	ns	CIRE	Lin	0.45	REOSAVI	Qua	0.25	NDRE	Pot	0.24
Chl	Lin	0.61	-	N/A	ns	REWDRVI	Lin	0.44	RESAVI	Qua	0.25	RESAVI	Pot	0.24
NIR	Lin	0.61	-	N/A	ns	RDVI	Qua	0.44	RERDVI	Qua	0.25	REOSAVI	Pot	0.24
RERVI	Lin	0.61	-	N/A	ns	MSR_RE	Lin	0.44	VPLOT1	Qua	0.24	WICI2	Pot	0.24
Índice de Área Foliar (IAF – m².m²)														
NDVI	Qua	0.86	NDVI	N/A	ns	NDVI	Qua	0.70	NDVI	Lin	0.70	NDVI	Lin	0.28
RVI	Exp	0.84	RVI	N/A	ns	RVI	Exp	0.59	RVI	Lin	0.76	RVI	N/A	Ns
M_RESAVI	Qua	0.95	-	N/A	ns	NLI	Qua	0.70	NIR	Lin	0.83	REDVI	Lin	0.38
WICI1	Qua	0.95	-	N/A	ns	WICI2	Lin	0.67	RERVI	Lin	0.83	Chl	Lin	0.38
VPLOT1	Qua	0.94	-	N/A	ns	WICI1	Lin	0.67	REWDRVI	Lin	0.83	NIR	Lin	0.38
REWDRVI	Qua	0.94	-	N/A	ns	NDRE	Lin	0.67	VPLOT1	Lin	0.83	RERVI	Lin	0.38
RDVI	Qua	0.92	-	N/A	ns	RESAVI	Lin	0.67	REWDRVI2	Lin	0.83	CIRE	Lin	0.38
WICI2	Lin	0.90	-	N/A	ns	REOSAVI	Lin	0.67	RESAVI	Lin	0.83	REWDRVI	Lin	0.38
Chl	Lin	0.90	-	N/A	ns	VPLOT1	Log	0.66	NDRE	Lin	0.83	MSR_RE	Lin	0.37

Tabela 3.4. Continuação...

Vegetativo inicial			Vegetativo final			Reprodutivo			Enchimento de grãos			Ciclo todo		
**IV	*Equação	#R ²	**IV	*Equação	#R ²	**IV	*Equação	#R ²	**IV	*Equação	#R ²	**IV	*Equação	#R ²
ANF (kg ha⁻¹)														
NDVI	Lin	0.79	NDVI	N/A	ns	NDVI	Qua	0.74	NDVI	Pow	0.53	NDVI	Pot	0.26
RVI	Lin	0.85	RVI	N/A	ns	RVI	Exp	0.68	RVI	Qua	0.60	RVI	Lin	0.26
NLI	Qua	0.89	M_RESAVI	Exp	0.17	VPLOT1	Log	0.79	NIR	Qua	0.66	Chl	Lin	0.43
WICI2	Lin	0.87	NDRE	Exp	0.14	NDRE	Lin	0.79	RERVI	Qua	0.66	NIR	Lin	0.43
REWDRVI	Lin	0.86	REOSAVI	Exp	0.14	RESAVI	Lin	0.79	RERDVI	Lin	0.65	RERVI	Lin	0.43
Chl	Lin	0.86	RESAVI	Exp	0.14	REOSAVI	Lin	0.79	VPLOT1	Lin	0.64	CIRE	Lin	0.43
NIR	Lin	0.86	RERDVI	Exp	0.13	REWDRVI2	Lin	0.79	MSR_RE	Lin	0.64	REDVI	Lin	0.43
RERVI	Lin	0.86	REWDRVI2	Exp	0.12	NIR	Log	0.79	REDVI	Lin	0.64	REWDRVI	Lin	0.43
CIRE	Lin	0.86	WICI1	Exp	0.12	RERVI	Log	0.79	REWDRVI	Lin	0.64	MSR_RE	Lin	0.43
INN														
NDVI	Exp	0.74	NDVI	N/A	ns	NDVI	Qua	0.73	NDVI	Exp	0.43	NDVI	Pot	0.39
RVI	Pot	0.74	RVI	N/A	ns	RVI	Lin	0.69	RVI	Pot	0.43	RVI	Pot	0.35
M_RESAVI	Exp	0.76	M_RESAVI	Lin	0.19	VPLOT1	Lin	0.80	VPLOT1	Qua	0.57	M_RESAVI	Lin	0.52
WICI1	Exp	0.76	NDRE	Lin	0.16	NIR	Log	0.80	NIR	Qua	0.56	NDRE	Lin	0.52
MSR_RE	Pot	0.75	REOSAVI	Lin	0.16	MSR_RE	Lin	0.80	RERVI	Qua	0.56	REOSAVI	Lin	0.52
RERDVI	Pot	0.75	RESAVI	Lin	0.16	REWDRVI	Lin	0.80	WICI2	Qua	0.55	RESAVI	Lin	0.52
NDRE	Pot	0.75	RERDVI	Lin	0.15	RERDVI	Lin	0.79	REWDRVI2	Pow	0.55	RERDVI	Lin	0.52
RESAVI	Pot	0.75	WICI1	Lin	0.14	M_RESAVI	Lin	0.79	M_RESAVI	Pow	0.54	REWDRVI2	Lin	0.52
REOSAVI	Pot	0.75	REWDRVI2	Lin	0.14	NDRE	Lin	0.79	NDRE	Pow	0.54	VPLOT1	Lin	0.52

*Equações: Lin - linear, Log - logarítmica, Quad - quadrática, Exp - exponencial, Pot-Potência;

#R² - Coeficiente de determinação; **IV - índice de vegetação

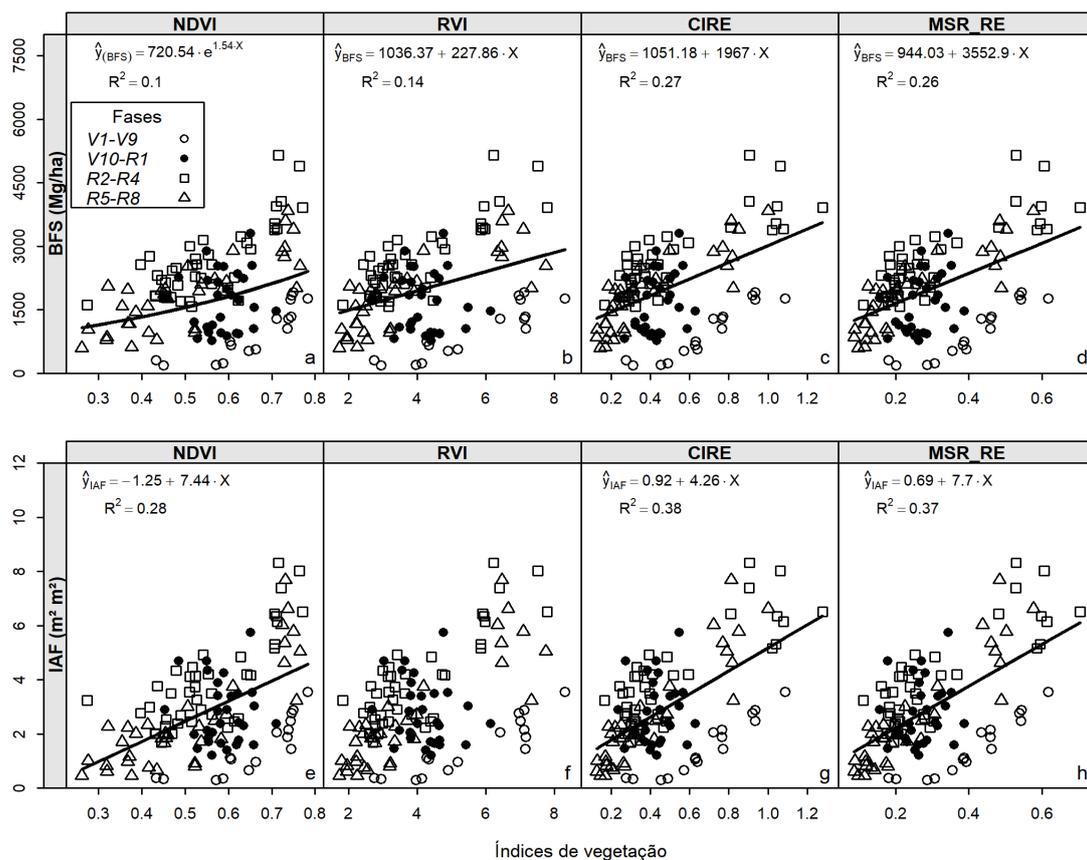


Figura 3.2. Relações da biomassa seca foliar e do índice de área foliar com os índices de vegetação (NDVI (a) e (e); RVI (b) e (f); CIRE (c) e (g); MSR_RE (d) e (h), respectivamente). Círculos vazios, preenchidos, quadrados e triângulos representam os períodos: vegetativo inicial (V1-V9); vegetativo final (V10-R1); reprodutivo (R2-R4) e de enchimento de grãos (R5-R8) para diferentes cultivares safras de arroz irrigado.

3.3.4 Validação das relações entre índices de vegetação e indicadores do estado de N no arroz

A performance dos modelos selecionados no processo de calibração é descrita na Tabela 3.5. Considerando o ciclo da cultura, para a BFS, os índices de vegetação mais promissores foram CIRE (Índice de clorofila de borda vermelha) e MSR_RE (Proporção simples da borda vermelha modificada), os quais apresentaram valores mais próximos a 1 para o índice estatístico *d* em comparação com os demais índices (Tabela 3.5). Ambos os índices de vegetação foram ajustados linearmente (Tabela 3.4). Também, esses índices proporcionaram os menores valores de RMSE (Tabela 3.5). Para a CNF a performance dos índices selecionados foi similar (Fig. 3.3). Na estimação do IAF e do ANF, os índices NDVI e RVI apresentaram performance inferior aos demais selecionados. Isto também foi observado para o INN (Tabela 3.5), que foi estimado com maior eficiência ($d = 0.62$) pelo índice M_RESAVI (índice de vegetação de borda vermelha ajustado ao solo modificado).

Tabela 3.5. Resultados da validação de performance dos modelos ajustados com os índices (NDVI e RVI e dos sete melhores índices de vegetação) para estimação dos indicadores do estado de N (biomassa foliar seca (BFS), conteúdo de N foliar (CNF), índice de área foliar (IAF), acúmulo de N foliar (ANF), e índice de nutrição de N (INN)) nos períodos de crescimento (vegetativo inicial: V1-V9; vegetativo final: V10-R1; reprodutivo: R2-R4; enchimento de grãos: R5-R8 e ciclo todo: V1-R8), para diferentes cultivares e safras de arroz irrigado.

Vegetativo inicial				Vegetativo final				Reprodutivo				Enchimento de grãos				Ciclo todo			
Índice	RMSE kg ha ⁻¹	BIAS %	d	Índice	RMSE kg ha ⁻¹	BIAS %	d	Índice	RMSE kg ha ⁻¹	BIAS %	d	Índice	RMSE kg ha ⁻¹	BIAS %	d	Índice	RMSE kg ha ⁻¹	BIAS %	d
Biomassa foliar seca (kg ha⁻¹)																			
NDVI	1107.07	-64.3	0.45	NDVI	-	-	-	NDVI	672.0	2.7	0.37	NDVI	734.1	-13.1	0.66	NDVI	851.81	-20.6	0.45
RVI	1100.68	-63.8	0.44	RVI	-	-	-	RVI	663.0	5.3	0.41	RVI	739.3	-13.3	0.6	RVI	774.05	-9.8	0.36
NLI	1185.37	-71.6	0.44	M_RESAVI	704.62	-22.4	0.49	WICI1	604.7	6.6	0.51	REWDRVI2	618.2	-10.5	0.75	Chl	716.82	-11	0.49
RDVI	1131.82	-66.8	0.44	NDRE	711.76	-23	0.49	M_RESAVI	602.5	7.2	0.53	NDRE	623.3	-10.7	0.74	NIR	716.82	-11	0.49
WICI2	1189.57	-70.6	0.43	REOSAVI	712.42	-23.1	0.49	REWDRVI2	586.6	6.6	0.53	RESAVI	623.4	-10.7	0.74	RERVI	716.82	-11	0.49
Chl	1228.06	-74.1	0.42	RESAVI	712.14	-23.1	0.49	NDRE	586.5	6.4	0.52	REOSAVI	623.3	-10.7	0.74	REDVI	716.82	-11	0.49
NIR	1228.07	-74.1	0.42	RERDVI	715.62	-23.4	0.49	RESAVI	586.4	6.4	0.52	RERDVI	630.3	-11.1	0.73	CIRE	711.48	-10.7	0.5
RERVI	1228.06	-74.1	0.42	-	-	-	-	REOSAVI	586.5	6.4	0.52	VPLOT1	633.3	-11.3	0.73	REWDRVI	713.49	-10.8	0.49
CIRE	1228.06	-74.1	0.42	-	-	-	-	RERVI	7439.4	306.2	0.1	MSR_RE	635.99	-11.5	0.72	MSR_RE	710.77	-10.7	0.5
Concentração de N foliar (g kg⁻¹)																			
NDVI	20.06	66	0.24	NDVI	8.68	26.4	0.42	NDVI	2.8	4.9	0.41	NDVI	7.49	-26.5	0.45	NDVI	5.34	11.7	0.51
RVI	20.58	68	0.24	RVI	6	11.2	0.37	RVI	3.2	6.6	0.37	RVI	4.48	2.9	0.3	RVI	5.17	10.9	0.50
WICI1	23.01	77.5	0.23	MSR	6	11.2	0.37	Chl	3.18	6.3	0.35	WICI1	5.05	9.2	0.49	WICI1	5.28	10.6	0.49
NLI	23.83	79.6	0.22	SRI	6.01	11.2	0.37	NIR	3.18	6.3	0.35	REWDRVI2	4.91	8.4	0.47	REWDRVI2	5.39	11.3	0.48
VPLOT1	16.39	-53.5	0.29	-	-	-	-	RERVI	3.18	6.3	0.35	NDRE	4.98	8.9	0.49	M_RESAVI	5.42	11.4	0.47
WICI2	22.73	75.9	0.23	-	-	-	-	CIRE	3.18	6.3	0.35	REOSAVI	4.98	8.9	0.49	NDRE	5.38	11.2	0.47
Chl	23.16	77.4	0.23	-	-	-	-	REWDRVI	3.21	6.4	0.35	RESAVI	4.98	8.9	0.49	RESAVI	5.39	11.3	0.47
NIR	23.16	77.4	0.23	-	-	-	-	RDVI	13.19	-48.1	0.23	RERDVI	4.95	8.7	0.48	REOSAVI	5.38	11.3	0.47
RERVI	23.16	77.4	0.23	-	-	-	-	MSR_RE	3.23	6.5	0.35	VPLOT1	30.42	-131.2	0.19	WICI2	5.29	11	0.48
Índice de Área Foliar (IAF – m².m²)																			
NDVI	2.47	-73.8	0.46	NDVI	-	-	-	NDVI	1.56	-1.9	0.37	NDVI	1.54	-12.1	0.67	NDVI	1.53	-12.9	0.5
RVI	2.44	-72.2	0.45	RVI	-	-	-	RVI	1.48	-3.3	0.37	RVI	1.56	-20.8	0.62	RVI	-	-	-
M_RESAVI	2.69	-83.5	0.44	-	-	-	-	NLI	1.54	-0.8	0.4	NIR	1.43	-20.4	0.7	REDVI	1.45	-15.3	0.54
WICI1	2.65	-81.5	0.45	-	-	-	-	WICI2	1.35	2.1	0.46	RERVI	1.4	-18.3	0.71	Chl	1.46	-15.7	0.53
VPLOT1	21.87	787.1	0.1	-	-	-	-	WICI1	1.4	4.6	0.48	REWDRVI	1.39	-17.6	0.72	NIR	1.46	-16.1	0.53
REWDRVI	2.63	-80.8	0.45	-	-	-	-	NDRE	1.37	4.3	0.49	VPLOT1	1.44	-22.9	0.71	RERVI	1.46	-15.7	0.53
RDVI	2.54	-76.7	0.45	-	-	-	-	RESAVI	1.37	4.3	0.49	REWDRVI2	1.36	-15.4	0.74	CIRE	1.46	-15.7	0.53
WICI2	2.6	-79	0.45	-	-	-	-	REOSAVI	1.37	4.3	0.49	RESAVI	1.37	-15.6	0.74	REWDRVI	1.45	-15.4	0.54
Chl	2.66	-81.9	0.45	-	-	-	-	VPLOT1	2154.47	-59763.6	0	NDRE	1.37	-15.6	0.74	MSR_RE	1.44	-15.2	0.54

Tabela 3.5. Continuação...

Índice	Vegetativo inicial			Vegetativo final			Reprodutivo			Enchimento de grãos (R4 - R8)			Ciclo todo (V1 - R8)						
	RMSE kg ha ⁻¹	BIAS %	d	Índice	RMSE kg ha ⁻¹	BIAS %	d	Índice	RMSE kg ha ⁻¹	BIAS %	d	Índice	RMSE kg ha ⁻¹	BIAS %	d				
<i>Acúmulo de N nas folhas (kg ha⁻¹)</i>																			
NDVI	18.94	-22.8	0.45	NDVI	-	-	-	NDVI	20.57	9	0.34	NDVI	20.85	-11.9	0.63	NDVI	20.7	-9.4	0.48
RVI	19.18	-27	0.46	RVI	-	-	-	RVI	18.98	9.1	0.37	RVI	19.28	2.5	0.71	RVI	20.32	-0.9	0.41
NLI	22.9	-44.5	0.5	M_RESAVI	21.68	-12.8	0.4	VPLOT1	54805.09	-87874	0	NIR	16.42	6.9	0.80	Chl	18.27	-2.2	0.56
WICI2	23.94	-46	0.45	NDRE	21.88	-13.7	0.4	NDRE	19.72	15.4	0.49	RERVI	16.16	-0.8	0.79	NIR	18.27	-2.2	0.56
REWDRVI	25.43	-50.8	0.45	REOSAVI	21.87	-13.7	0.39	RESAVI	19.71	15.4	0.49	RERDVI	17.23	-5.4	0.72	RERVI	18.27	-2.2	0.56
Chl	25.16	-50.1	0.45	RESAVI	21.88	-13.7	0.4	REOSAVI	19.72	15.4	0.49	VPLOT1	17.27	-5.5	0.72	CIRE	18.27	-2.2	0.56
NIR	25.15	-50.1	0.45	RERDVI	21.93	-14.1	0.39	REWDRVI2	19.83	15.8	0.49	MSR_RE	17.31	-5.8	0.72	REDVI	18.2	-1.8	0.58
RERVI	25.16	-50.1	0.45	REWDRVI2	21.59	-14.6	0.4	NIR	6114.23	-9803.3	0	REDVI	17.33	-5.9	0.71	REWDRVI	18.23	-1.9	0.57
CIRE	25.16	-50.1	0.45	WICII	21.29	-15.3	0.41	RERVI	34.83	51	0.36	REWDRVI	17.39	-6.2	0.71	MSR_RE	18.2	-1.7	0.58
<i>Índice de Nutrição Nitrogenada (INN)</i>																			
NDVI	0.14	1.1	0.58	NDVI	-	-	-	NDVI	0.15	6.8	0.35	NDVI	0.19	-5.7	0.59	NDVI	0.18	1.7	0.55
RVI	0.14	2.1	0.56	RVI	-	-	-	RVI	0.16	10	0.39	RVI	0.19	-6.8	0.6	RVI	0.18	-0.4	0.51
M_RESAVI	0.16	-14.4	0.52	M_RESAVI	0.19	-0.5	0.4	VPLOT1	0.22	22.9	0.4	VPLOT1	41.23	-6576.5	0.01	M_RESAVI	0.16	3.0	0.62
WICII	0.15	-11.9	0.53	NDRE	0.19	-0.8	0.38	NIR	18.43	-2350.2	0.01	NIR	0.46	68.7	0.48	NDRE	0.16	3.0	0.60
MSR_RE	0.16	-12.1	0.52	REOSAVI	0.19	-0.8	0.38	MSR_RE	0.15	10	0.45	RERVI	0.16	4.4	0.77	REOSAVI	0.16	3.3	0.60
RERDVI	0.16	-12.3	0.52	RESAVI	0.19	-0.7	0.38	REWDRVI	0.15	9.7	0.46	WICI2	0.17	4.6	0.76	RESAVI	0.16	3.4	0.60
NDRE	0.16	-12.5	0.53	RERDVI	0.19	-0.9	0.37	RERDVI	0.15	11	0.45	REWDRVI2	0.16	-3.1	0.75	RERDVI	0.16	3.1	0.59
RESAVI	0.16	-12.5	0.53	WICII	0.19	-1.4	0.38	M_RESAVI	0.16	11.2	0.45	M_RESAVI	0.16	-2.8	0.74	REWDRVI2	0.16	3.4	0.61
REOSAVI	0.16	-12.6	0.53	REWDRVI2	0.19	-1.2	0.37	NDRE	0.15	10.5	0.45	NDRE	0.16	-3.1	0.75	VPLOT1	0.16	-4.3	0.59

RMSE: raiz do erro quadrático médio; BIAS: Distorção; *d*: índice de agregação de Willmott.

Os modelos selecionados subestimaram consideravelmente a BFS no vegetativo inicial (-63,8 < PBIAS < -74,1) e vegetativo final (-22,4 < PBIAS < -23,4) (Tabela 3.5). Melhores convergências (baixo viés) entre dados simulados vs observados da BFS foram obtidos com os índices NDVI e RVI para o período reprodutivo. Contudo, para o período de enchimento de grãos e na análise envolvendo o ciclo todo esses índices foram inferiores aos demais (Tabela 3.5). A determinação do IAF pelos modelos selecionados só se mostrou efetiva (-0.8 < PBIAS < 4,6) no estágio reprodutivo, sugerindo que o indicador não é promissor para ser determinado por índices de vegetação em todos os estádios de crescimento, ou ainda por um modelo generalista para o ciclo todo.

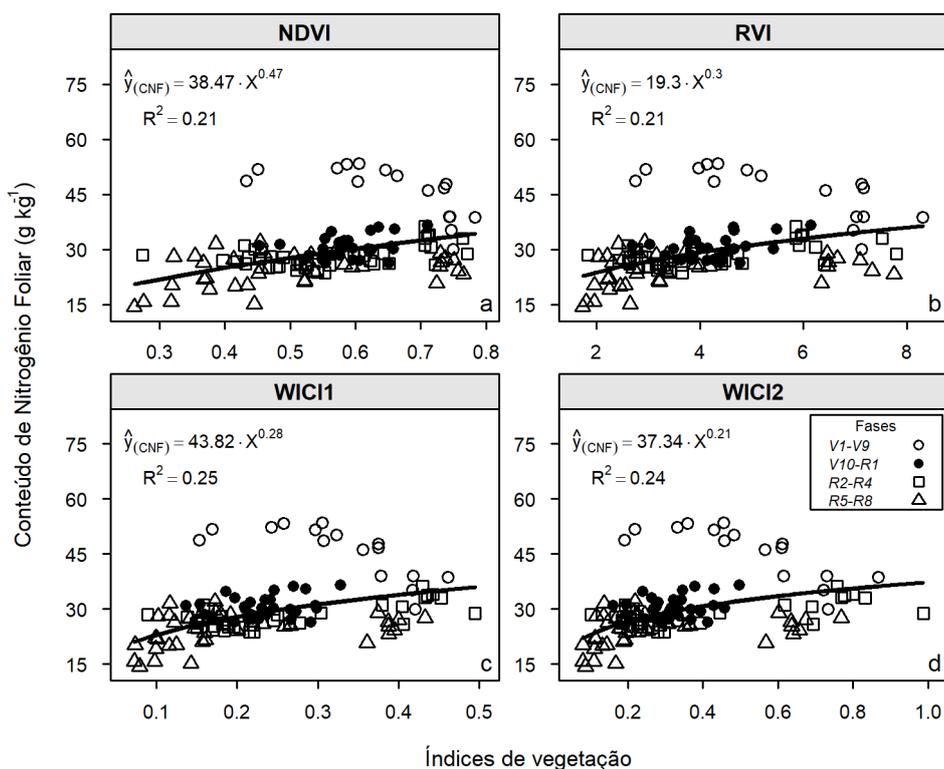


Figura 3.3. Relações entre o teor de N foliar e índices de vegetação NDVI (a), RVI (b), WICI1 (c) e WICI2 (d). Círculos vazios, preenchidos, quadrados e triângulos representam os períodos: vegetativo inicial (V1-V9); vegetativo final (V10-R1); reprodutivo (R2-R4) e de enchimento de grãos (R5-R8) para diferentes cultivares safras de arroz irrigado.

A CNF e o ANF não foram estimadas com eficiência ($-53,5 < \text{PBIAS} < 79,6$ e $-50,8 < \text{PBIAS} < -22,8$, respectivamente) no vegetativo inicial. Para os demais períodos e na análise envolvendo o ciclo todo ocorreu melhoria na convergência entre as simulações oriundas dos modelos ajustados com os dados de validação (Tabela 3.5). Para esses indicadores, o desempenho dos índices de vegetação contrastou bastante entre os períodos de crescimento e, na análise envolvendo o ciclo todo, a performance de estimação do NDVI e RVI foi inferior à dos demais.

Dos indicadores do estado de N no arroz, o INN foi o que melhor pode ser estimado pelos índices vegetativos selecionados nos estádios específicos de crescimento da cultura, bem como no ciclo todo. Os índices NDVI e RVI apresentaram performance superior aos demais no vegetativo inicial (acurácia $\geq 97,5\%$ e $d = 0,55$). Estes índices não foram promissores para o final do período vegetativo (sequer se ajustaram para explicação da variabilidade), e nos demais períodos, embora tenham apresentado considerável precisão (acurácia ≥ 90) manifestaram baixa agregação aos modelos selecionados para estimação do

NNI, revelando inconsistência na performance de estimação com o aumento da variação do índice de vegetação (Fig. 3.4a e b). Neste sentido vale destacar os índices M_RESAVI e NDRE que apresentaram acurácia $\geq 85\%$ quando adotados em modelos exponencial e de potência, respectivamente, no vegetativo inicial e de potência no período reprodutivo, ou em modelos lineares de 1º grau no vegetativo final e no ciclo todo (Tabela 3.5).

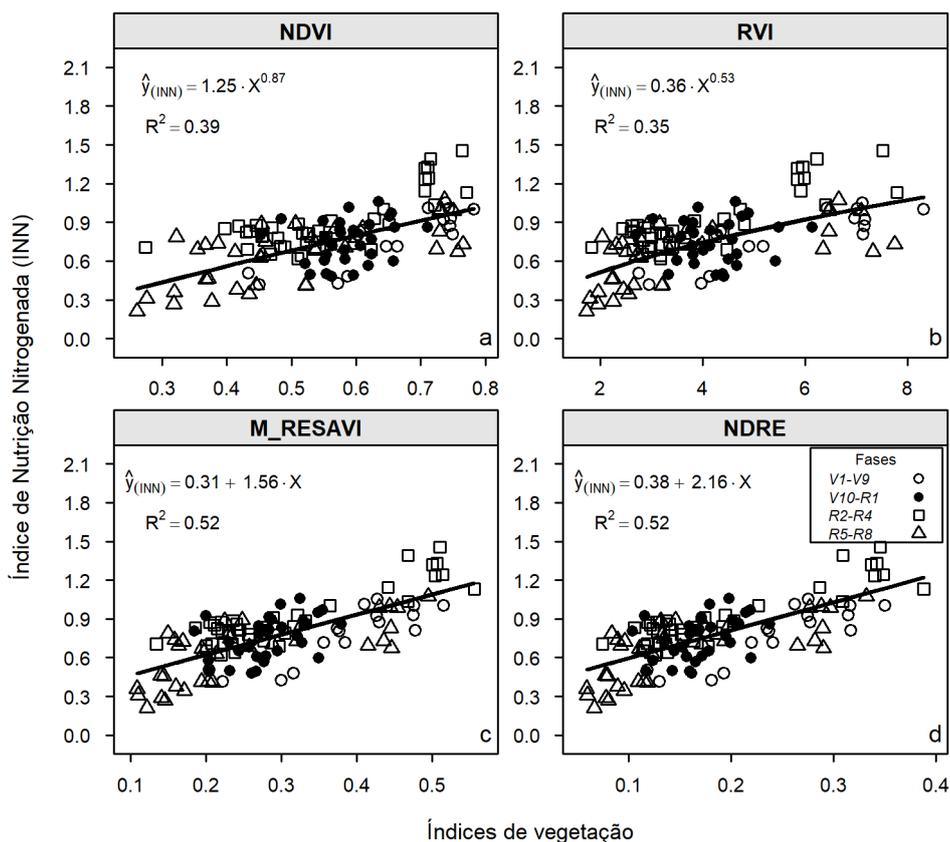


Figura 3.4. Relações entre o índice de nutrição nitrogenada e índices de vegetação NVDI (a), RVI (b), M_RESAVI (c) e NDRE (d). Círculos vazios, preenchidos, quadrados e triângulos representam os períodos: vegetativo inicial (V1-V9); vegetativo final (V10-R1); reprodutivo (R2-R4) e de enchimento de grãos (R5-R8) para diferentes cultivares safras de arroz irrigado.

3.4 DISCUSSÃO

Foram avaliados neste estudo 22 índices de vegetação calculados com bandas espectrais V, VD e IVP e suas combinações para estimar o estado de N do arroz. Os resultados da análise de banda única indicaram que as bandas IVP e VD foram mais eficientes que a banda V para estimação dos indicadores do estado de N na planta, com exceção para a CNF, especialmente nos períodos reprodutivo e de enchimento de grãos (Fig.

3.1c-d). Contudo, a banda IVP é sensível à estrutura foliar e à biomassa acumulada (Lorenzen e Jensen, 1988; Cao et al. 2013), o que torna o seu uso isolado pouco eficiente devido ao efeito de saturação, problema que também é observado com o índice NDVI (obtido pela normalização das bandas IVP e V). Dentre os IV que são calculados por meio das três bandas disponíveis na configuração do sensor Crop Circle ACS-430, destaca-se os índices WICI1 e WICI2, que foram efetivos para a determinação do IAF no período reprodutivo e pouco efetivos na estimação CNF ao longo de todas as fases de crescimento da cultura (Tabela 3.5). Apesar de não mostrarem efeitos óbvios de saturação, como o NDVI, esses índices foram eficientes somente para estimar o IAF, que não tem uma relação direta com o aporte de N na folha, pois o acúmulo de N não acompanha o acúmulo de biomassa e, portanto, não são promissores no gerenciamento do fornecimento de N para a cultura (Li et al., 2012).

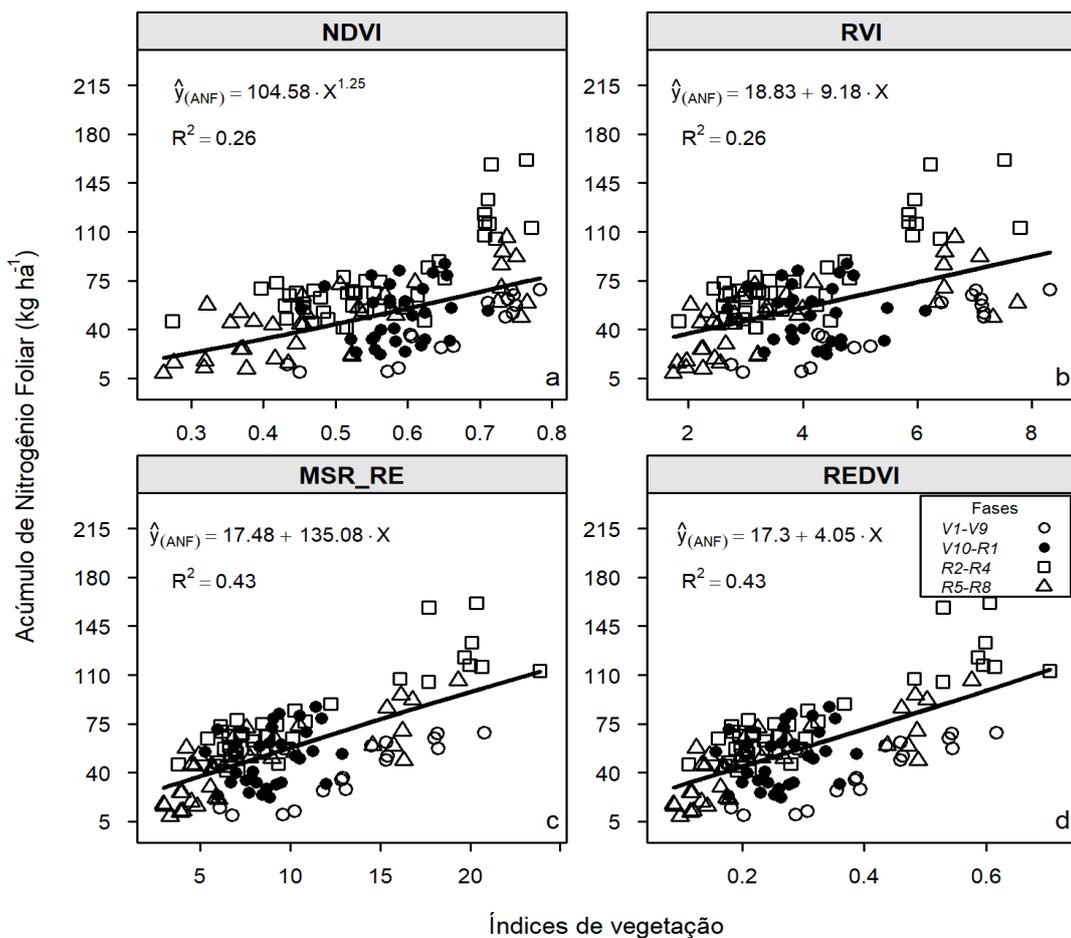


Figura 3.5. Relações entre o acúmulo de N nas folhas e índices de vegetação NDVI (a), RVI (b), MSR_RE (c) e REDVI (d). Círculos vazios, preenchidos, quadrados e triângulos representam os períodos: vegetativo inicial (V1-V9); vegetativo final (V10-R1); reprodutivo (R2-R4) e de enchimento de grãos (R5-R8) para diferentes cultivares safras de arroz irrigado.

O estágio de crescimento tem demonstrado apresentar efeito significativo nas relações entre IV e indicadores do estado de N (Li et al., 2012; Yu et al., 2013; Cao et al., 2013; 2015). Como ilustrado nas Figuras 3.3 e 3.5, o período vegetativo distou consideravelmente dos reprodutivo e de enchimento de grãos, formando dois grupos de pontos quando a CNF e o ANF foram plotadas com os IV.

Os IV explicaram a variação dos indicadores do estado de N no vegetativo inicial. No entanto, para o processo de validação, todos os IV selecionados foram ineficientes na estimativa dos indicadores do estado de N no arroz irrigado no início e no final do estágio vegetativo, com exceção do INN. Provavelmente, o efeito da refletância da lâmina d'água na superfície do solo foi maior neste período mascarando o efeito da refletância do dossel pela oferta das bandas espectrais do sensor. A performance da estimação dos indicadores do estado de N pelos IV selecionados melhorou consideravelmente nos períodos reprodutivos e de enchimento de grãos, quando o dossel passou a cobrir parcialmente o campo (Tabela 3.5). Nesses períodos, observou-se melhorias na estimativa do CNF com base nos IV selecionados para o processo de validação. Cao et al. (2013) também relataram que a variação da concentração de N no arroz irrigado foi mais explicada por IV no período reprodutivo ($R^2 = 0,34$) do que no vegetativo ($R^2 = 0,08$). Apesar da melhoria de performance em relação ao período vegetativo (inicial e final), a explicação na variação da CNF pelos melhores IV calculados foi fraca ($R^2 = 0.26$ e 0.45 nos períodos reprodutivo e de enchimento de grãos, respectivamente). A razão disso é que a absorção de N não acompanha o acúmulo de biomassa, resultando em biomassa dominante no dossel das culturas, interferindo na refletância em folhas mais baixas e, conseqüentemente, na estimação do teor de N (Li et al., 2012).

Menores deposição de biomassa parecem ter comprometido a eficiência da predição dos indicadores do N no período vegetativo. Todavia superar o efeito de saturação causado pelo índice NDVI sob condições de biomassa moderada a alta é também uma grande motivação que direciona a busca de índices de vegetação que possam ser mais efetivos que o NDVI para auxiliar no manejo de precisão do N. Neste estudo, o índice RVI mostrou menor potencial de saturação que o NDVI na estimação da BFS para todo o ciclo (Tabela 3.5). De similar forma ao RVI, os índices MSR_RE e CIRE mostraram-se menos sensíveis ao efeito de saturação observado para o NDVI para estimação da BFS. O efeito de saturação está relacionado às bandas escolhidas e ao efeito de normalização incorporado na fórmula de cálculo dos IV (Gnyp et al., 2014). Segundo esses mesmos autores, os problemas de

saturação podem ser reduzidos usando comprimentos de onda mais próximos, capazes de penetrar com maior eficiência o dossel das plantas. Os resultados deste estudo para uso de IV na estimação da BFS corroboram os apontamentos de Gnyp et al. (2014), evidenciando que o tipo de normalização (RVI vs NDVI) bem como o uso de bandas proximais (IVP e VD; vide obtenção dos índices MSR-RE e CIRE (Tabela 3.2) podem reduzir o efeito de saturação, característico do NDVI.

Os IV selecionados apresentaram performance similar para determinação da CNF ao longo do ciclo da cultura e no período reprodutivo. Nos períodos vegetativo final e enchimento de grãos, o NDVI mostrou a pior performance dentre os índices selecionados (Tabela 3.5). Esses resultados concordam com os observados por Li et al. (2010) e Cao et al. (2015), que trabalharam com o trigo de inverno. Para o arroz, Yao et al. (2014) observaram que a explicação da variação da concentração de N da planta por esse índice foi inferior a 40%, corroborando os resultados deste estudo. Quando observada a performance dos indicadores nos ensaios de validação e a capacidade de explicação da CNF obtida com os resultados de calibração pode-se considerar que os índices selecionados foram eficientes na estimação da CNF apenas no período reprodutivo. A determinação de IV capazes de estimar a CNF no período reprodutivo (R2-R4: antes do florescimento), período no qual a planta ainda pode responder à intervenção nitrogenada, pode nortear o manejo eficiente do N, principalmente para cultivares com alta demanda desse nutriente.

Os IV apresentaram performance similar na estimação do ANF do arroz irrigado no estágio vegetativo (inicial e final). Contudo, nenhum dos IV explicaram efetivamente a variação do ANF nas plantas de arroz. Já, nos períodos reprodutivo, enchimento de grãos ou considerando o ciclo todo, os índices NDVI e RVI foram menos eficientes que os demais índices calculados tanto nos ensaios de calibração como de validação (Tabelas 3.4 e 3.5). Essa informação permite estimar o acúmulo de N nas folhas por unidade de área para vários IV calculados, permitindo o subsídio de N em tempo hábil, principalmente se diagnosticada deficiência no início do período reprodutivo. Performances superiores as dos índices NDVI e RVI encontradas neste estudo, para a análise considerando o ciclo todo, foram reportadas para o trigo de inverno por Cao et al. (2015) e para o arroz por Yao et al. (2014), nos quais a explicação da variabilidade do ANF foram de 78-82 e de 70-73%, respectivamente. Isso demonstra que esses IV são bem mais sensíveis às variações dos locais de cultivo, cultivares e estádios de crescimento que os demais IV calculados. Outro agravante é que se as cultivares

de arroz irrigado possuírem alto acúmulo de biomassa, o NDVI pode saturar e se tornar ainda mais ineficiente na estimação desse indicador.

Embora a BFS, o IAF, a CNF, o ANF e o INN sejam todos indicadores do estado de N, o INN é considerado um indicador melhor para o diagnóstico da nutrição do N nas plantas (Lemaire et al., 2008; Cao et al., 2013). Isso se justifica pelo fato de que o INN está relacionado com uma quantidade crítica de N capaz de garantir o desenvolvimento da planta, diferentemente dos demais indicadores. Devido às necessidades de amostragem destrutiva e análise química para sua determinação, tem havido um interesse crescente em usar a tecnologia de sensoriamento remoto para estimar o INN de forma não destrutiva (Ziadi et al., 2008; Li et al., 2010). Três abordagens principais podem ser adotadas para estimar o INN de forma não destrutiva usando tecnologias de detecção. A primeira abordagem é estimar o acúmulo de biomassa e a concentração de N da planta. Com as informações de biomassa estimada, é possível determinar a concentração crítica de N e o INN pode ser calculado como a razão entre a concentração real estimada de N e a concentração crítica estimada de N do nível de biomassa correspondente (Cao et al., 2013). Os resultados deste estudo indicaram que a BFS do arroz pode ser estimada com segurança nos períodos reprodutivo e de enchimento de grãos ($R^2 = 0,69$ e $0,74$, respectivamente) usando os IV calculados. Contudo, a variação da CNF na planta foi moderadamente explicada pelos IV ($R^2 = 0,37-0,45$) apenas no período estágio reprodutivo, com os menores percentuais de viés ($PBIAS \leq 6,6$ para os melhores índices; Tabela 3.5). Isso mostra que, com exceção ao período reprodutivo, essa abordagem não seria eficiente na estimação do INN. Tem sido um grande desafio estimar a concentração de N de culturas usando tecnologias de sensoriamento remoto, especialmente no período vegetativo (Yu et al., 2013, Cao et al., 2013).

A segunda abordagem refere-se ao uso de tecnologias de detecção de dossel para estimar a biomassa e o acúmulo de N na planta. Com a biomassa estimada, pode-se calcular a absorção crítica de N usando a curva crítica de N absorvida (Lemaire et al., 2008). Nessa abordagem, o INN pode ser calculado como uma razão da captação real da planta (específica para a cultivar, conhecida *a priori* para o período específico de crescimento) sobre a captação crítica estimada. Os resultados deste estudo (Tabelas 3.4 e 3.5) indicaram que o ANF na cultura do arroz pode ser estimado razoavelmente bem com os IV calculados, exceto no período vegetativo. Isso indica que essa abordagem pode funcionar bem para estimar indiretamente o INN em estádios-chave de crescimento (alongamento do caule, iniciação da panícula e enchimento de grãos). Com as informações da concentração real e concentração

crítica de N estimada, pode-se calcular a quantidade de excesso ou deficiência de N, que pode ser uma informação valiosa para determinar a quantidade de cobertura nitrogenada. A terceira abordagem é estimar diretamente o INN usando tecnologia de sensoriamento, como tem sido feito com o medidor de clorofila (Ziadi et al., 2008; Cao et al., 2012a) e sensor ativo de dossel (Cao et al., 2012b).

A performance dos IV na estimativa do INN foi satisfatória, tanto nos estádios específicos de crescimento ($d = 0,37-0,77$), como durante todo o ciclo ($d = 0,51-0,62$). NDVI e RVI foram os IV com melhor performance para estimação do INN no vegetativo inicial. No final do período vegetativo M_RESAVI foi o que apresentou a melhor performance na estimação do INN. Dentre os IV calculados neste estudo, dois merecem destaque: M_RESAVI e NDRE, esses índices sobressaíram-se entre os 22 testados (Tabelas 3.4 e 3.5) para estimação do INN. Nos períodos reprodutivo, enchimento de grãos e durante todo o ciclo, esses índices explicaram em média 7, 13 e 13% mais da variação do INN com modelos ajustados 8, 15 e 8% mais agregados aos dados independentes de validação, em comparação aos índices NDVI e RVI, respectivamente. Yao et al. (2014) também verificaram que os índices vegetativos NDVI e RVI são ineficientes para estimar o INN no arroz. Nossos resultados corroboram os achados de Cao et al. (2013) para a cultura do arroz, em que o INN foi satisfatoriamente estimado com o M_RESAVI e os resultados da validação também foram animadores ($R^2 = 0,78$).

Os resultados deste estudo indicaram que o índice INN poderia ser estimado pelos IV de maneira bastante satisfatória, com R^2 sendo de 0,52 para os melhores índices de vegetação nos ensaios de calibração considerando o ciclo todo, atingindo 0,80 no período reprodutivo. Os resultados da validação com os dados de ensaios independentes também foram encorajadores ($d = 0,62$) para estimação do INN no ciclo todo. Isso demonstra a importância do uso de sensores ativos com mais de duas bandas fixas, especialmente com a adição da banda de borda VD, para estimar com maior performance o estado de N da cultura. No Brasil, para áreas onde o arroz irrigado apresenta potencial de alto rendimento, índices como o M_RESAVI e o NDRE podem ser mais adequados para gerenciar aplicações de precisão, otimizando o custo de análises químicas para determinação do estado de N, bem como das adubações em cobertura, que por vezes durante o ciclo podem vir a ser reduzidas. Mais estudos são necessários para avaliar a performance desses índices na estimação do INN sob diferentes condições de cultivo e manejo em áreas comerciais.

3.5 CONCLUSÕES

- 1 - Os IV calculados subestimam consideravelmente a BFS ($-74,1 < \text{PBIAS} < -63,8$ e $-23,4 < \text{PBIAS} < -22,4$) no início e final do período vegetativo, respectivamente.
- 2 - Além da BFS, a CNF e o ANF não são estimados com eficiência no estágio vegetativo ($\text{PBIAS} > 10\%$).
- 3 - Maiores variações desses indicadores podem ser explicadas pelos IV nos estádios subsequentes ao período vegetativo. Os IVs calculados selecionados mostraram-se altamente promissores para a explicação da variação da BFS e IAF nos períodos reprodutivo e de enchimento de grãos.
- 4 - Performances modestas dos IV foram obtidas para estimação da CNF no estágio reprodutivo. Para a estimação do ANF nos estádios reprodutivo, enchimento de grãos ou considerando o ciclo todo, os índices NDVI e RVI foram menos eficientes que os demais índices calculados.
- 5 - O INN foi o que melhor pôde ser estimado pelos modelos selecionados nas fases específicas de crescimento da cultura, bem como no ciclo todo, sendo recomendado o uso dos índices M_RESAVI e NDRE para a determinação desse indicador do estado de N.

3.6 REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. D. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.

BARNES, E. et al. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data. In: ROBERT, P. C.; RUST, R. H.; LARSON, W. E. (Eds.). . **Proceeding the 5th International Conference on Precision Agriculture**. Bloomington: Precision Agriculture Center, University of Minnesota, ASA-CSSA-SSSA, 2000. p. 16–19.

BIGIARINI, M. Z. **Goodness-of-Fit Functions for Comparison of Simulated and Observed Hydrological Time Series** Temuco, 2020. Disponível em: <<https://github.com/hzambran/hydroGOF>>

CAO, Q.; CUI, Z.; CHEN, X.; KHOSLA, R.; DAO, T. H.; MIAO, Y. Quantifying spatial variability of indigenous nitrogen supply for precision nitrogen management in small scale farming. **Precision Agriculture**, Basel, v. 13, n. 1, p. 45–61, 2012a.

CAO, Q.; MIAO, Y.; GAO, X.; LIU, B.; FENG, G.; YUE, S. Estimating the nitrogen nutrition index of winter wheat using an active canopy sensor in the North China Plain.

2012 First International Conference on Agro- Geoinformatics (Agro-Geoinformatics), Shanghai, p. 1–5, 2012b.

CAO, Q.; MIAO, Y.; WANG, H.; HUANG, S.; CHENG, S.; KHOSLA, R.; JIANG, R. Non-destructive estimation of rice plant nitrogen status with Crop Circle multispectral active canopy sensor. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 154, p. 133–144, 2013.

CAO, Q. et al. Active canopy sensing of winter wheat nitrogen status: An evaluation of two sensor systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 112, p. 54–67, 2015.

CHEN, J. M. Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal applications. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Ottawa, v. 22, n. 3, p. 229–242, 1996.

GALVANI, F.; GAERTNER, E. Adequação da Metodologia Kjeldahl para determinação de Nitrogênio Total e Proteína Bruta. **Circular Técnica**, Corumbá, v. 4, p. 1–9, 2006.

GITELSON, A. A.; VIÑA, A.; CIGANDA, V.; RUNDQUIST, D. C.; ARKEBAUER, T. J. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 32, n. L08403, p. 1–4, 2005.

GITELSON, A. A. Remote estimation of crop fractional vegetation cover: The use of noise equivalent as an indicator of performance of vegetation indices. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 34, n. 17, p. 6054–6066, 2013.

GNYP, M. L. et al. Hyperspectral canopy sensing of paddy rice aboveground biomass at different growth stages. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 155, p. 42–55, 2014.

HE, Z. et al. Development of a critical nitrogen dilution curve of double cropping rice in south China. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 8, n. April, p. 1–14, 2017.

HOLLAND SCIENTIFIC. **Crop Circle ACS-430 User ' s Guide**. Disponível em: <www.hollandscientific.com>. Acesso em: 15 abr. 2018.

JASPER, J.; REUSCH, S.; LINK, A. Active sensing of the N status of wheat using optimized wavelength combination: impact of seed rate, variety and growth stage. In: VAN HENTEN, E. J.; GOENSE, D.; LOKHORST, C. (Eds.). **9th Precision Agriculture**. 1. ed. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2009. p. 23–30.

LEMAIRE, G.; JEUFFROY, M. H.; GASTAL, F. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage. Theory and practices for crop N management. **European Journal of Agronomy**, Montrouge, v. 28, n. 4, p. 614–624, 2008.

LI, F.; ZHANG, H.; JIA, L.; BARETH, G.; MIAO, Y.; CHEN, X. Estimating winter wheat biomass and nitrogen status using an active crop sensor. **Intelligent Automation and Soft Computing**, London, v. 16, n. 6, p. 1221–1230, 2010.

LI, F. et al. Remotely estimating aerial N status of phenologically differing winter wheat

cultivars grown in contrasting climatic and geographic zones in China and Germany. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 138, p. 21–32, 2012.

LORENZEN, B.; JENSEN, A. Reflectance of blue, green, red and near infrared radiation from wetland vegetation used in a model discriminating live and dead above ground biomass. **New Phytologist**, London, v. 108, n. 3, p. 345–355, 1988.

LU, J.; MIAO, Y.; SHI, W.; LI, J.; YUAN, F. Evaluating different approaches to non-destructive nitrogen status diagnosis of rice using portable RapidSCAN active canopy sensor. **Scientific Reports**, London, v. 7, n. 1, p. 1–10, 2017.

MARTIN, K.; RAUN, W.; SOLIE, J. By-plant prediction of corn grain yield using optical sensor readings and measured plant height. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 35, n. 9, p. 1429–1439, 2012.

PADILLA, F. M.; GALLARDO, M.; PEÑA-FLEITAS, M. T.; SOUZA, R. De; THOMPSON, R. B. Proximal optical sensors for nitrogen management of vegetable crops: A review. **Sensors (Switzerland)**, Basel, v. 18, n. 7, p. 1–23, 2018.

QI, J.; CHEHBOUNI, A.; HUETE, A. R.; KERR, Y. H.; SOROOSHIAN, S. A modified soil adjusted vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 48, n. 2, p. 119–126, 1994.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**, Vienna, Austria, 2019. Disponível em: <<http://www.r-project.org>>

RONDEAUX, G.; STEVEN, M.; BARET, F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 55, n. 2, p. 95–107, 1996.

ROUJEAN, J.-L.; BREON, F.-M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 51, n. 3, p. 375–384, 1995.

SANTOS, M. P. Dos; ZANON, A. J.; CUADRA, S. V.; STEINMETZ, S.; CASTRO, J. R. De; HEINEMANN, A. B. Yield and morphophysiological indices of irrigated rice genotypes in contrasting ecosystems. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 47, n. 3, p. 253–264, 2017.

SHEEHY, J. E.; DIONORA, M. J. A.; MITCHELL, P. L.; PENG, S.; CASSMAN, K. G.; LEMAIRE, G.; WILLIAMS, R. L. Critical nitrogen concentrations: Implications for high-yielding rice (*Oryza sativa* L.) cultivars in the tropics. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 59, n. 1, p. 31–41, 1998.

SHIRATSUCHI, L.; FERGUSON, R.; SHANAHAN, J.; ADAMCHUK, V.; RUNDQUIST, D.; MARX, D.; SLATER, G. Water and nitrogen effects on active canopy sensor vegetation indices. **Agronomy Journal**, Madison, v. 103, n. 6, p. 1815–1826, 2011.

SRIPADA, R. P.; HEINIGER, R. W.; WHITE, J. G.; MEIJER, A. D. Aerial color infrared photography for determining early in-season nitrogen requirements in corn. **Agronomy**

Journal, Madison, v. 98, n. 4, p. 968–977, 2006.

YAO, Y. et al. Active canopy sensor-based precision N management strategy for rice. **Agronomy for Sustainable Development**, Les Ulis, v. 32, n. 4, p. 925–933, 2012.

YAO, Y. et al. In-season estimation of rice nitrogen status with an active crop canopy sensor. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, New York, v. 7, n. 11, p. 4403–4413, 2014.

YU, K.; LI, F.; GNYP, M. L.; MIAO, Y.; BARETH, G.; CHEN, X. Remotely detecting canopy nitrogen concentration and uptake of paddy rice in the Northeast China Plain. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 78, p. 102–115, 2013.

ZHANG, K. et al. Predicting rice grain yield based on dynamic changes in vegetation indexes during early to mid-growth stages. **Remote Sensing**, Basel, v. 11, n. 4, p. 1–24, 2019.

ZIADI, N. et al. Chlorophyll measurements and nitrogen nutrition index for the evaluation of corn nitrogen status. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, n. 5, p. 1264–1273, 2008.

CAPÍTULO 3

FENOLOGIA, TROCAS GASOSAS, ACÚMULO DE BIOMASSA E PRODUTIVIDADE DO ARROZ IRRIGADO SOB DIFERENTES MANEJOS DA LÂMINA D'ÁGUA⁹

Marcos Paulo dos Santos¹⁰, Alexandre Bryan Heinemann¹¹

⁹ Capítulo elaborado conforme as normas do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (*PPGA - UFG*).

¹⁰ Universidade Federal de Goiás, Departamento de Fitotecnia, Goiânia, GO, Brasil. E-mail: marcospaulo_agronomo@hotmail.com;

¹¹ Embrapa Arroz e Feijão, Departamento de Pesquisa, Santo Antônio de Goiás, GO, Brasil. E-mail: alexandre.heinemann@embrapa.br.

4 FENOLOGIA, TROCAS GASOSAS, ACÚMULO DE BIOMASSA E PRODUTIVIDADE DO ARROZ IRRIGADO SOB DIFERENTES MANEJOS DA LÂMINA D'ÁGUA

Resumo – No Brasil a produção de arroz está concentrada na região Sul sob o sistema irrigado, predominantemente conduzido com inundação contínua durante o ciclo todo da cultura. Por motivos de segurança alimentar há a necessidade de se distribuir a produção de arroz no país. Todavia, essa estratégia de manejo de irrigação, na região tropical, contribui para a baixa eficiência no uso da água devido às condições climáticas desfavoráveis. Soma-se a isto as projeções de redução da disponibilidade hídrica devido as mudanças climáticas. Objetivou-se com este estudo analisar o efeito de manejos alternativos de irrigação no desenvolvimento fenológico, nas trocas gasosas, no acúmulo de biomassa e na produtividade do arroz irrigado tropical. Dois experimentos foram conduzidos em Goianira-GO de 2016 a 2018 para avaliar o efeito de manejos alternativos da irrigação: inundação intermitente com aeração (IIA), inundação intermitente o ciclo todo (IIC) e inundação intermitente até o florescimento (IIF) em relação ao manejo de inundação contínua durante todo o ciclo (ICC). Nestes experimentos, quatro cultivares de arroz foram estudadas: BRS A702 CL, BRS Catiana, BRS Pampeira e IRGA 424. Os experimentos foram instalados na estrutura de blocos completos casualizados, no arranjo fatorial no esquema de parcelas subdivididas, com cinco repetições. Os dados de fenologia, trocas gasosas, dinâmica do crescimento e de produtividade foram submetidos à análise conjunta para produção de inferências gerais no cultivo. Os manejos da irrigação não afetaram o desenvolvimento vegetativo da cultura. A inundação intermitente com aeração prolongou o tempo para florescimento da cultivar BRS A702 CL. Constatou-se que é possível diminuir a oferta de água com a manutenção de solo saturado ou do uso da inundação intermitente até o florescimento, ou mesmo, durante todo o ciclo, sem comprometimentos à transpiração. Não foi observada relação direta entre o acúmulo de biomassa em virtude das diferenças na taxa fotossintética entre cultivares e manejos da irrigação. O acúmulo de biomassa seca foi reduzido pela ocorrência de menores acúmulos de radiação e graus-dia nas fases reprodutivas e de enchimento de grãos. Estratégias que racionem o uso da água como: inundação intermitente com aeração (IIA) e inundação intermitente o ciclo todo (IIC) podem ser adotadas no cultivo do arroz irrigado tropical sem prejuízos à produtividade de grãos e ao índice de colheita.

Palavras-chave: Inundação intermitente; Arroz tropical, Agricultura inteligente.

PHENOLOGY, GAS EXCHANGES, BIOMASS ACCUMULATION AND IRRIGATED RICE PRODUCTIVITY UNDER WATER DEPTH DIFFERENT MANAGEMENT

Abstract – In Brazil, rice production is concentrated in the South under the irrigated system, predominantly conducted with continuous flooding throughout the entire crop cycle. For

reasons of food security, there is a need to distribute rice production in the country. However, this irrigation management strategy in the tropical region contributes to low efficiency in water use due to unfavorable climatic conditions. Added to this there are projections for reducing water availability due to climate change. The objective of this study was to analyze the effect of alternative irrigation managements on phenological development, gas exchange, biomass accumulation and productivity of tropical irrigated rice. Two experiments were conducted in Goianira-GO from 2016 to 2018 to evaluate the effect of alternative irrigation managements: intermittent flooding with aeration (IIA), intermittent flooding throughout the cycle (IIC) and intermittent flooding until flowering (IIF) in relation to the continuous flood management throughout the cycle (ICC). In these experiments, four rice cultivars were studied: BRS A702 CL, BRS Catiana, BRS Pampeira and IRGA 424. The experiments were installed in the complete randomized block structure, in the factorial arrangement in the split plot scheme, with five replications. Phenology data, gas exchange, growth and productivity dynamics were submitted to joint analysis to produce general inferences in cultivation. Irrigation management did not affect the vegetative development of the crop. The intermittent flooding with aeration prolonged the flowering time for cultivar BRS A702 CL. It was found that it is possible to decrease the water supply with the maintenance of saturated soil or the use of intermittent flooding until flowering, or even, throughout the cycle, without compromising transpiration. There was no direct relationship between the accumulation of biomass due to differences in the photosynthetic rate between cultivars and irrigation management. The accumulation of dry biomass was reduced by the occurrence of smaller accumulations of radiation and degree-days in the reproductive and grain filling phases. Strategies that rationalize water use such as: intermittent flooding with aeration (IIA) and intermittent flooding throughout the cycle (IIC) can be adopted in the cultivation of tropical irrigated rice without prejudice to grain productivity and the harvest index.

Keywords: Intermittent flooding; Tropical rice; Smart agriculture.

4.1 INTRODUÇÃO

No Brasil há dois sistemas de produção de arroz: irrigado e de terras altas (sequeiro). O sistema irrigado é responsável por aproximadamente 91% da produção brasileira (Conab, 2020a). O cultivo de arroz irrigado ocorre nos ecossistemas subtropical e tropical. O ecossistema subtropical, localizado na região Sul (Rio Grande do Sul e Santa Catarina), é responsável por 80% da produção brasileira (Conab, 2020b). Enquanto o ecossistema tropical, responsável por apenas 6,6% da safra nacional, está localizado nas regiões Norte (Tocantins, Roraima), Nordeste (Maranhão, Ceará, Piauí, Sergipe e Alagoas) e Centro-Oeste (Goiás e Mato Grosso do Sul). Por motivos relacionados à segurança alimentar e logística esses estados não podem depender do arroz do sul do Brasil. Além disso, a produção de arroz concentrada em uma única região coloca em risco a segurança alimentar nacional, principalmente devido à intensidade de eventos climáticos como “El Niño” e “La Niña” (Santos et al., 2017).

Para evitar possíveis quebras de safras com eventos extremos na região Sul há a necessidade de distribuir a produção de arroz no Brasil, especialmente sob o sistema irrigado que permite a obtenção de maiores produtividades que o cultivo de sequeiro. O uso da irrigação possibilita à cultura produtividades média de 7943 kg ha⁻¹, valor que contrasta bastante com a média de produtividade no cultivo de terras altas, que é de apenas 2441 kg ha⁻¹ (Conab, 2020a).

O arroz irrigado no estado de Goiás apresenta produtividades acima de 5000 kg ha⁻¹ sob o manejo de água convencional (inundação contínua). Na safra 2018/2019, o estado contava com 22.600 ha⁻¹ de arroz e uma produção de 112.100 toneladas (Conab, 2020b). Entretanto, no manejo convencional do arroz irrigado, por meio de lâmina contínua durante todo o ciclo da cultura, há uma demanda maior de recurso hídrico, podendo variar de 8.000 a 10.000 m³ ha⁻¹ de água, dependendo do tipo de solo, condições climáticas e ciclo da cultivar (Pimenta, 2018). Por ser uma das culturas mais exigentes em recurso hídrico (Gomes, 2004), economias no suprimento de água, mesmo que em proporções pequenas contribuiriam para otimização do sistema de produção. Além disso, grande parte da água aplicada para manutenção da lâmina contínua é perdida por fluxo lateral, evaporação da

água na superfície do solo e percolação (Stone, 2005). Assim, a busca por manejos técnicos, econômicos e ambientalmente sustentáveis é um dos caminhos para se aumentar a eficiência no uso da água no cultivo do arroz irrigado (Soares et al. 2015).

Existem relatos de estudos que avaliaram possibilidades de cultivo de arroz irrigado com economia de água sem alterar a produtividade (Pinto et al., 2016). Dentre esses relatos, destaca-se os autores Vories et al. (2013) e Kato & Katsura (2014), que avaliaram a utilização da irrigação por aspersão. Segundo os autores, houve uma redução de 50% no uso da água, o que proporcionou uma melhor utilização da água da chuva, comparado com a inundação contínua. Entretanto, o custo de aquisição, manutenção e manejo desse sistema é alto. Assim, é necessário buscar manejos de irrigação alternativos, sendo a irrigação intermitente uma dessas opções. Esse manejo consiste em alternar ciclos de irrigação e supressão de água, sem drenar a água após a interrupção do fornecimento, deixando assim, o ciclo hidrológico ocorrer de forma natural. É necessário se atentar quanto ao período de tempo da supressão, pois para retornar o umedecimento do solo requer uma maior quantidade de água para que o mesmo fique saturado. Um exemplo desse manejo é o modelo utilizado por agricultores chineses, que controlam a irrigação durante o estágio vegetativo, evitando o perfilhamento excessivo, e como consequência, aumentando a área foliar e realizando a intermitência no período de diferenciação floral (Borin, 2014).

Assim como a disponibilidade hídrica, a adubação nitrogenada é um fator limitante para a produção de arroz, pois está diretamente ligada a produção de folhas, interceptação da radiação solar e a taxa fotossintética (Sun, 2016), influenciando a produtividade dos grãos. Contudo, para que a adubação nitrogenada seja efetiva, é necessário atenção com alguns fatores que influenciam a dinâmica do N no solo, visto que o aproveitamento do nutriente normalmente é inferior a 40% (Malavolta, 2006; Zhang et al., 2013). A perda de parte do N aplicado no solo ocorre por lixiviação ou desnitrificação (Cardoso, 2011; Santos & Rabelo, 2008). Neste sentido, a irrigação intermitente pode favorecer a absorção de nitrogênio, pois, esta prática promove aumento da concentração de amônio (NH_4^+) na superfície uma vez que no solo alagado, a proximidade entre a camada superficial e a rizosfera (ambas oxidadas) e a região anaeróbia (Sousa et al., 2010) facilita as perdas pelo processo de nitrificação-desnitrificação (Liu et al., 2010). Também, os processos de umedecimento e secagem oriundos da lâmina intermitente favorecem a ação de bactérias aeróbicas e anaeróbicas que influenciam no processo de decomposição e mineralização do nitrogênio, liberando de forma mais rápida o nutriente (Pocojeski, 2011).

Deste modo, o objetivo deste estudo foi analisar o efeito de manejos alternativos de irrigação no desenvolvimento fenológico, nas trocas gasosas, no acúmulo de biomassa e na produtividade do arroz irrigado tropical.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Descrição dos experimentos

Dois experimentos de campo foram conduzidos na Estação Experimental do Centro Nacional de Pesquisa em Arroz e Feijão (CNPAPF), em Goiás, Goianira-GO (latitude: -16,41, longitude: -49,38, altitude: 729 m), nas safras 2016/2017 e 2017/2018. De acordo com Köppen, o clima da região é classificado como tropical de savana (Aw) (Alvares et al. 2014) e o solo da área experimental como Gleissolo Háplico distrófico de várzea. Nesse estudo, esses experimentos foram denominados como GO_16/17 e GO_17/18. As variáveis climáticas, temperatura, máxima e mínima, radiação global e precipitação, durante os experimentos estão ilustradas na Figura 4.1.

Ambos os experimentos foram instalados por meio de semeadura em linha sob o delineamento de blocos completos casualizados (DBC), com cinco repetições. No experimento GO_16/17 a semeadura ocorreu dia 10/10/2016 e no GO_17/18 dia 27/10/2017. Os tratamentos foram dispostos sob a estrutura fatorial 4 x 4 no esquema de parcelas subdivididas. Nas parcelas foram distribuídos os manejos de irrigação: 1 - Inundação Contínua (ICC), com lâmina de água contínua durante todo o ciclo; 2 - Inundação Intermitente com Aeração (IIA), solo mantido acima da capacidade de campo, mas sem lâmina de água; 3 - Inundação Intermitente durante todo o ciclo (IIC), reinundando quando a lâmina secava e; 4 - Inundação Intermitente até o Florescimento (IIF), a seguir de lâmina contínua após o florescimento. Já nas subparcelas foram dispostas as cultivares de arroz irrigado (BRS A702 CL, BRS Catiana, BRS Pampeira e IRGA 424). Dentre essas cultivares apenas BRS A702 CL é considerada de ciclo curto, demandando ≈ 90 DAE para maturação (Fragoso et al., 2017), enquanto as demais apresentam ciclo médio, correspondente a ≈ 120 DAE para maturação (Pimenta, 2018).

As parcelas experimentais (manejos de irrigação) apresentaram dimensões de 187,68 m² cada e foram isoladas através de taipas elevadas e compactadas, impedindo a influência do ambiente externo e dos tratamentos paralelos. As subparcelas, por sua vez, foram constituídas de 12 linhas de sete metros de comprimento, espaçadas entre si a 0,17 m,

totalizando uma área de 14,28 m² cada. Na semeadura utilizou-se 80 sementes por metro (ou 100 kg ha⁻¹). Para a adubação de semeadura utilizou-se 20, 35 e 35 kg ha⁻¹ de nitrogênio (N), P₂O₅ (P) e K₂O (K), respectivamente, em ambos os experimentos. As adubações nitrogenadas de cobertura foram divididas em duas aplicações, sendo 40% no início do perfilhamento (V3, aplicando-se 30 kg de N ha⁻¹) e 60% no estágio V6 (seis folhas verdadeiras) aplicando-se 45 kg de N ha⁻¹. O controle de insetos-praga, doenças e plantas daninhas foi realizado de acordo com as necessidades da cultura em cada ano e experimento. Maiores detalhes desses experimentos estão descritos em Pimenta (2018).

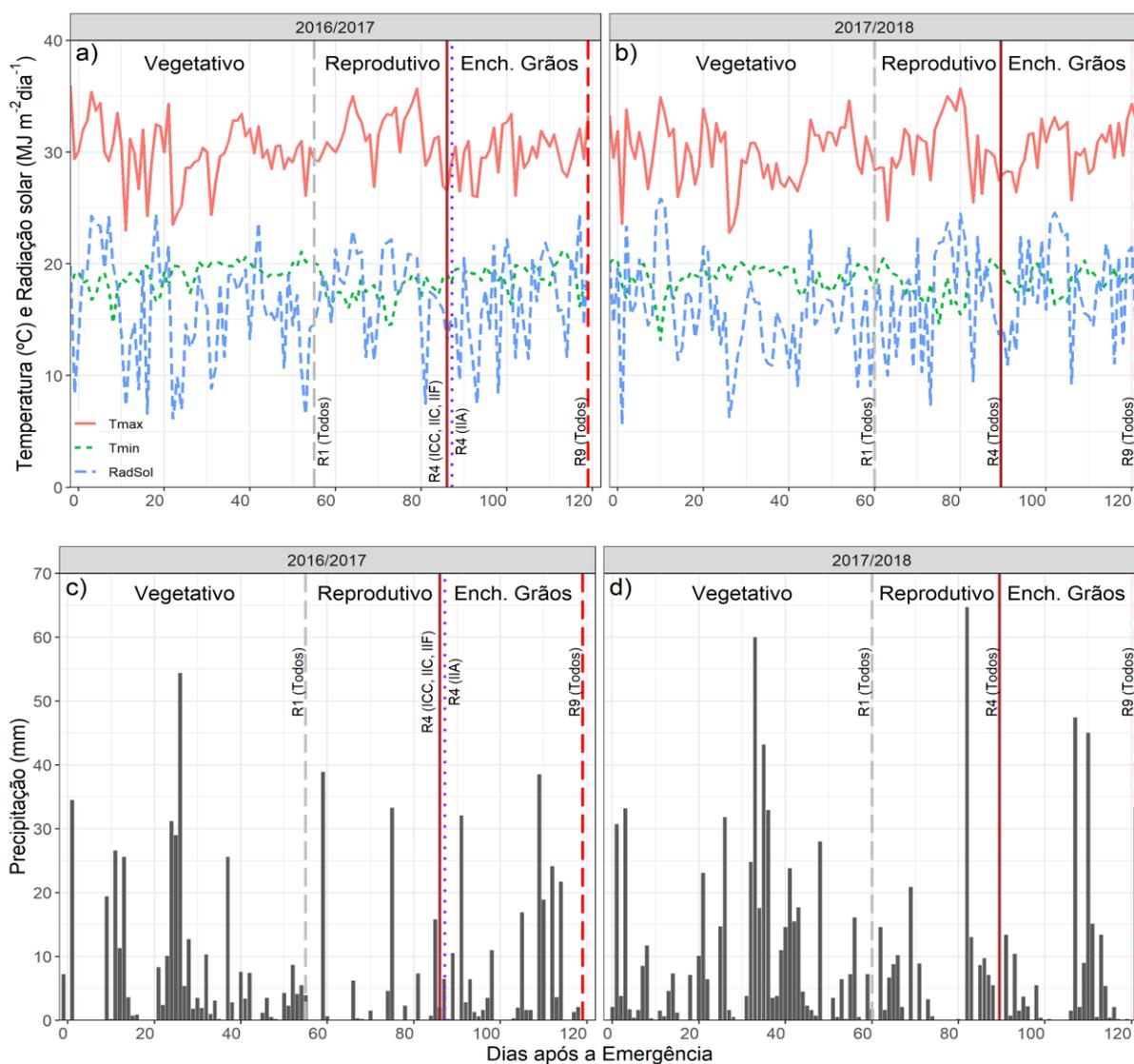


Figura 4.1. Dinâmica das variáveis climáticas: temperatura máxima e mínima do ar, radiação global (a e b) precipitação (c e d), nas safras 2016/2017 e 2017/2018, respectivamente. Linhas tracejadas vertical cinza representam a média dos tratamentos de manejo de água para a iniciação da panícula. Linhas verticais sólidas marrom e pontilhadas púrpura vertical representam o florescimento para a média dos manejos de água: Inundação Contínua durante todo o ciclo (ICC); Inundação Intermitente com Aeração (IIA); Inundação Intermitente durante todo o ciclo (IIC) e; Inundação Intermitente até o Florescimento (IIF), respectivamente. Linhas tracejadas vertical vermelha representam a maturação de colheita para a médias dos manejos de água.

4.2.2 Quantificação dos graus-dia acumulados em cada fase de crescimento

A partir dos dados de temperatura máxima, média e mínima coletados nos ensaios GO_16/17 e GO_17/18 quantificou-se os graus dias acumulados (GDA, °C) conforme metodologia proposta por Bouman et al. (2001), descritas nas equações (4.1; 4.2; 4.3; 4.4 e 4.5):

$$Td = \frac{Tm+TM}{2} + \frac{TM+Tm}{2} * \cos [0.2618(h - 14)] \quad (4.1)$$

Em que: h representa o número de horas de um dia, variando de 1 a 24; Tm representa a temperatura mínima e TM a temperatura máxima:

$$HUH = 0 \text{ se } (Td \leq Tb \text{ ou } Td \geq TH) \quad (4.2)$$

$$HUH = \frac{Td-Tb}{24} \text{ se } (Tb < Td < To) \quad (4.3)$$

$$HUH = \frac{1}{24} = \left[To - (Td - To) \frac{To-Tb}{TH-To} - Tb \right] \text{ se } (To < Td < TH) \quad (4.4)$$

Td é a temperatura horária, em °C e HUH é a unidade de calor efetivo horária, em °C d h⁻¹. As temperaturas cardinais: temperatura base (Tb, °C), abaixo da qual não há mais desenvolvimento da cultura; temperatura ótima (To, °C) para o desenvolvimento da cultura e temperatura máxima (TH, °C), acima da qual não há mais desenvolvimento da cultura foram 10, 29 e 37 °C, respectivamente, conforme Santos et al. (2017). Assumiu-se que os cultivares utilizados nesse estudo apresentam os mesmos valores de Tb, To e TH. As unidades de calor efetivo diário (HU) foram determinadas agregando os HUH, enquanto os GDA foram obtidos pelo somatório de HUH.

$$GDA = \sum_{h=1}^{24} HUH \quad (4.5)$$

4.2.3 Leituras fenológicas

Para determinação das fases fenológicas, dados sobre datas de emergência e estádios fenológicos foram observados: V3 (início do perfilhamento), V6, V9 e V12 (seis, nove e doze folhas expandidas no colmo principal, respectivamente), R1 (iniciação da panícula), R4 (floração), R8 (maturidade fisiológica) e R9 (maturação completa da panícula), de acordo com a escala proposta por Counce et al. (2000). O estádio R1 foi determinado usando a metodologia de Steinmetz et al. (2009). Estes dados foram observados em ambos os experimentos descritos neste estudo, em uma planta identificada por parcela

dos três blocos centrais do experimento. As leituras ocorreram em intervalos de três em três dias de modo a capturar a mudança de fenofase nas plantas no menor intervalo de tempo possível. Dessa forma, foi possível obter um conjunto de dados para as fases vegetativa (emergência à iniciação da panícula [R1]), reprodutiva (R1 ao florescimento [R4]) e enchimento de grãos (R4 à maturação de colheita [R9]).

4.2.4 Dinâmica da biomassa seca acumulada

Durante o período experimental foram coletadas semanalmente, amostras destrutivas de plantas, em 0,5 metro de linha de semeadura nas unidades experimentais. Essas amostras foram separadas em colmos, folhas e panículas, sendo em seguida submetidas à secagem em estufa a 75°C por 48 h para obtenção da biomassa seca total (BST) e de seus componentes (folhas, colmos e panículas).

A dinâmica da BST e da biomassa seca de panículas (BSP) das cultivares, sob os diferentes manejos da lâmina d'água, foi estimada por meio do modelo logístico descrito na equação 4.6:

$$Y = a / (1 + (b * \exp^{(c * DAE)})) \quad (4.6)$$

em que: a, b e c são os valores dos parâmetros relativos à assíntota, inflexão e escala, respectivamente, e DAE os dias após a emergência.

Já, a dinâmica da biomassa seca de folhas (BSF) e da biomassa seca de colmos (BSC) das cultivares, sob os diferentes manejos da lâmina d'água, foi estimada por meio do modelo exponencial quadrático, em razão do comportamento biológico da cultura, descrito na equação 4.7:

$$Y = a * \exp^{(bDAE + cDAE^2)} \quad (4.7)$$

em que: a, b e c são os valores dos parâmetros relativos à base da função, coeficientes linear e quadrático, respectivamente, e DAE os dias após a emergência.

4.2.5 Sensor, coleta de dados e indicadores de trocas gasosas

Para determinação de trocas gasosas nos experimentos foi utilizado o equipamento Infrared Gas-Analyzer (IRGA; LCpro-SD Inc., Hoddesdon, Hertfordshire,

UK). Esse equipamento quantifica respostas rápidas e precisas às trocas gasosas para medição da fotossíntese. Leituras da taxa fotossintética ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), taxa de transpiração ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) da condutância estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e da concentração interna de CO_2 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) foram registradas nos ensaios GO_16/17 e GO_17/18 a partir de 20 dias da emergência, quando as plantas apresentavam área foliar suficiente para inserção na câmara de trocas gasosas.

A oferta de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) pelo equipamento foi fixada em $2000 \mu\text{mol cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, adotando-se o CO_2 e a temperatura como ambiente. As leituras foram efetuadas sempre em dias ensolarados, no período da manhã (entre 8 e 11 horas), para minimizar o efeito das variáveis climáticas no período de leituras. Essas leituras, em ambos os experimentos foram efetuadas em períodos espaçados de 7 a 14 dias, escolhendo-se uma planta ao acaso, em cada parcela experimental, da qual uma folha completamente expandida do terço médio, livre de lesões e sem sintomas visuais de deficiência nutricional foi utilizada para leitura.

A partir da relação entre taxa fotossintética e a concentração interna de carbono determinou-se a eficiência instantânea de carboxilação ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} / \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Também determinou-se a eficiência instantânea no uso da água pela relação entre taxa fotossintética e transpiração ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} / \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). A dinâmica das trocas gasosas das cultivares, sob os diferentes manejos da lâmina d'água, foi estimada por meio do modelo não linear de potência, descrito na equação 4.8:

$$Y = a * DAE^{(b)} \quad (4.8)$$

em que: a e b são os valores dos parâmetros relativos ao intercepto e à declividade da curva, respectivamente, e DAE os dias após a emergência.

4.2.6 Produtividade e índice de colheita

No estádio R9 foi amostrada uma área útil de 6 m^2 para determinação da produtividade de grãos (t ha^{-1}). A biomassa seca total amostrada em cada parcela foi quantificada e separada da biomassa seca de panículas para obtenção do índice de colheita, expresso pela razão: biomassa seca de panícula/biomassa seca total das plantas. A umidade dos grãos foi aferida e corrigida para 13% para estimativa da produtividade (Figura 4.2).

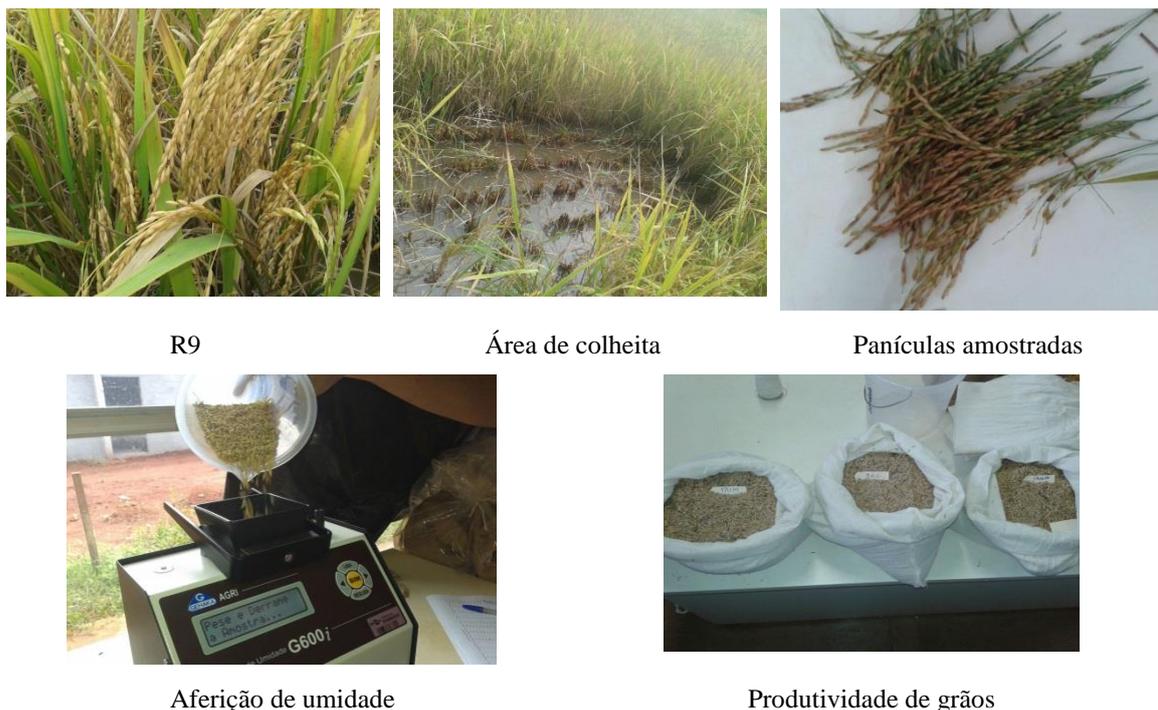


Figura 4.2. Área de colheita e determinação da umidade para correção da estimativa de produtividade.

4.2.7 Análises estatísticas

As diferenças fenológicas entre as cultivares e manejos da lâmina d'água foram obtidas em razão do número de dias decorridos após a emergência para observação de cada fenofase. Essas diferenças fenológicas foram comparadas por meio de análise conjunta, segundo as definições para ensaios em blocos completos ao acaso no esquema de parcelas subdivididas, balanceados e idênticos (Zimmermann, 2014). Nesta análise o efeito de blocos e safras foram considerados como fixos. O modelo estatístico adotado para esta análise foi:

$$Y_{ijkn} = \mu + \varphi n + \omega k(n) + \alpha i + (\alpha\varphi)_{ikn} + \delta_{ikn} + \beta j + (\alpha\beta)_{ij} + (\beta\varphi)_{jn} + (\alpha\beta\varphi)_{ijn} + \epsilon_{ijkn}. \quad (4.9)$$

em que:

Y_{ijkn} = resposta da fenologia observada na parcela i , subparcela j , do bloco k na safra n ;

μ = constante associada a cada observação $ijkn$;

φn = efeito de safras, com $n = 2016/2017$ e $2017/2018$;

$\omega k(n)$ = efeito cumulativo de bloco em cada safra, com $k = 1, 2, 3, 4$ e 5 , para cada safra;

αi = efeito de parcelas, com $i = ICC, IIA, IIC, IIF$;

$(\alpha\varphi)_{in}$ = efeito da interação parcelas \times safras;

δ_{ikn} = efeito da k -ésima repetição, dentro da parcela i , da safra n e da interação $k*n$ (resíduo a);

β_j = efeito de subparcelas, com j = BRS A702 CL, BRS Catiana, BRS Pampeira e IRGA 424;

$(\alpha\beta)_{ij}$ = efeito da interação parcelas \times subparcelas;

$(\beta\phi)_{jn}$ = efeito da interação subparcelas \times safras;

$(\alpha\beta\phi)_{ijn}$ = efeito da interação parcelas \times subparcelas \times safras;

ϵ_{ijkn} = erro aleatório referente à observação Y_{ijkn} (resíduo b).

Os ajustes da BST e da BSP pela função logística e das frações BSF e BSC pela função exponencial quadrática foram realizados utilizando-se o programa R, v.4.0.3 (R Core Team 2020), pacotes nlme e dlm, considerando separadamente os dados do ensaio GO_16/17 e GO_17/18 devido a heterocedasticidade na variância.

Para os ajustes das trocas gasosas utilizou-se o pacote nls, do programa R. A dinâmica das trocas gasosas foi comparada por meio do intervalo de confiança a 5% de probabilidade de erro das estimativas obtidas por modelos de potência ajustados de forma conjunta, como medidas repetidas no tempo (GO_16/17 e GO_17/18) por cultivares dentro de cada manejo da lâmina d'água e vice-versa, ao longo do ciclo.

Para a análise de produtividade e do índice de colheita foi realizada análise conjunta, considerando o efeito de blocos e safras primeiramente como fixos (*equação 4.9*) e também como aleatórios, utilizando o pacote lme4 no programa R. No intuito de eliminar o impacto de variáveis que pouco somam às inferências gerais do estudo, como bloco e safras, uma alternativa é a abordagem da análise de variância sobre a estrutura de modelos mistos. Em experimentos em parcelas subdivididas isso é ainda mais agravante, pois a impossibilidade de casualização do fator parcela (manejos da lâmina d'água) exige a contabilização de um erro específico para as parcelas (*erro a*), reduzindo ainda mais precisão na estimativa do ϵ_{ijkn} . A seleção do modelo (efeitos fixos ou aleatórios para blocos e safras) para seguimento com o teste comparativo de médias Tukey a 5% de probabilidade (para cultivares e manejos da lâmina d'água) deu-se através dos valores de AIC (Akaike Information Criterion), sendo escolhido o modelo de menor AIC. O AIC é uma medida relativa da qualidade de ajuste de um modelo estocástico estimado, ele oferece uma medida relativa das informações perdidas, quando um determinado modelo é utilizado para descrever a realidade (Emiliano, 2013). Por isso, quanto menor o AIC de um modelo, menor a quantidade de informações perdidas, ou seja, menor será a diferença entre valores

estimados e observados. Todos os procedimentos estatísticos, bem como a confecção dos gráficos foram realizados com o auxílio do software R, v.4.0.3 (R Core Team 2020).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todas as fases fenológicas foram influenciadas pelo efeito da safra (ano agrícola) (Tabela 4.1). Diferenças entre safras agrícolas nos DAE demandados para ocorrência de uma mesma fenofase (Figura 4.3) são comuns e esperadas, pois, ocorrem variações em fatores bióticos e abióticos que influenciam no erro experimental. Neste estudo verificamos que tanto o ambiente, como o genótipo (Figura 4.4) foram determinantes para as alterações na fenologia no estágio vegetativo (de V3 até R1), independentemente do manejo da lâmina d'água utilizado. As diferenças entre genótipos eram esperadas devido ao fato de possuírem ciclos distintos. Já os DAE para florescimento (R4) e para colheita (R9) foram influenciados pela interação safra × cultivar × manejo da lâmina d'água.

Tabela 4.1 - Resumo da análise de variância para a fenologia de cultivares de arroz irrigado cultivados sob distintos manejos da lâmina d'água em duas safras sucessivas (2016/2017 e 2017/2018). Goianira, 2020.

Fonte de Variação	Valores de quadrados médios													
	V3		V6		V9		V12		R1		R4		R9	
Safra (S)	896,4	*	605,0	*	1996,1	*	653,8	*	677,3	*	285,89	*	109,1	*
Manejo (M)	1,4	ns	5,8	ns	25,9	ns	70,8	ns	12,6	ns	10,07	ns	0,95	ns
Bloco/Safra	0,9	ns	6,3	ns	31,2	ns	25,3	ns	111,7	ns	3,25	ns	0,37	ns
S vs M	0,1	ns	5,6	ns	11,2	ns	13,1	ns	15,1	ns	2,11	ns	0,21	ns
Res. Parcela ¹	1,0362	-	3,9	-	28,0	-	29,8	-	28,6	-	3,05	-	0,30	-
Cultivar (C)	0,686	ns	13,26	*	197,35	*	71,46	ns	99,9	*	233,49	*	78,29	*
C vs M	0,381	ns	4,87	ns	57,61	ns	33,57	ns	19,80	ns	5,91	*	0,14	ns
C vs S	0,30	ns	3,61	ns	27,18	ns	46,61	ns	45,45	ns	8,86	*	5,55	*
C vs M vs S	0,55	ns	4,99	ns	51,78	ns	27,82	ns	24,18	ns	5,27	*	0,80	*
Res. Subparcela ²	1,29	-	4,10	-	56,61	-	26,12	-	19,74	-	2,38	-	0,23	-
Média Geral (dias)	11,28		22,71		41,83		64,5		57,63		87,86		120	
CV (%) ¹	9,02		8,69		12,65		8,46		9,28		1,98		0,46	
CV (%) ²	10,1		8,91		17,99		7,92		7,71		1,75		0,40	

^{1,2}CV = coeficiente de variação nas parcelas e subparcelas, respectivamente; (-) sem valores; (*) significativo a 5% de probabilidade e (ns) não significativo a 5% de probabilidade.

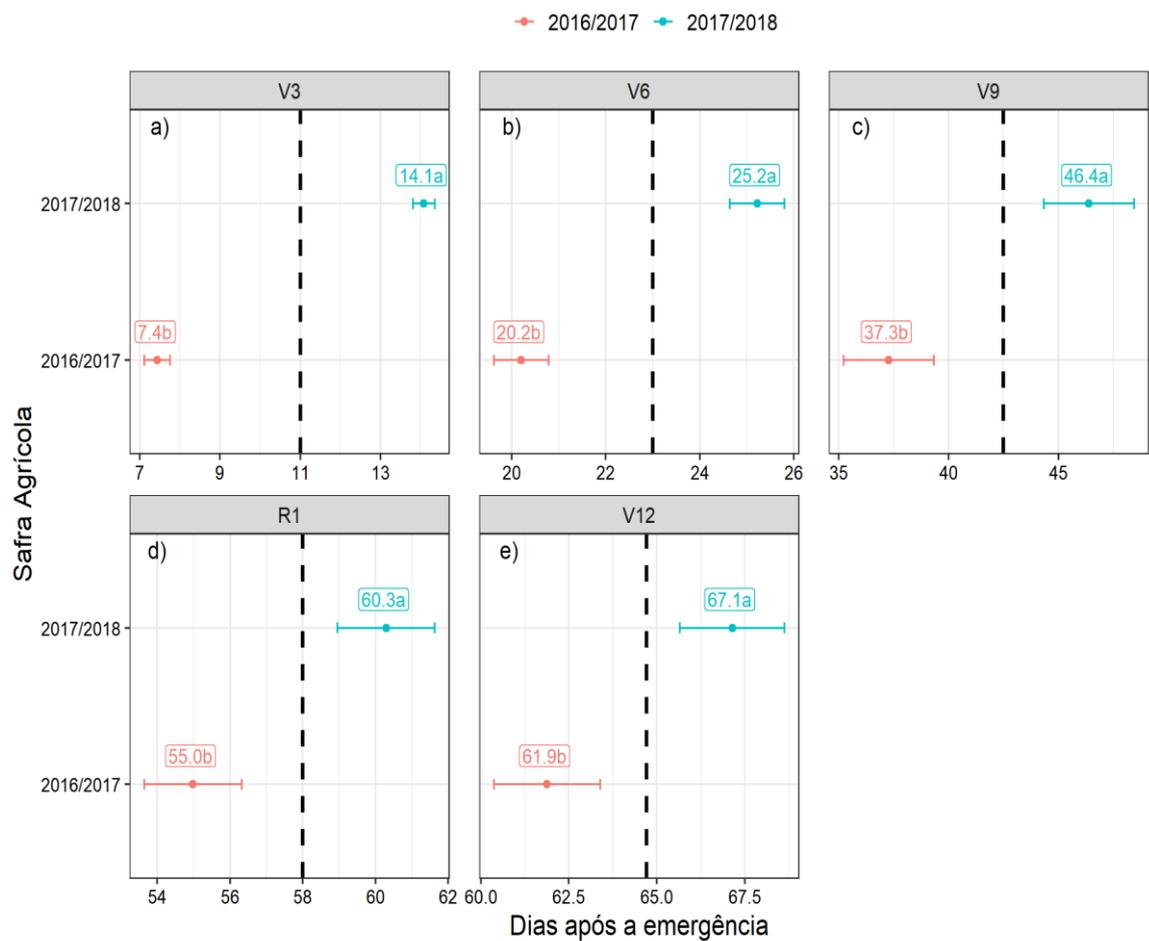


Figura 4.3. Alterações nos DAE demandados por quatro cultivares de arroz irrigado para alcançar as fenofases V3 (a), V6 (b), V9 (c), R1 (d) e V12 (e) por ocasião da safra de cultivo. Goianira, 2020.

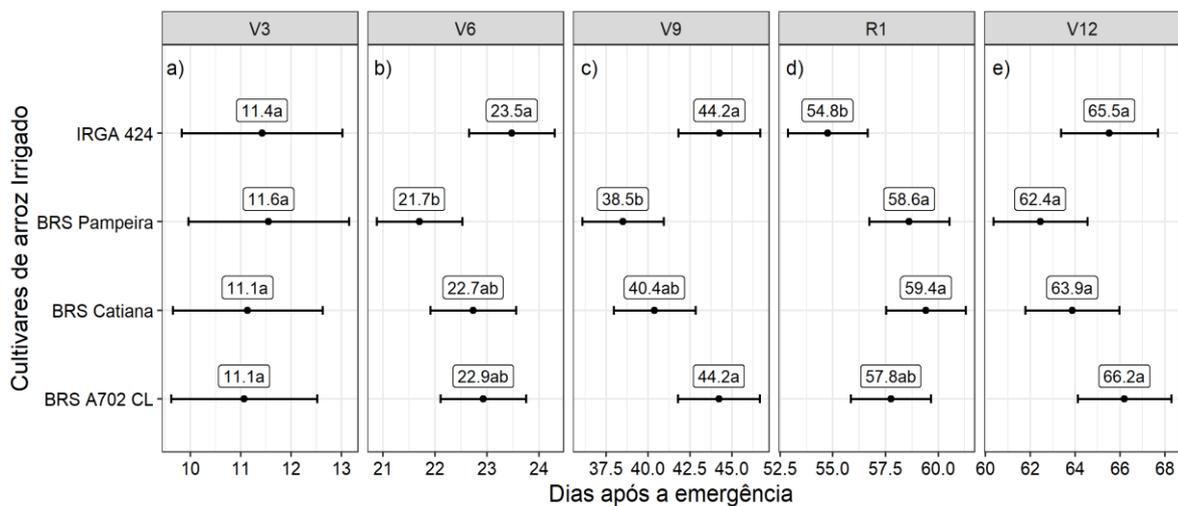


Figura 4.4. Alterações nos DAE demandados por cultivares de arroz irrigado para alcançar as fenofases V3 (a), V6 (b), V9 (c), R1 (d) e V12 (e). Goianira, 2020.

Embora os ensaios das safras 2016/2017 e 2017/2018 tenham sido conduzidos na mesma área experimental, as condições meteorológicas se alteraram de um ano para o outro (Figura 4.1) durante os estádios de crescimento da cultura. Isso fica evidente quando consideramos os valores acumulados das variáveis meteorológicas (Tabela 4.2).

Tabela 4.2. Valores acumulados de temperatura máxima (Tmax), mínima (Tmin), média (Tmed), graus dias (GD) precipitação e radiação global (RadSol) para os períodos de crescimento da cultura e período total.

Variáveis meteorológicas	Experimento	Períodos de crescimento			
		Vegetativo	Reprodutivo	Enc. Grãos	Total
		Valores acumulados			
Tmax (°C)	GO_16/17	2024,7	1036,3	988,1	4018,7
	GO_17/18	2044,5	883,2	1007,9	3964
Tmin (°C)	GO_16/17	1251,9	584,7	630,1	2446
	GO_17/18	1275,1	525,3	610,9	2429
Tmed (°C)	GO_16/17	1552,4	770,6	758,2	3057
	GO_17/18	1567,4	666,2	764,7	3020,2
GD (°C)	GO_16/17	863,2	418,23	449,5	1716,5
	GO_17/18	894,5	371,8	436,98	1716,3
Precipitação (mm)	GO_16/17	405	123,1	209,3	731,9
	GO_17/18	614,3	187,1	219,4	1022,5
RadSol (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	GO_16/17	1083,7	578,5	549,7	2197,6
	GO_17/18	1068,3	497,2	588,3	2168,9

No estágio vegetativo ocorreu maior acúmulo de precipitação, de temperaturas: máximas, médias e mínimas e de graus-dia (GD) na safra 2017/2018, contudo observou-se menor acúmulo de radiação solar que em 2016/2017. Essa dinâmica sugere que o maior acúmulo de unidades efetivas de calor (GD), em 2017/2018, na fase vegetativa se deu por ocasião do bloqueio promovido pela nebulosidade à chegada de radiação ao dossel das plantas, pois houve 209 mm a mais de precipitação neste ano, em comparação a 2016/2017.

A quantidade de radiação, ao qual as plantas estão expostas, pode afetar as características morfológicas, anatômicas e fisiológicas da folha, interferindo diretamente sobre o desenvolvimento, função e estrutura foliar, estrutura dos cloroplastos e componentes do processo fotossintético (Gastl Filho, 2018). Fisiologicamente, o retardo para mudança de fenofases no estágio vegetativo, devido ao menor acúmulo de radiação em 2017/2018 pode ter sido agravado pelo aumento da transpiração das plantas devido ao efeito de “ilha de calor” promovido pela nebulosidade, bem como pela redução na fotossíntese (Almeida & Dias,

2018). Com isso, o menor aporte de radiação no período em 2017/2018 pode ter influenciado negativamente a taxa de crescimento diária, resultando no aumento do número de dias para que às mudanças de fases fossem observadas (Figura 4.3).

Para as fenofases R4 e R9 houve efeito da interação GxAxM, ou seja, cultivares × safra × manejos da lâmina d'água (Figura 4.5). Observou-se que as cultivares BRS Catiana e BRS Pampeira não apresentaram oscilação na demanda de DAE entre safras para alcançar os estádios R4 e R9. Isso é interessante, pois são cultivares desenvolvidas para o ambiente tropical, indicando que o tempo para florescimento, bem como a duração do ciclo dessas cultivares não é afetado pelo manejo ou safra agrícola. Já as cultivares IRGA e BRS A702 CL apresentaram maiores oscilações em razão da safra e do manejo da lâmina d'água.

O conhecimento de padrões meteorológicos entre safras agrícolas permite identificar possíveis causas de alterações na duração de fenofases-chave do crescimento vegetal, como por exemplo, da emergência até o florescimento e no período de enchimento de grãos, compreendido do florescimento à maturação fisiológica. Essas mudanças configuram mecanismos de escape a estresses abióticos e podem impactar a produtividade, sobretudo em culturas anuais, como é o caso do arroz. Os principais problemas ocasionados por esses fatores climáticos são: alteração do ciclo em cultivares sensíveis ao fotoperíodo, aumento da esterilidade de espiguetas em virtude de temperaturas extremas no período da floração (Yoshida, 1981; Pinheiro, 2006) e queda na produtividade por ocasião de baixo acúmulo de radiação solar na fase de enchimento de grãos (Dingkuhn et al., 2015; Santos et al., 2017).

Na fase reprodutiva, safra 2016/2017, ocorreu aumento da amplitude térmica devido ao aumento na temperatura máxima (Tabela 4.2). Esse aumento da amplitude térmica reduz o gasto de energia com a respiração durante a noite (Pimenta, 2018), principalmente quando temperatura mínimas abaixo de 15 °C são observadas por dias consecutivos, o que não foi o caso deste estudo (Figura 4.1). O aumento da amplitude térmica afetou de forma distinta as cultivares estudadas, e não mostrou relação com os manejos da lâmina d'água (Figura 4.5). Observou-se que a cultivar IRGA 424 demandou menos tempo para florescer sob maior amplitude térmica na fase reprodutiva (2016/2017 vs 2017/2018), enquanto as demais cultivares mostraram-se indiferentes para este efeito. Isso sugere que cultivares desenvolvidas para o ambiente tropical, como é o caso das cultivares BRS A 702 CL, BRS Catiana e BRS Pampeira são mais resilientes às alterações da amplitude térmica na fase

reprodutiva, o que é desejável, pois, diminui os riscos de adiantamento do florescimento, que pode aumentar a formação de espiguetas vazias e, conseqüentemente, ocasionar queda na produtividade.

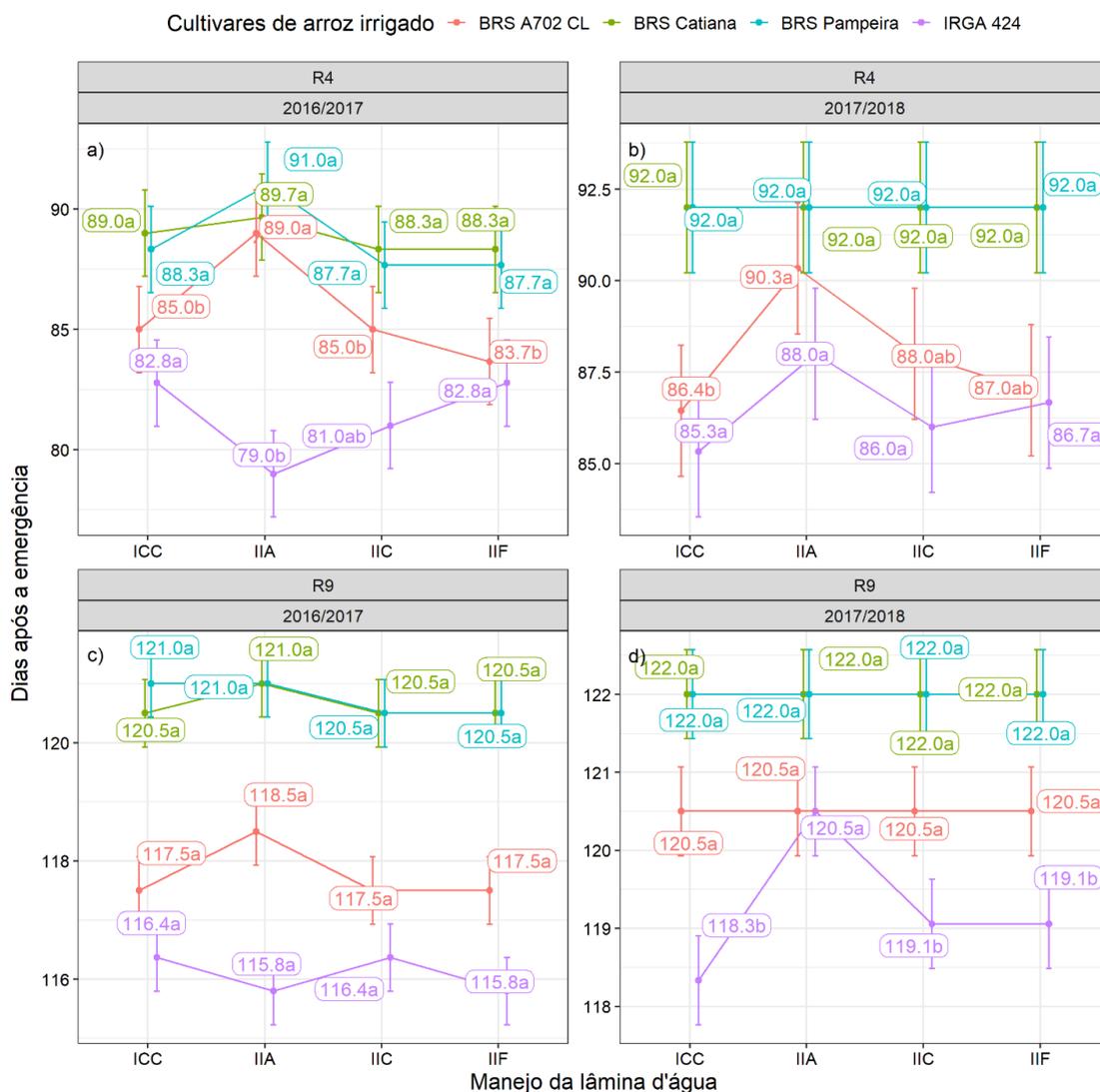


Figura 4.5. Alterações nos DAE demandados por cultivares de arroz irrigado para alcançar as fenofases R4 (a e b) e R9 (c e d) nas safras 2016/2017 e 2017/2018, respectivamente. Goianira, 2020.

A inundação intermitente com aeração (IIA) prolongou o tempo para florescimento da BRS A702 CL em 4 dias comparado ao manejo ICC na média das safras agrícolas (Figura 4.5a e b). Era esperado que a BRS A702 CL demandasse menos DAE para florescer que as demais cultivares, pois é considerada de ciclo curto (Fragoso et al., 2017), enquanto as demais apresentam ciclo médio (Pimenta, 2018). Contudo, isso não foi observado. Pelo contrário, notou-se um forte efeito da interação desta cultivar com a safra e os manejos da lâmina d'água fazendo com que ocorresse atraso no florescimento desta

cultivar. Esse impacto no atraso do florescimento para BRS A702 CL foi refletido no alongamento do período para encerramento do ciclo, que deveria ocorrer de 105 a 110 DAE, e ocorreu entre 117,5 e 120,5 DAE, equiparando o ciclo dessa cultivar com o das demais. De modo geral, as cultivares BRS A702 CL e IRGA 424 não diferiram no tempo para o florescimento quando cultivadas sob os manejos de água ICC, IIC E IIF. A cultivar IRGA 424 floresceu primeiro que BRS Catiana e a BRS Pampeira em todos os manejos estudados, independentemente da safra.

Quanto ao ciclo, observou-se que as cultivares BRS A702 CL e IRGA 424 alcançaram a maturidade de colheita (R9) mais cedo que as cultivares BRS Catiana e BRS Pampeira ($\approx 118,4$ DAE vs $\approx 121,4$ DAE, respectivamente) (Figura 4.5c e d), sendo a BRS A702 CL mais estável que a IRGA 424 quanto a duração do ciclo frente aos manejos da lâmina d'água em diferentes safras. Essa diferença quanto ao ciclo, embora significativa, é menos relevante que as diferenças observadas para o tempo demandado entre a emergência e a floração. Isso porque alcançando o florescimento mais cedo, há mais tempo hábil para o enchimento de grãos. Seguindo essa linha de raciocínio observou-se que as cultivares IRGA 424 e BRS A702 CL tiveram em média apenas 2,76 e 1,36 dias a mais na fase de enchimento de grãos que as cultivares BRS Catiana e BRS Pampeira. Basicamente, a antecipação do florescimento foi compensada com o encurtamento do ciclo, fazendo com que houvesse pequena variação no período de enchimento de grãos entre as cultivares, $32,33 \pm 1,38$ dias.

A condutância estomática e a eficiência instantânea no uso da água não foram afetadas pelos efeitos isolados de safra, manejo da lâmina d'água e cultivar, tampouco pela interação desses fatores. A condutância estomática é um dos fatores responsáveis pelo controle da fotossíntese e da transpiração (Jones, 1998). Entretanto, com os dados obtidos neste estudo, verificou-se que mesmo sob igualdade na taxa de condutância estomática há possibilidade de genótipos cultivados sob distintos manejos se diferirem na taxa fotossintética (Figura 4.6). Isso indica que a assimilação de CO_2 está condicionada ao efeito de genótipo, não sendo portanto, apenas um reflexo direto da condutância estomática.

A assimilação fotossintética de CO_2 das cultivares de arroz irrigado foi acompanhada ao longo do ciclo (≈ 120 dias) e foi observado que aos 20 DAE as plantas apresentaram maiores valores, cerca de $40 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Figura 4.6) para todas as cultivares, independentemente do manejo da lâmina d'água. Espécies como *O. sativa*, que apresentam sementes pequenas e não contém grandes quantidades de reservas,

frequentemente apresentam elevadas taxas fotossintéticas decorrentes da estratégia de estabelecimento de suas plântulas a fim de suprir a demanda de crescimento inicial (Buckeridge et al., 2004; Grandis, 2010). Essas espécies de crescimento rápido têm alta capacidade fotossintética e requerem alta intensidade luminosa (Bazzaz & Pickett, 1980), contudo isso ocorre apenas no início do ciclo.

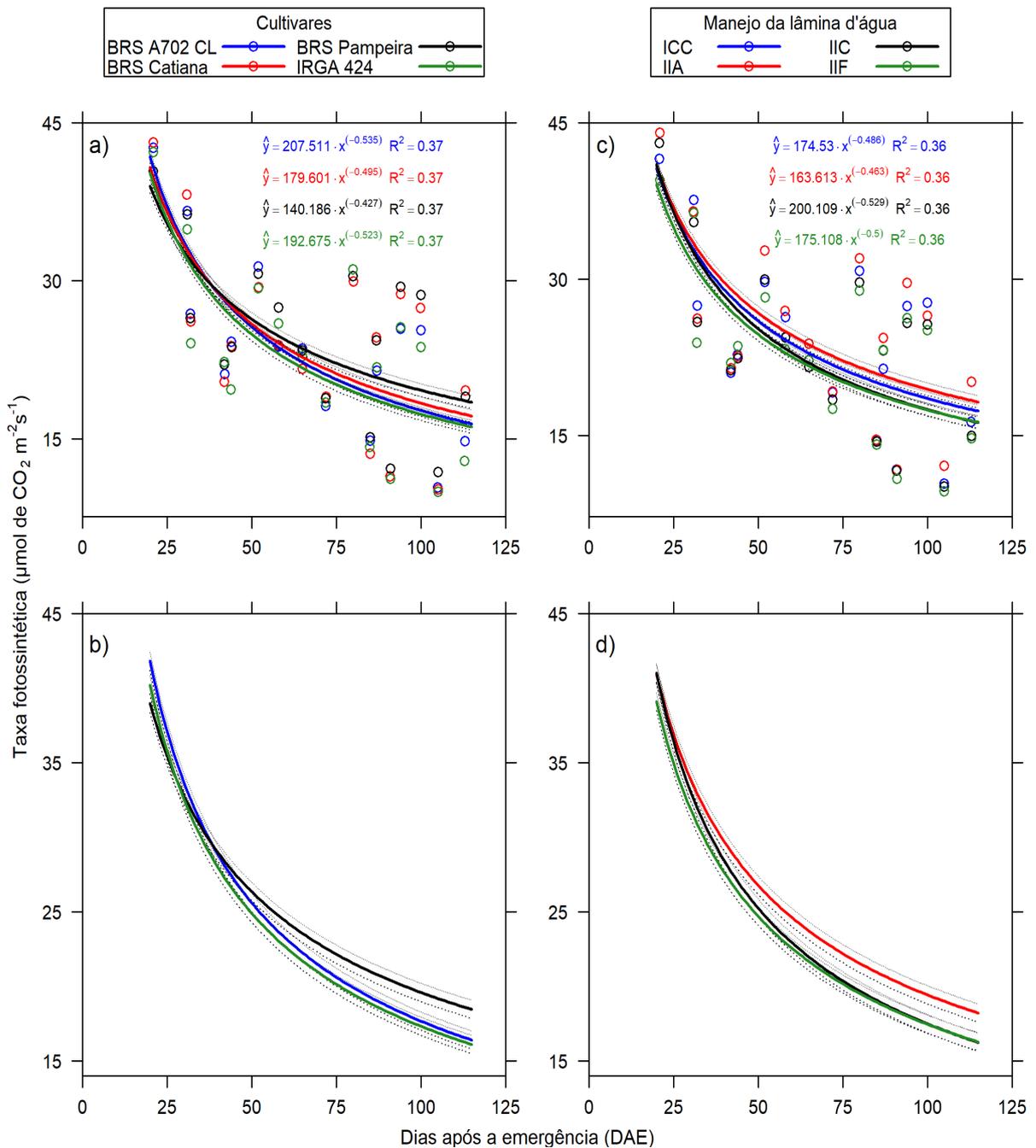


Figura 4.6. Dinâmica da taxa fotossintética ao longo do ciclo de crescimento do arroz irrigado mediante o efeito de cultivar (a e b) e de manejos da lâmina d'água (c e d). Goianira, 2020. Os painéis b e d ilustram apenas as cultivares e manejos que diferiram, respectivamente. Linhas tracejadas representam o intervalo com 95% de confiança das estimativas.

A medida em que as plantas se desenvolveram, a taxa fotossintética caiu de forma não-linear (Figura 4.6). Esses resultados corroboram os de Suzuki et al. (1987), Grandis (2010) e Renato (2013), que indicam que as taxas fotossintéticas tendem a diminuir com o aumento da idade da planta. A causa disso é que nos primeiros dias após a completa expansão foliar (início da atividade fotossintética da planta), a relação área foliar fotossinteticamente ativa/área foliar total é maior que no decorrer do ciclo. Isso está diretamente relacionado com o teor de nitrogênio foliar, que diminui também durante o ciclo. Essa diminuição do N na folha ao longo do ciclo de crescimento está relacionada com sua realocação, que direciona o N para formação de colmos e grãos na medida em que a planta envelhece (Fageria et al., 1997; Renato, 2013). Como consequência, ocorre efeito dilutivo do conteúdo de compostos orgânicos produzidos na área foliar, culminando em decréscimo na taxa fotossintética. Soma-se a isto o fato de que com o decorrer do tempo, as folhas de culturas anuais entram em senescência, diferentemente do que ocorre com muitas espécies perenes, que podem apresentar períodos maiores de longevidade de suas folhas. A própria atividade fotossintética atua como um mecanismo auto-destrutivo. A estrutura dos cloroplastos recebe constantemente e intensivamente fluxo eletrônico (fótons da radiação solar), essa energia promove alterações na estrutura dos cloroplastos com o envelhecimento das folhas, reduzindo o número de grana ativos e de tilacóides por grânun (Bondada & Oosterhuis, 1998). Assim, é razoável vislumbrar que as taxas fotossintéticas sejam decrescentes ao longo do tempo (Figura 4.6).

A taxa fotossintética diferiu entre cultivares e manejos da lâmina d'água (Figura 4.6a e c), contudo a interação cultivar \times manejo não foi significativa. A partir dos 75 DAE a cultivar BRS Pampeira apresentou maior taxa fotossintética que as cultivares BRS A702 CL e IRGA 424 (Figura 4.6b). Já entre os manejos da lâmina d'água IIA promoveu maior taxa fotossintética que IIC e IIF (Figura 4.6d), dos 75 DAE até o final do ciclo. Embora significativas as diferenças observadas entre cultivares e manejos para a taxa fotossintética a partir dos 75 DAE não contribuíram para o acúmulo de biomassa (Figura 4.9).

A taxa transpiratória não diferiu entre cultivares e manejos da lâmina d'água e seguiu a mesma tendência que a taxa fotossintética, declínio com o aumento da idade (Figura 4.7a e b). Essa resposta indica que é possível diminuir a oferta de água com a manutenção de solo saturado ou do uso da inundação intermitente até o florescimento, ou mesmo, durante todo o ciclo, sem comprometimentos à transpiração.

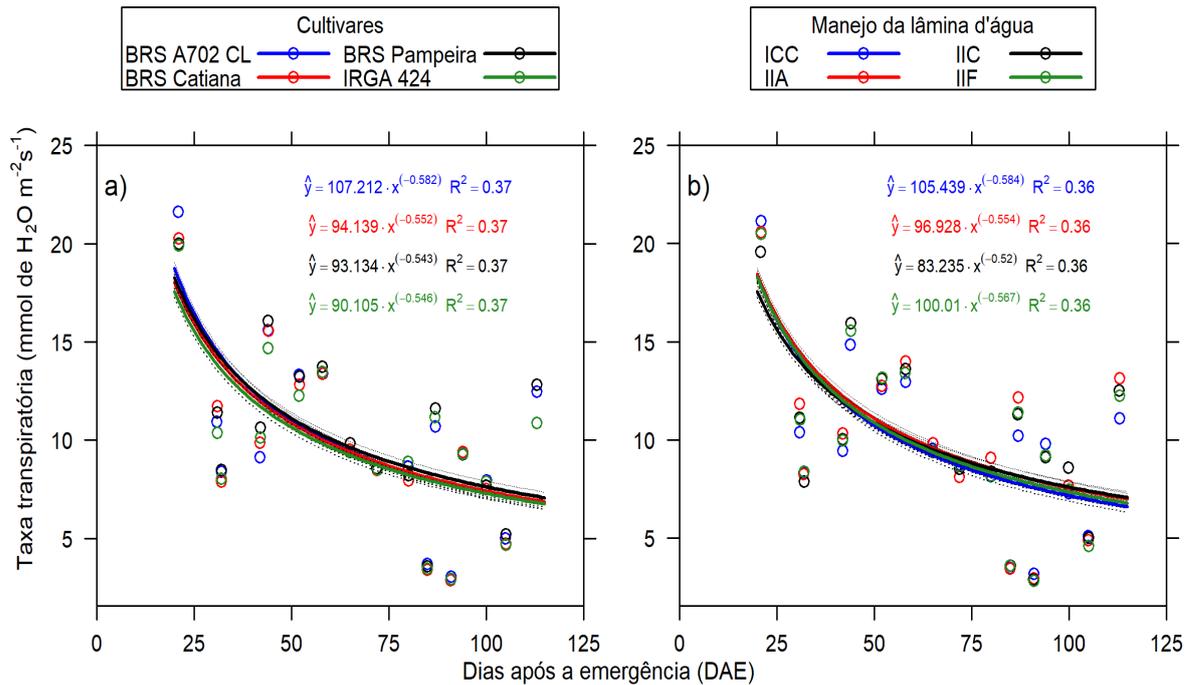


Figura 4.7. Dinâmica da taxa transpiratória ao longo do ciclo de crescimento do arroz irrigado mediante o efeito de cultivar (a) e de manejos da lâmina d'água (b). Goianira, 2020. Linhas tracejadas representam o intervalo com 95% de confiança das estimativas para cada cultivar e manejo.

Assim como a taxa fotossintética, a eficiência instantânea de carboxilação (EIC) diferiu entre cultivares e manejos da lâmina d'água (Figura 4.8a e 4.8c) a partir dos 75 DAE e, também não foi constatada interação entre cultivar \times manejo. Após os 75 DAE a cultivar BRS Pampeira apresentou maior EIC que as cultivares BRS A702 CL e IRGA 424 (Figura 4.8b). Entre os manejos da lâmina d'água IIA promoveu maior EIC que os demais manejos (Figura 4.8d). Até os 75 DAE os efeitos de cultivares e manejos não foram observados. Essas informações do metabolismo de carbono auxiliam na explicação do crescimento das cultivares de arroz investigadas neste estudo que foi similar tanto para a biomassa seca de folhas e de colmos neste mesmo período (Figuras 4.11 e 4.12), respectivamente.

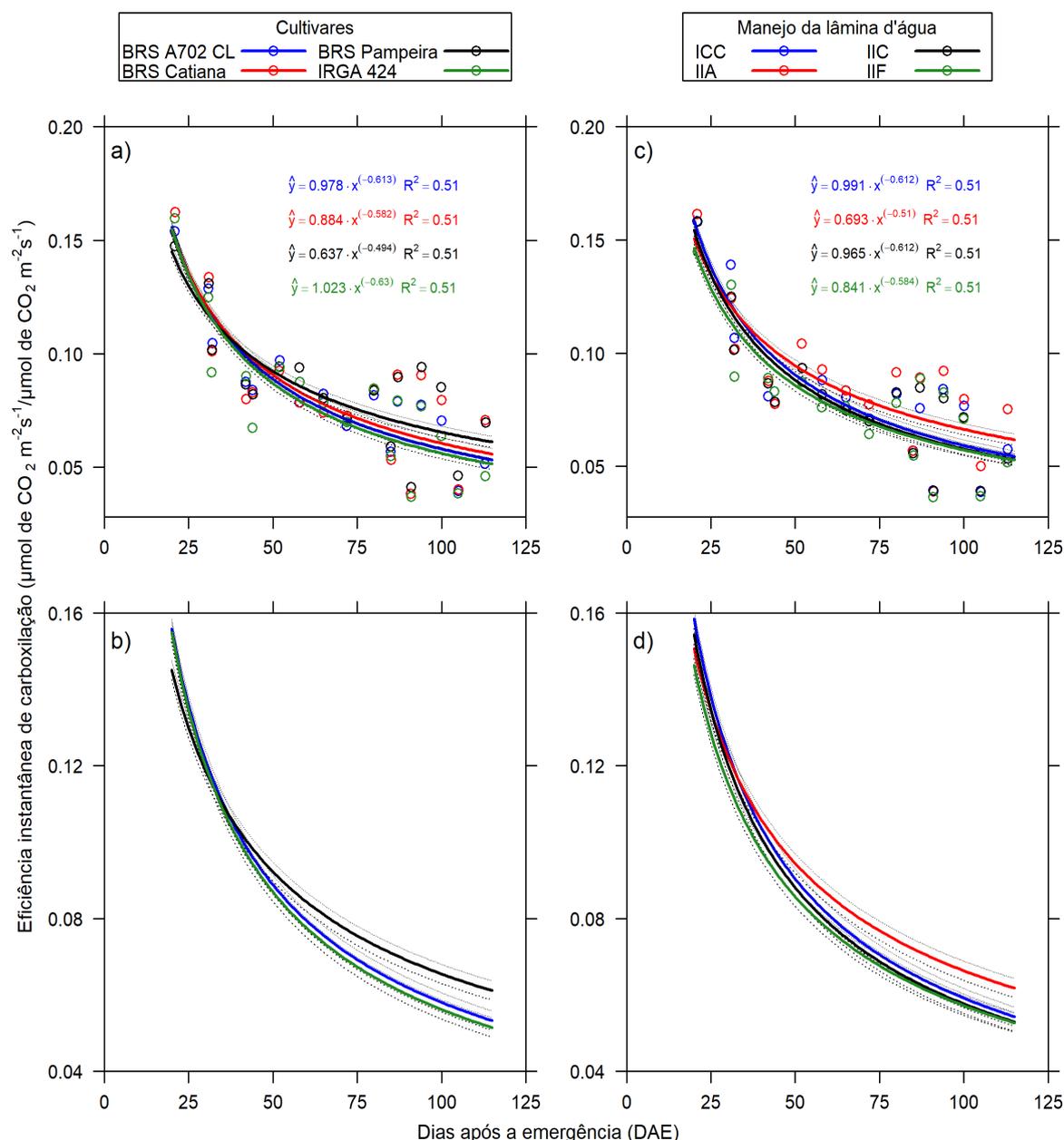


Figura 4.8. Dinâmica da eficiência instantânea de carboxilação ao longo do ciclo de crescimento do arroz irrigado mediante o efeito de cultivar (a e b) e de manejos da lâmina d'água (c e d). Goianira, 2020. Os painéis b e d ilustram apenas as cultivares e manejos que diferiram, respectivamente. Linhas tracejadas representam o intervalo com 95% de confiança das estimativas.

A dinâmica da biomassa seca total mostrou-se ser afetada pela safra de cultivo, sendo que em 2016/2017, de modo geral para todas as cultivares independentemente do manejo, o acúmulo de biomassa foi 30% menor que em 2017/2018 (Figura 4.9). Isso também foi observado, em menor proporção, para as frações de biomassa seca de folha, colmo e panícula (Figuras 4.10, 4.11 e 4.12). A causa disso é que em 2016/2017 houve maior amplitude térmica no período reprodutivo (Tabela 4.2). Isso pode ter feito com que as plantas utilizassem a partir dos 75 DAE (Figura 4.9) os compostos orgânicos produzidos,

basicamente, para se manterem sem alterações drásticas em sua fenologia, como mecanismo de plasticidade, refletindo assim no menor acúmulo de biomassa nesta safra para todos os manejos da lâmina d'água e cultivares.

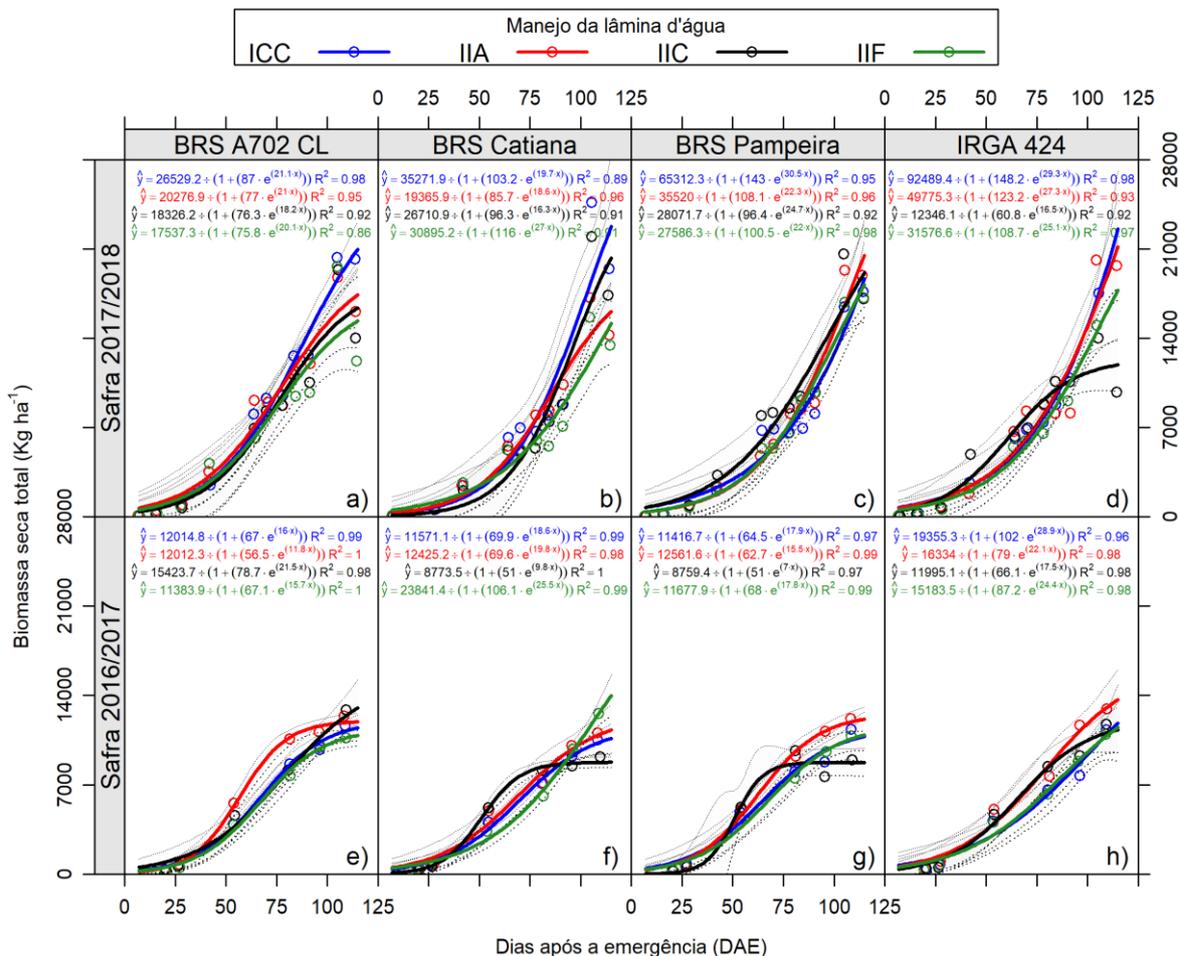


Figura 4.9. Dinâmica da biomassa seca total de cultivares de arroz irrigado em razão de manejos da lâmina d'água nas safras 2016/2017 e 2017/2018, respectivamente. Goianira, 2020. Linhas tracejadas representam o intervalo com 95% de confiança das estimativas de biomassa seca total para cada cultivar e manejo.

As diferenças no acúmulo de biomassa ao longo do ciclo por ocasião dos manejos da lâmina d'água foram sutis, o que indica que embora o manejo IIA tenha proporcionado maior taxa fotossintética que os demais, não houve alocação direta desses compostos na biomassa. Essa mesma constatação pode ser atribuída ao efeito de cultivar sobre a taxa fotossintética (Figura 4.6) e a sua contribuição no acúmulo de biomassa seca, pois, a BRS Pampeira mesmo sendo fotossinteticamente mais efetiva a partir dos 75 DAE não acumulou mais biomassa que as demais cultivares. Isso sugere que a relação entre a taxa fotossintética e o crescimento não foi direta, ou seja, a alocação dos compostos produzidos

deve ter sido direcionada para outras vias metabólicas como a respiração celular, em especial a respiração de manutenção, igualando a deposição em biomassa entre manejos e cultivares.

A biomassa seca de folhas (Figura 4.10) e de colmos (Figura 4.11) mostrou ser dependente dos fatores safra, cultivar e manejo, sendo o período vegetativo ($0 < \text{DAE} \approx 75$) o mais sensível a essas influências. A cultivar BRS A702 CL foi a que apresentou maiores divergências entre os manejos para o acúmulo de biomassa seca de folhas, sendo que na safra 2016/2017 o manejo IIA promoveu maior deposição de biomassa nesse órgão (Figura 4.10e) e em 2017/2018 os manejos IIC e IIF igualaram-se ao manejo IIA (Figura 4.10a). Já para a biomassa seca de colmos apenas em 2016/2017 observou-se diferenças significativas, repetindo o mesmo comportamento relatado para a biomassa seca de folhas nesta safra quanto ao efeito de manejos da lâmina d'água (Figura 4.11e).

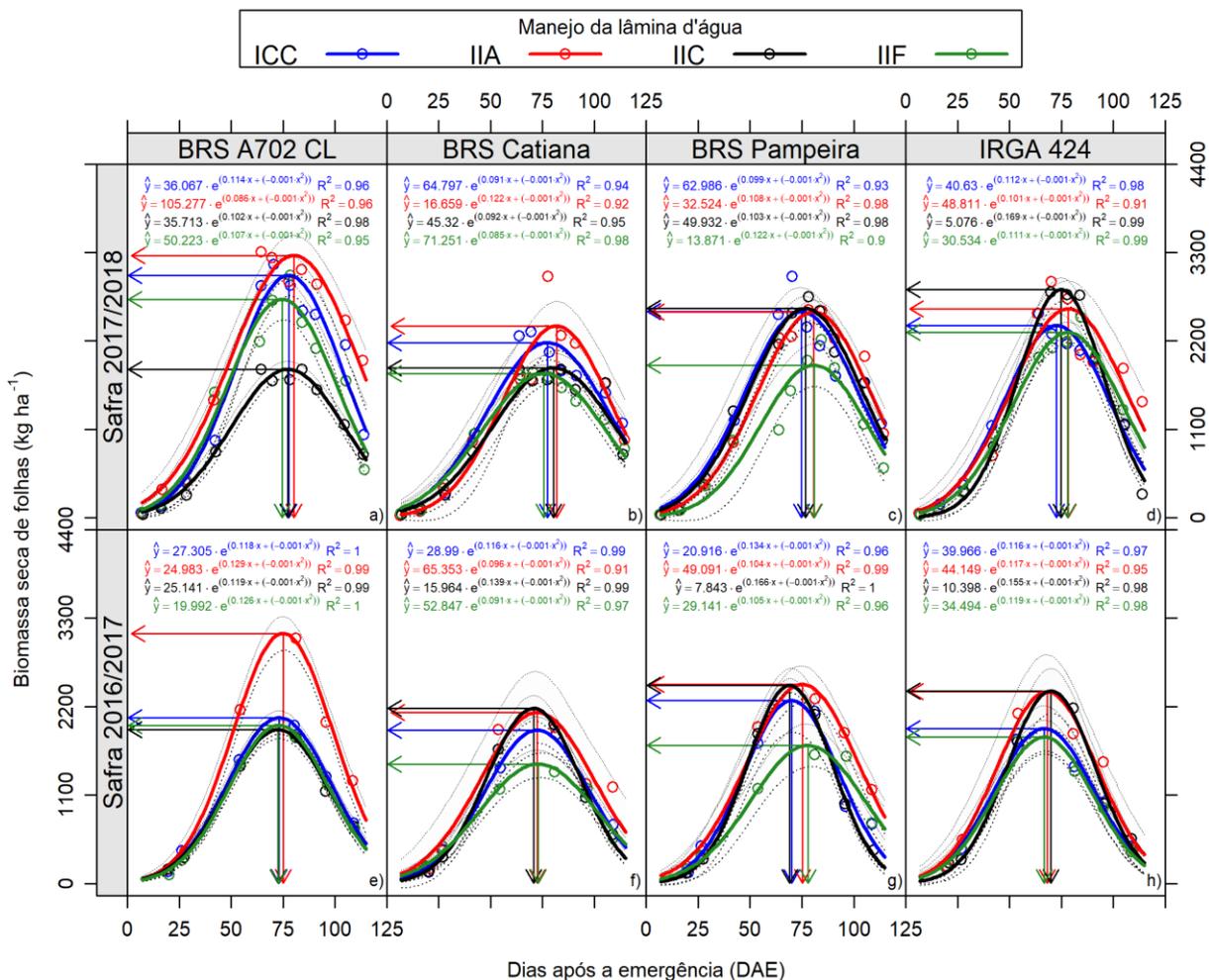


Figura 4.10. Dinâmica da biomassa seca de folhas de cultivares de arroz irrigado em razão de manejos da lâmina d'água nas safras 2016/2017 e 2017/2018, respectivamente. Goianira, 2020. Linhas tracejadas representam o intervalo com 95% de confiança das estimativas de biomassa seca de folhas para cada cultivar e manejo.

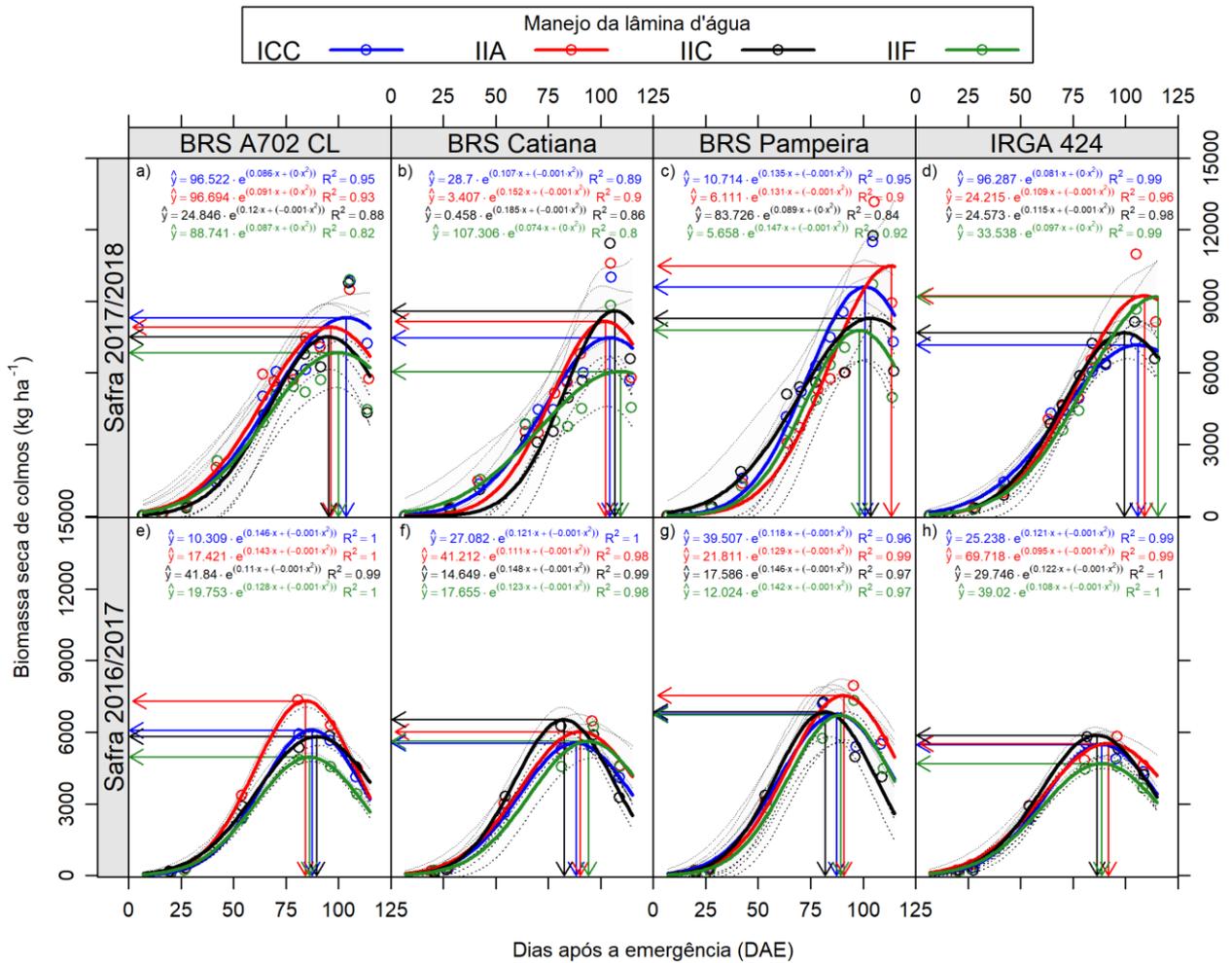


Figura 4.11. Dinâmica da biomassa seca de colmos de cultivares de arroz irrigado em razão de manejos da lâmina d’água nas safras 2016/2017 e 2017/2018, respectivamente. Goianira, 2020. Linhas tracejadas representam o intervalo com 95% de confiança das estimativas de biomassa seca de colmos para cada cultivar e manejo.

O ajuste da biomassa seca de panículas indicou que o manejo da lâmina d’água influencia a velocidade de enchimento de grãos, com efeito condicionado à cultivar, sendo as cultivares BRS Catiana e IRGA 424 mais afetadas pelo manejo da lâmina d’água que as demais cultivares, em ambas as safras (Figura 4.12b, d, f e h). Para estas cultivares os manejos com redução maior na oferta de água (IIC e IIA) retardaram a velocidade de enchimento de grãos, promovendo variações no acúmulo final de biomassa das panículas em R9 (≈ 120 DAE). Entretanto essas variações observadas para o efeito de “Cultivar” não foram significativas, portanto, o manejo da lâmina d’água parece influenciar a alocação de biomassa nas panículas com interação forte entre as safras de cultivo (Figuras 4.12 e 4.13).

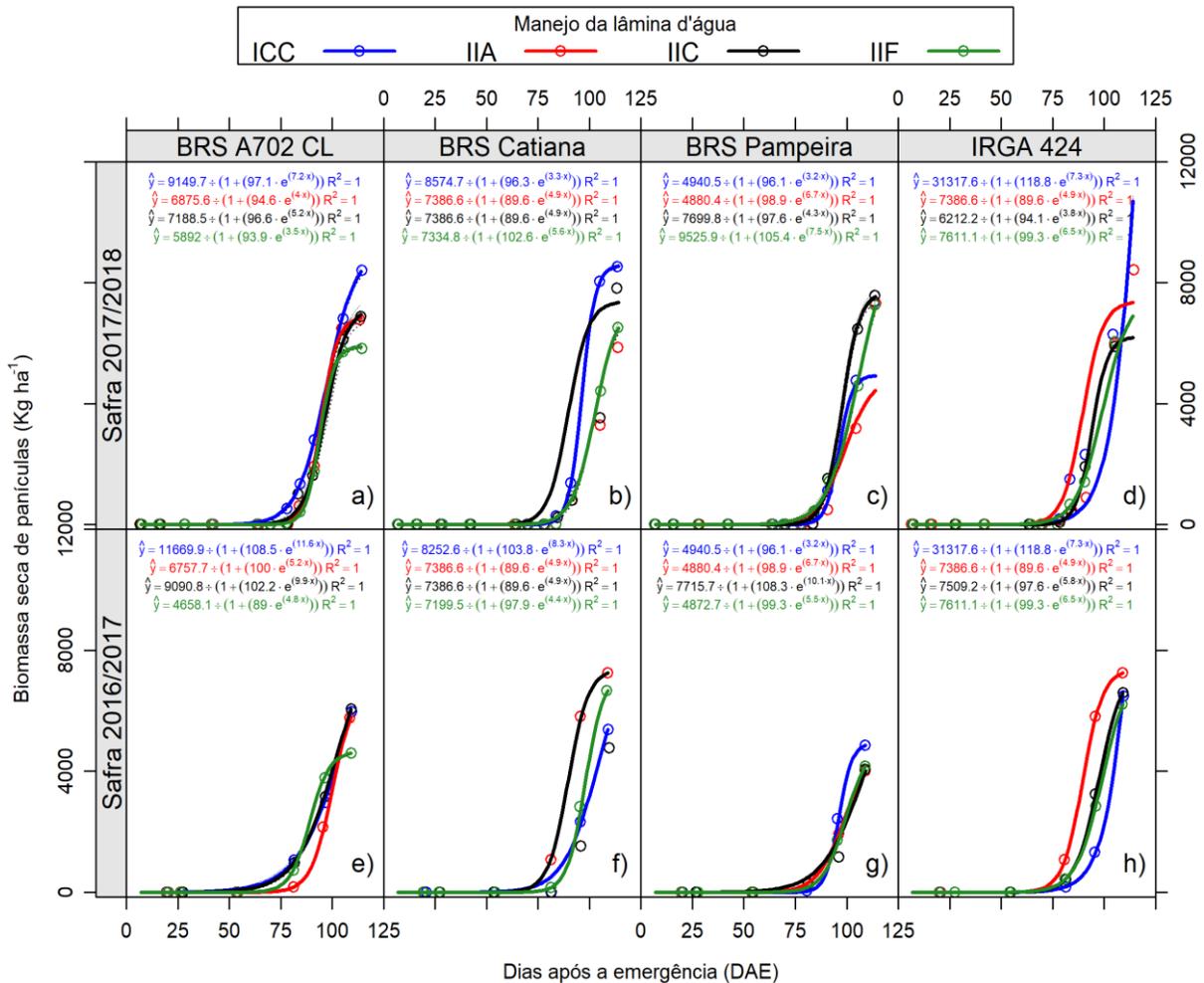


Figura 4.12. Dinâmica da biomassa seca de panículas de cultivares de arroz irrigado em razão de manejos da lâmina d'água nas safras 2016/2017 e 2017/2018, respectivamente. Goianira, 2020. Linhas tracejadas representam o intervalo com 95% de confiança das estimativas de biomassa seca de panículas para cada cultivar e manejo.

A produtividade de grãos ($t \cdot ha^{-1}$), considerando a análise conjunta com efeitos fixos para blocos e safra agrícola, foi influenciada pela interação safra \times manejo ($p < 0,05$). Dessa forma recomendações generalistas não são válidas, pois os efeitos do manejo da lâmina de água variaram conforme o ano agrícola (Figura 4.13). Isso é de se esperar, pois as condições meteorológicas nos ambientes de cultivos oscilaram de um ano para outro, com variações na amplitude térmica na fase reprodutiva e o no acúmulo de graus-dia e de radiação na fase reprodutiva e de enchimento de grãos. Em 2016/2017 houve maior acúmulo de graus-dia nas fases reprodutiva e de enchimento de grãos, e de radiação solar na fase reprodutiva (Tabela 4.2), o que eleva o número e massa de espiguetas, e conseqüentemente a produtividade em comparação à safra 2017/2018. Santos et al. (2017) mencionam que maiores acúmulos de graus-dia e de radiação solar no período reprodutivo e de enchimento de grãos contribuem para obtenção de produtividades acima de $6000 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ no cultivo do

arroz tropical. Isso é justificado pelo fato de que nas fases reprodutiva e de enchimento de grãos, o requerimento de fotoassimilados é alto, por causa do maior número de órgãos drenos (panículas), se comparado à fase vegetativa (folhas), exigindo maior eficiência da fotossíntese.

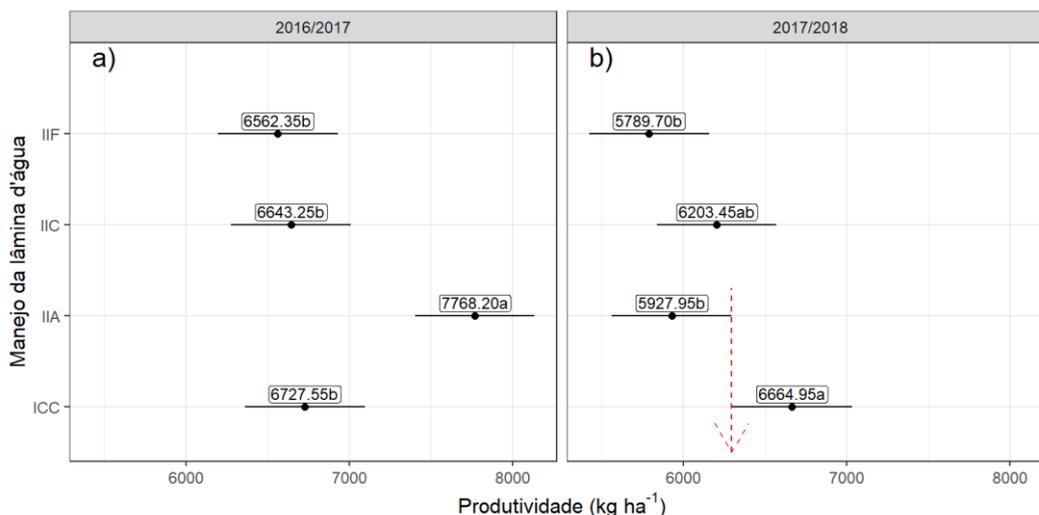


Figura 4.13. Produtividade do arroz irrigado tropical em razão de manejos da lâmina d'água nas safras agrícolas 2016/2017 (a) e 2017/2018 (b), respectivamente. Goianira, 2020. Seta vermelha no painel b indica limiar de diferença entre as produtividades obtidas com o manejo IIA e ICC em 2017/2018.

A alocação dos fatores safra e bloco como sendo de efeitos fixos em modelos lineares tem como consequência a restrição na estimativa do erro experimental. Isso ocorre porque neste caso, há consumo de graus de liberdade das amostras para estimativa dos efeitos fixos para blocos e safras, reduzindo a precisão na estimativa do resíduo experimental (*eijkn* do modelo) e, conseqüentemente, na estimativa dos efeitos dos fatores de maior interesse: manejo da lâmina d'água e cultivares. No intuito de eliminar o impacto de variáveis que pouco somam às inferências gerais do estudo, como bloco e safras, adotou-se a alternativa da abordagem para a análise de variância sobre a estrutura de modelos mistos. Observou-se que para as variáveis produtividade e índice de colheita o modelo misto foi mais preciso (< AIC) na estimativa das respostas (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 – Valores de Akaike Information Criterion (AIC) dos modelos lineares de efeitos fixos (safras, blocos, parcelas e subparcelas) e misto (efeitos fixos para parcelas e subparcelas; efeitos aleatórios para safras e blocos). Goianira, 2020.

Modelo	Variáveis observadas	
	Produtividade	Índice de colheita
Efeitos fixos para bloco e safra	2640,081	-663,8150
Efeitos aleatórios para bloco e safra	2455,403	-549,8829

A análise de variância pela abordagem de modelo misto revelou ausência de interação entre cultivares \times manejos da lâmina d'água sobre a produtividade de grãos e o índice de colheita (Figuras 4.14a e 4.15a, respectivamente). Isso é interessante, pois, permite recomendações gerais de manejo da lâmina d'água, independentemente da cultivar. Os efeitos isolados dos fatores principais: cultivar e manejos da lâmina d'água não foram significativos ($p < 0,05$) (Figura 4.14b e c; 4.15b e c). A produtividade média de todos os tratamentos nesse estudo foi superior à média de produtividade de arroz irrigado no estado de Goiás, tendo como referência a atual estimativa de safra, de 6,0 Mg ha⁻¹ (Conab, 2020c).

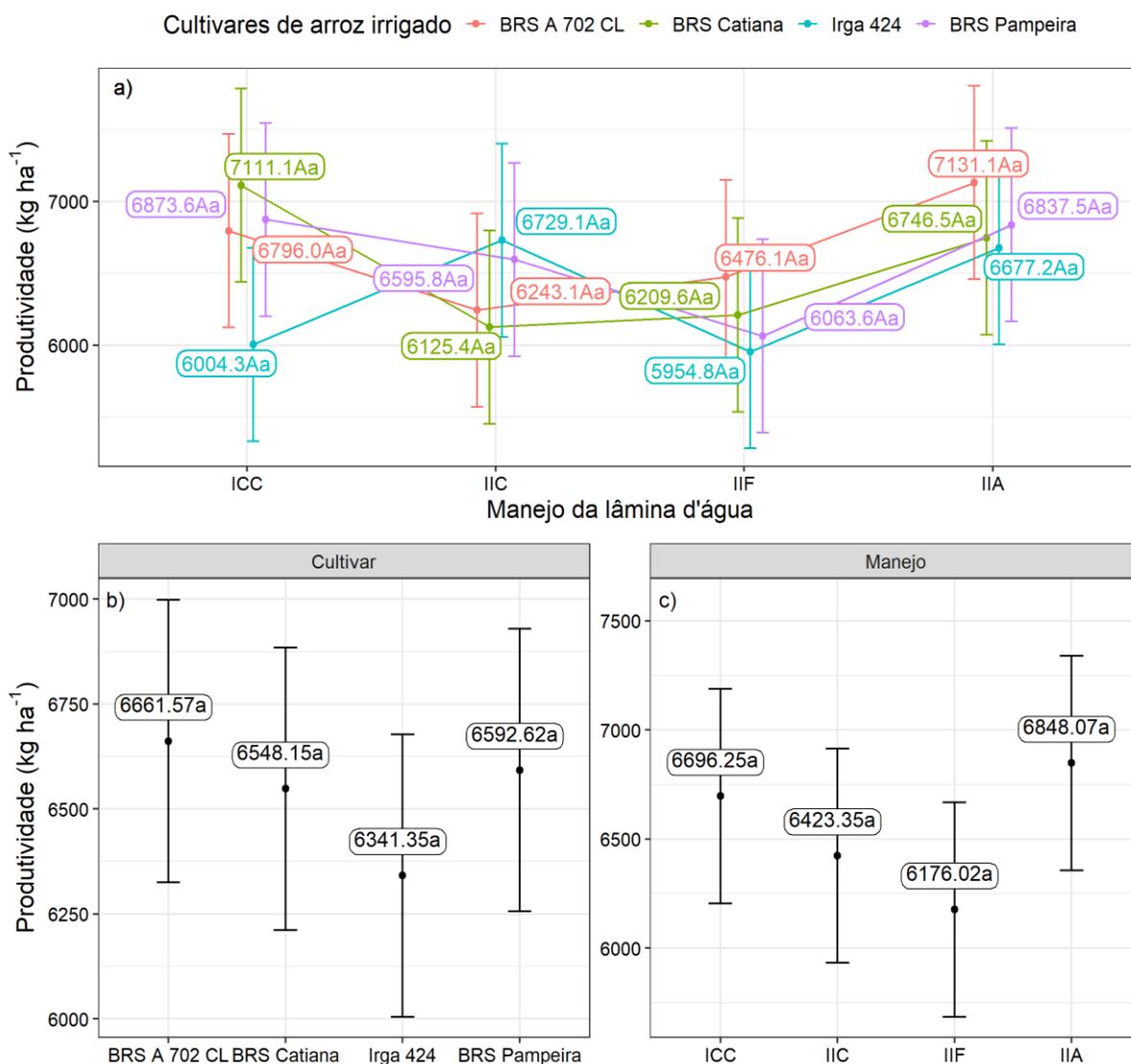


Figura 4.14. Produtividade do arroz irrigado tropical em razão da interação manejos da lâmina d'água \times cultivares (a), cultivares (b) e manejo da lâmina d'água (c), respectivamente. Goianira, 2020. No painel (a) letras maiúsculas comparam cultivares em cada nível de manejo, enquanto letras minúsculas comparam manejos em cada nível de cultivar.

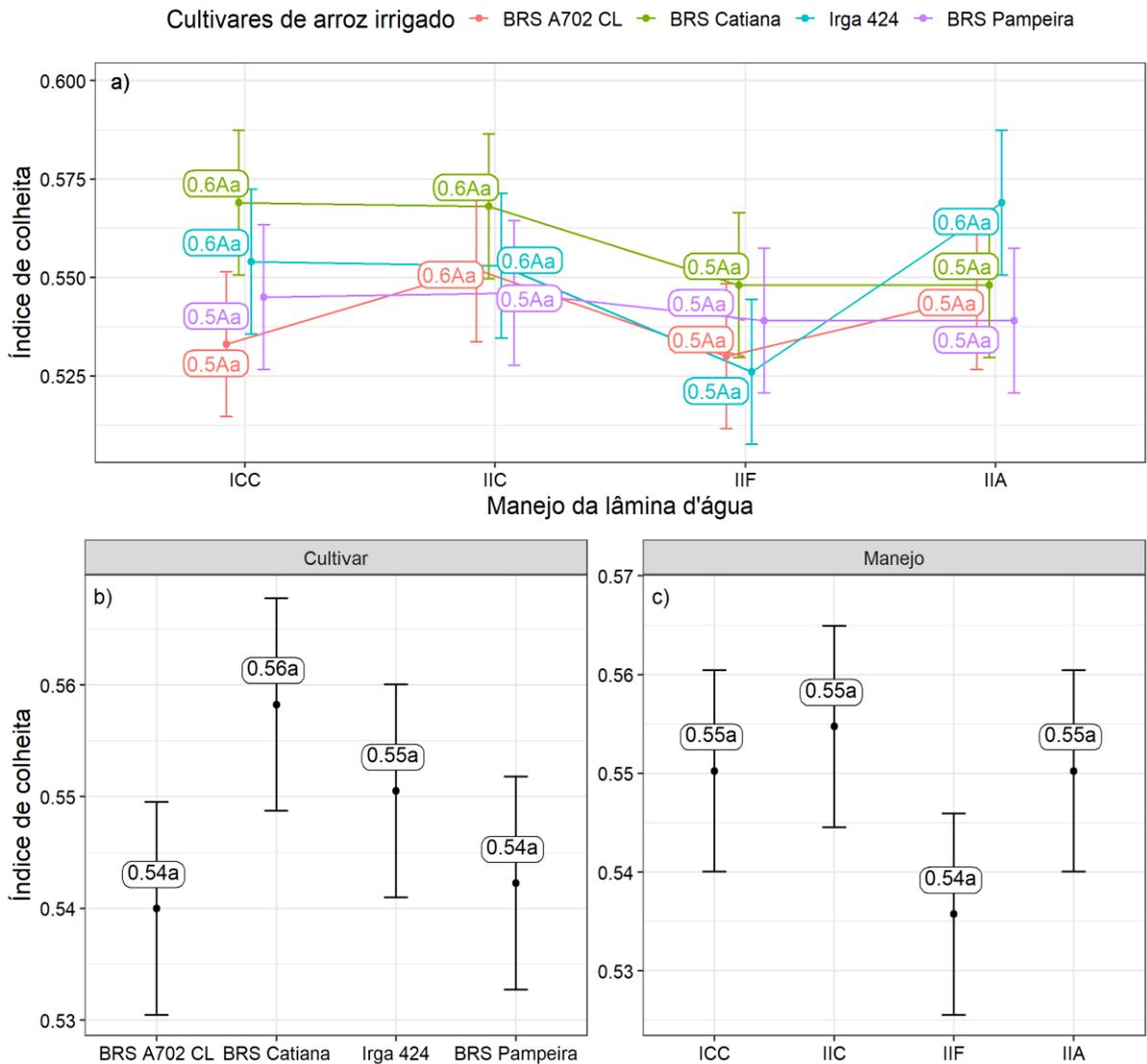


Figura 4.15. Índice de colheita do arroz irrigado tropical em razão da interação manejos da lâmina d'água × cultivares (a), cultivares (b) e manejo da lâmina d'água (c), respectivamente. Goianira, 2020. No painel (a) letras maiúsculas comparam cultivares em cada nível de manejo, enquanto letras minúsculas comparam manejos em cada nível de cultivar.

Este resultado aponta que os manejos alternativos de irrigação: IIA, IIC e IIF são boas opções para os produtores de arroz irrigado tropical diminuírem seus custos pelo menor uso de água e, na pior hipótese, manterem a mesma produtividade do manejo de irrigação convencional (ICC). Avila et al. (2015) também verificaram que a inundação intermitente não afetou a produtividade do arroz irrigado cultivado no ecossistema subtropical em comparação ao uso da inundação contínua, o que é positivo, pois, proporciona maior conservação da água e diminui os custos com a operação de inundação da área. Stone (2005) e Avila et al. (2015) concluíram que a manutenção do solo saturado permite economizar de 22 a 75% a oferta de água via irrigação. Outra vantagem dos manejos alternativos é o

incremento da eficiência no uso da água (EUA). Pimenta (2018) e Avila et al. (2015) reportaram incrementos variando de 200% até 350% na EUA. Neste estudo apesar de não termos quantificado a EUA podemos pactuar com os achados destes autores, pois, o simples fato de reinundar o solo em períodos mais espaçados durante o cultivo possibilita maior economia de água.

Da mesma forma em que há preocupação com a obtenção de produtividades elevadas nas áreas de cultivo, há também apelo pelo aumento do índice de colheita. Isso é justificado pela necessidade de obtenção em maior proporção de produto comercializável por biomassa total de plantas por área. Alternativas de manejo e cultivares que elevem os valores deste indicador de rendimento para valores, geralmente acima 0,5, são perseguidos e desejados na pesquisa agrônômica (Liang et al., 2017). Práticas como a secagem controlada do solo pós-antese, regimes alternados de umedecimento e secagem moderada do solo durante toda a estação de crescimento e cultivo de cobertura morta de palha não inundada, podem aumentar substancialmente a EUA. Além disso permitem manter ou mesmo aumentar o rendimento de grãos de arroz e o índice de colheita, principalmente por meio de uma melhor estrutura de dossel e remobilização aprimorada de reservas de carbono pré-armazenadas de tecidos vegetativos para os grãos (Yang & Zhang, 2010). A similaridade dos valores do índice de colheita observados neste estudo para os efeitos de manejos da lâmina d'água e cultivares adotados (Figura 4.15b e c) deve ser entendida como satisfatória, pois, o aumento da EUA através dos manejos alternativos da lâmina d'água com a obtenção de produtividades e índice colheita similares aos obtidos com o manejo da lâmina contínua de irrigação configuram-se em ganhos significativos para a agricultura. Assim o duplo objetivo de aumentar ou manter a produção de grãos e economizar água pode ser alcançado com a recomendação de estratégias como a inundação intermitente com aeração (IIA) no cultivo de qualquer uma das cultivares abordadas neste estudo.

4.4 CONCLUSÕES

1 – O manejo das lâminas de irrigação não afeta o desenvolvimento vegetativo do arroz irrigado.

2 – Cultivares desenvolvidas para o ambiente tropical, como é o caso das cultivares BRS A 702 CL, BRS Catiana e BRS Pampeira são mais resilientes às alterações da amplitude térmica na fase reprodutiva, o que diminui a chance de terem o seu florescimento adiantado.

3 – A inundação intermitente com aeração (IIA) prolonga o tempo para florescimento e encerramento do ciclo da cultivar BRS A702 CL.

4 – É possível diminuir a oferta de água com a manutenção de solo saturado ou do uso da inundação intermitente até o florescimento, ou mesmo, durante todo o ciclo, sem comprometimentos à transpiração.

5 – Diferenças entre cultivares e manejos na taxa fotossintética e na eficiência instantânea de carboxilação a partir do período reprodutivo não são diretamente relacionadas com o acúmulo de biomassa seca.

6 – Menor acúmulo de radiação e de graus-dia nas fases reprodutivas e de enchimento de grãos reduzem o acúmulo da biomassa seca total, das folhas, colmos e panículas, sendo, portanto, fatores cruciais a serem observados nos ambientes de produção.

7 – Estratégias que racionem o uso da água como: inundação intermitente com aeração (IIA) e inundação intermitente o ciclo todo (IIC) podem ser adotadas no cultivo do arroz irrigado tropical sem prejuízos à produtividade de grãos e ao índice de colheita.

4.5 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, E. J.; DIAS, J. P. T. Ecofisiologia de hortaliças. In: DIAS, J. P. T (Org.). **Ecofisiologia de culturas agrícolas**. Belo Horizonte: EdUEMG, 2018. 168p.

AVILA, L.A. et al. Rice water use efficiency and yield under continuous and intermittent irrigation. **Agronomy Journal**. Madison, v. 107, n. 2, p. 442-448, 2015.

BAZZAZ, F. A & PICKETT, S. T. A. Physiological ecology of tropical succession: A comparative review. **Annual Review of Ecological and Systematics**. Ithaca, v. 11, n. 1. p. 287-310, 1980.

BONDADA, B. R & OOSTERHUIS, D. Decline in photosynthesis as related to alterations in chloroplast ultrastructure of a cotton leaf during ontogeny. **Photosynthetica**. Praha, v. 35, n. 3, p. 467-4471, 1998.

BOUMAN, B. A. M. et al. **ORYZA 2000**: modelling lowland rice. Manila: IRRI, 2001. 235p.

BUCKERIDGE, M. S.; SANTOS, H. P.; TINÉ, M. A.; AIDAR, M. P. M. Mobilização de reservas. In: GUI FERREIRA, A & BORGHETI, F. (eds.). **Germinação. Do básico ao aplicado**. Porto Alegre: Artmed: 2004. p163-185.

BORIN, J. B. M. **Alterações da solução do solo e resposta do arroz irrigado ao manejo da irrigação e da adubação nitrogenada**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 93p. 2014.

CARDOSO, E. A. **Influência da adubação nitrogenada e avaliação do estado de nitrogênio do arroz irrigado**. Tese (Doutorado em Fitotecnia). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 51p. 2011.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de grãos - Safra 2019/20. Nono levantamento, Brasília, v. 7, p. 1-69, jun. 2020a.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Arroz**: Análise Mensal. Brasília, v. 1, p. 1-4, março/abril. 2020b.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de grãos - Safra 2019/20. Quarto levantamento, Brasília, v. 7, p. 1-104, jan. 2020c.

DINGKUNH, M. et al. Improving yield potential of tropical rice: Achieved levels and perspectives through improved ideotypes. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 182, n. 1, p. 43–59, 2015.

EMILIANO, P. C. **Crítérios de informação**: como eles se comportam em diferentes modelos? 2013. Tese (Doutorado em Estatística e Experimentação Agropecuária). Universidade Federal de Lavras. Lavras. 195p. 2013.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. **Growth and mineral nutrition of field crops**. 2^a ed. New York: M. Dekker, 1997, 624p.

FAO. Agricultura brasileira: perspectivas e desafios. In: **OCDE-FAO. Perspectivas agrícolas**. 2015 - 2024. 51p. 2015.

FRAGOSO, D. B. et al. **BRS A702 CL: Nova Cultivar de Arroz Irrigado de Ciclo Curto com Tolerância à Herbicida**. Embrapa: Santo Antônio de Goiás. 2017. (Comunicado Técnico).

GASTL FILHO, J. Ecofisiologia do cafeeiro. In: DIAS, J. P. T (Org.). **Ecofisiologia de culturas agrícolas**. Belo Horizonte: EdUEMG, 2018. 168p.

GRANDIS, A. **Respostas fotossintéticas e de crescimento da espécie amazônica *Senna reticulata* sob elevada concentração de CO₂**. Dissertação (Mestrado em Ciências: fisiologia e bioquímica de plantas). Universidade de São Paulo. São Paulo. 137p. 2010.

JONES, H. G. Stomatal control of photosynthesis and transpiration. **Journal of Experimental Botany**. Oxford, v. 49, n. 1, p. 387-398, 1998.

KATO, Y; KATSURA, K. Rice Adaptation to aerobic soils: physiological considerations and implications for agronomy: **Plant Production Science**. Kyoto, v.17, n.1, p. 1-12. 2014.

LIANG, T. et al. Erect panicle super rice varieties enhance yield by harvest index advantages in high nitrogen density canopies. **Journal of Integrative Agriculture**. Beijing, v. 16, n. 7, p. 1467-1473. 2017.

LIU, S. et al. Effects of water regime during rice-growing season on annual direct N₂O emission in a paddy Rice-winter wheat rotation system in southeast China. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 408, p.906-9013, 2010.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Ed. Agronômica Ceres. São Paulo, 2006. 638 p.

PIMENTA, L. B. **Manejo alternativo de irrigação para o arroz**. Dissertação (Mestrado em Irrigação no Cerrado). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano. Ceres. 42p. 2018.

PINHEIRO, B. S. Características morfofisiológicas da planta relacionadas à produtividade. In: SANTOS, A. B.; STONE, L. F.; VIEIRA, N. R. A. (Eds.). **A cultura do arroz no Brasil**. 2^a. ed. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. p. 209–256.

PINTO, M. A. B.; PARFITT, J. M. B.; TIMM, L. C.; FARIA, L. C.; SCIVITTARO, W. B. Produtividade de arroz irrigado por aspersão em terras baixas em função da disponibilidade de água e de atributos do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília. v. 51, n. 9, p. 1584-1593, 2016.

POCOJESKI, E. **Disponibilidade do nitrogênio em solos de várzea e parâmetros da planta para avaliação nutricional da cultura do arroz irrigado**. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 85p. 2011.

OLIVEIRA, V. A.; RODRIGUES, C. **Levantamento detalhado dos solos da fazenda Palmital, município de Goianira – GO**. Goiânia, 2012. 81p.

RENATO, N. S. **Modelos de crescimento das culturas do milho e do feijão em condições de temperatura e CO₂ atmosféricos elevados**. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 97p. 2013.

SANTOS, A. B.; RABELO, R. R. **Informações Técnicas para a cultura do arroz irrigado no estado do Tocantins**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2008, 136p. (Documento 218)

SANTOS, M. P.; ZANON, A. J.; CUADRA, S. V.; STEINMETZ, S.; CASTRO, J. R.; HEINEMANN, A. B. Yield and morphophysiological indices of irrigated rice genotypes in contrasting ecosystems. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 47, n. 3, p. 253-264, 2017.

SOARES, R. T. C.; DA CUNHA, B. B.; COSTA, W. A. F.; DOS SANTOS, A. M. T. B. Manejo eficiente da água em sistema de irrigação de arroa (*Oryza sativa*). In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 35, 2015, Fortaleza. **Anais... ABEPRO**, 2015. p. 1-12.

SOSBAI - Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado. **Arroz irrigado**: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. Bento Gonçalves:2014. 192p.

SOUSA, R.O.; CAMARGO, F. A. O.; VAHL, L. C. Solos alagados (reações de redox). In: MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. 4. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2010. p. 171-195.

STONE, L. F. **Eficiência do uso da água na cultura do arroz irrigado**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2005, 48p. (Documento 176)

SUN, J.; YE, M.; PENG, S.; LI, Y. Nitrogen can improve the rapid response of photosynthesis to changing irradiance in rice (*Oryza sativa* L.) plants. **Scientific Reports**, London, v. 6, p. 1–10, 2016.

VORIES, E. D.; STEVENS, W. E.; TACKER, P. L.; GRIFFIN, T. W.; COUNCE, P. A. Rice production with center pivot irrigation. **Applied Engineering in Agriculture**. St. Joseph, v. 29, n. 1 p. 51-60. 2013.

YANG, J.; ZHANG, J. Crop Management techniques to enhance harvest index in rice. **Journal of Experimental Botany**. Oxford, v. 61, n. 12, p. 3177-3189, 2010.

YOSHIDA, S. **Fundamentals of rice crop science**. Los Baños: IRRI, 1981. 269p.

ZHANG, H. et al. The Productive Advantages and Formation Mechanisms of “Indica Rice to Japonica Rice”. **Scientia Agricultura Sinica**, Beijing, v. 46, n. 4, p. 686–704, 2013.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O interesse em estratégias que otimizem o uso de recursos sintéticos e naturais nos ambientes de produção de arroz é crescente. Especialmente sob o sistema irrigado que permite a obtenção de maiores produtividades que o cultivo de sequeiro. Os resultados obtidos com esta pesquisa permitem inferir que a gestão do estado de N no arroz irrigado tropical pode ser feita a partir do INN estimado pelos índices M_RESAVI e NDRE e que estratégias que racionem o uso da água como: inundação intermitente com aeração (IIA) e inundação intermitente o ciclo todo (IIC) podem ser adotadas no cultivo do arroz irrigado tropical sem prejuízos à produtividade de grãos.

Estas informações são de grande relevância para a difusão da produção do arroz irrigado tropical no país, que atualmente é pouco expressiva, representando menos de 7% da produção nacional. Com isso há a possibilidade de evitar a dependência no país da produção de arroz na região Sul e também diminuir os riscos de possíveis quebras de safras com eventos extremos como “El Niño” e “La Niña” que causam grande impacto na região Sul.

6 REFERÊNCIAS

BAYER, C.; ZSCHORNACK, TC.; CAMARGO, E.; SCIVITTARO, W. B.; SOUZA, R. O.; Estratégias mitigadores de emissão de gases do efeito estufa pela lavoura de arroz. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 9., 2015, Pelotas. **Resumos...** Pelotas: SOSBAI, 2015. p. 443.

BRESEGHELLO, H. C. de P.; NEVES, P. de C. F. **Arroz irrigado subtropical: desenvolver a cadeia produtiva do arroz irrigado em ambiente subtropical por meio de colaborações com instituições parceiras.** 2016. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/arroz-e-feijao/inovacaotecnologica/arroz-irrigado-subtropical>>. Acesso em: 23 Jan., 2019.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Arroz: Análise Mensal.** Brasília, v. 1, p. 1-4, março/abril. 2020a.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de grãos - Safra 2019/20. Nono levantamento, Brasília, v. 7, p. 1-69, jun. 2020b.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Perspectivas para a agropecuária - Safra 2019/20. Brasília, v. 7, p. 1-102, set. 2019.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 103, p. 137-157, 2000.

LU, J.; MIAO, Y.; SHI, W.; LI, J.; YUAN, F. Evaluating different approaches to non-destructive nitrogen status diagnosis of rice using portable RapidSCAN active canopy sensor. **Scientific Reports**, London, v. 7, n. 1, p. 1–10, 2017.

SANTOS, A. B.; RABELO, R. R. **Informações técnicas para a cultura do arroz irrigado no Estado do Tocantins.** Documentos: Embrapa Arroz e Feijão, 2008. 136p

SILVA, A. C. L. **Alterações bioquímicas, morfofisiológicas e produtivas em genótipos de arroz em dois regimes hídricos.** 2012. 105 f. Dissertação (Faculdade de Ciências Agrônomicas)–Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, 2012.

TEIXEIRA, G. C. da S.; STONE, L. F.; HEINEMANN, A. B. Eficiência do uso da radiação solar e índices morfofisiológicos em cultivares de feijoeiro. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 1, p. 9–17, 2015.

WALTER, L. C.; STRECK, N. A.; ROSA, H. T.; KRÜGER, C. A. M. B. Mudança climática e seus efeitos na cultura do arroz Climate change and its effects on rice. **Ciência**

Rural, Santa Maria, v. 40, n. 11, p. 2411–2418, 2010.

WANG, M.; WANG, L.; CUI, Z.; CHEN, X.; XIE, J.; HOU, Y. Closing the yield gap and achieving high N use efficiency and low apparent N losses. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 209, p. 39–46, 2017.

ZHANG, H. et al. The Productive Advantages and Formation Mechanisms of “ Indica Rice to Japonica Rice ”. **Scientia Agricultura Sinica**, Beijing. v. 46, n. 4, p. 686–704, 2013.