

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS CACHOEIRA DO SUL
CURSO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

Jonatas Ibagé Steinhaus

**DETECÇÃO PRECOCE DA PERDA DE MATÉRIA SECA DO MILHO
ARMAZENADA EM SILOS VERTICAIS**

Cachoeira do Sul, RS
2022

Jonatas Ibagé Steinhaus

**DETECÇÃO PRECOCE DA PERDA DE MATÉRIA SECA DO MILHO
ARMAZENADA EM SILOS VERTICAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria, Campus Cachoeira do Sul (UFSM-CS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Agrícola**.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Carteri Coradi

Cachoeira do Sul, RS
2022

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

AUTOR (A) : Jonatas Ibagé Steinhaus

ORIENTADOR (A) : Prof. Dr. Paulo Carteri Coradi

Aprovado pela Banca Examinadora como parte das exigências da disciplina de TCC, para obtenção do grau de Bacharel(a), pelo curso de Bacharelado em Engenharia Agrícola da UFSM/CS.



Prof. Dr. Paulo Carteri Coradi
UFSM Campus Cachoeira do Sul
SIAPE 1805482

Presidente da Banca Examinadora

Prof. (a) : Prof. Dr. Paulo Carteri Coradi



Zanandra Boff de Oliveira

Membro: Prof. Dra. Zanandra Boff de Oliveira



Lanes B. Acosta Jaques

Membro: Dra. Lanes Beatriz Acosta Jaques

Cachoeira do Sul, 07 de Fevereiro de 2022.

Dedico a minha família, futura esposa, amigos e colegas.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pela vida e por até aqui ter me sustentado, por ter me dado a força necessária para enfrentar os desafios que apareceram em meu caminho e a resiliência necessária para concluir a minha graduação.

Agradecer ao intenso trabalho e dedicação da minha família; ao meu pai Ibagé e minha mãe Gessi, que juntos se esforçaram ao máximo para me proporcionar o melhor durante toda a minha vida, e para que eu tivesse a oportunidade de ingressar e concluir o ensino superior.

A minha irmã Jordana que participou ativamente no meu desenvolvimento pessoal, que sempre acreditou em mim e foi uma incentivadora e torcedora fiel para que eu alcançasse os meus objetivos. A minha irmã Quézia por sempre estar disposta a me ajudar e me orientar no que fosse necessário, sempre colaborando para o meu desenvolvimento pessoal.

A minha vó Alcenira, por sempre estar pronta a me ajudar no que estivesse a seu alcance.

A minha noiva Lara que esteve ao meu lado desde muito antes dessa jornada e que se manteve ao meu lado durante todo o meu percurso acadêmico; sempre sendo uma pessoa excepcional, carinhosa, ombro amigo e incentivadora e que sempre acreditou que eu podia alcançar todos os meus objetivos.

Ao meu professor orientador e espelho profissional Paulo Carteri Coradi, pelas oportunidades, conselhos e orientações durante toda a minha jornada acadêmica.

A Universidade Federal de Santa Maria, a qual eu sinto imenso orgulho de fazer parte e serei eternamente grato.

Ao Laboratório de pós-colheita (LAPOS) pela disponibilidade na condução do experimento e dos materiais utilizados.

Ao CNPq e FAPERGS pelas bolsas concedidas.

Aos meus colegas de graduação e pesquisa; Amanda, Guilherme, Arthur, Leticia, Marisa, Douglas, Lanes, Sabrina, Vanessa, Dágila, Nairiane e Rosana por sempre me ajudarem.

Aos amigos e militares do 7º BIB de Santa Cruz do Sul que quando oportuno não mediram esforços para me auxiliar no início dessa caminhada.

*“Entrega o teu caminho ao SENHOR; confia
nele, e ele tudo fará.”*

Salmos 37:5

RESUMO

DETECÇÃO PRECOCE DA PERDA DE MATÉRIA SECA DO MILHO ARMAZENADA EM SILOS VERTICAIS

AUTOR: Jonatas Ibagé Steinhaus

ORIENTADOR: Prof. Dr. Paulo Carteri Coradi

A massa de grãos no ambiente de armazenamento constitui um ecossistema dinâmico, formado por elementos bióticos e abióticos que são afetados tanto quimicamente como biologicamente por diversos fatores, intrínsecos e extrínsecos. A temperatura, umidade relativa do ar e concentração de dióxido de carbono (CO₂) devem ser monitorados, uma vez que variações anormais em qualquer um desses fatores pode criar condições favoráveis para a deterioração dos grãos. Diante do exposto, o objetivo do trabalho foi monitorar os fatores abióticos que constituem o ecossistema de armazenamento, visando à detecção precoce da perda de matéria seca de grãos de milho armazenados em protótipos de silos verticais. O experimento foi realizado no Laboratório de Pós-Colheita da Universidade Federal de Santa Maria, Campus Cachoeira do Sul, a partir do armazenamento de grãos de milho com teores de água de 16, 14 e 12% em protótipos de silos verticais e monitoramento da temperatura do ar ambiente e intergranular, umidade relativa ambiente e intergranular e concentração de CO₂ na massa de grãos para determinação da perda de matéria seca dos grãos ao longo de 12 meses de armazenamento. Os grãos armazenados com teor de água de 16 e 14% alcançaram uma temperatura intergranular mais elevada, aumento da concentração de CO₂ e maiores perdas de matéria seca, quando comparado aos grãos armazenados com 12%. Conclui-se que o teor de água nos grãos influenciou na qualidade do milho durante o período de armazenamento uma vez que os grãos armazenados com teor de água superior a 12% sofreram com o aumento do seu processo respiratório resultando em uma maior perda de matéria seca e diminuição do tempo seguro de armazenamento. O monitoramento de CO₂ se mostrou eficaz no controle da qualidade de grãos de milho durante o armazenamento, uma vez que otimiza a detecção precoce da deterioração dos grãos.

Palavras-chave: Dióxido de carbono. Sensores. Temperatura da massa de grãos. Umidade de equilíbrio higroscópico. *Zea mays* L.

ABSTRACT

EARLY DETECTION OF THE LOSS OF CORN DRY MATTER STORED IN VERTICAL SILOS

AUTHOR: Jonatas Ibagé Steinhaus

ADVISOR: Prof. Dr. Paulo Carteri Coradi

The grain mass in the storage environment constitutes a dynamic ecosystem, formed by biotic and abiotic elements that are affected both chemically and biologically by several factors, intrinsic and extrinsic. Temperature, relative air humidity and carbon dioxide (CO₂) concentration must be monitored, as abnormal variations in any of these factors can create favorable conditions for grain deterioration. Given the above, the objective of this work was to monitor the abiotic factors that constitute the storage ecosystem, aiming at the early detection of dry matter loss of corn grains stored in prototypes of vertical silos. The experiment was carried out at the Post-Harvest Laboratory of the Federal University of Santa Maria, Campus Cachoeira do Sul, from the storage of corn grains with water contents of 16, 14 and 12% in prototypes of vertical silos and monitoring of the temperature, of ambient and intergranular air, ambient and intergranular relative humidity and concentration of CO₂ in the mass of grains to determine the loss of dry matter of the grains during 12 months of storage. The grains stored with water content of 16 and 14% reached a higher intergranular temperature, increased CO₂ concentration and higher dry matter losses, when compared to grains stored with 12%. It is concluded that the water content in the grains influenced the quality of the corn during the storage period, since the grains stored with a water content higher than 12% suffered from an increase in their respiratory process, resulting in a greater loss of dry matter, and decreased safe storage time. CO₂ monitoring proved to be effective in controlling the quality of corn grains during storage, as it optimizes the early detection of grain deterioration.

Keywords: Carbon dioxide. Sensors. Grain mass temperature. Hygroscopic equilibrium moisture. *Zea mays* L.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Fluxograma operacional de Unidade Beneficiadora e Armazenadora de Grãos...	13
FIGURA 2 – Evolução da produção e da capacidade estática de armazenamento de grãos do Brasil, 2000-2019.....	15
FIGURA 3 – Pressão de vapor e transferência de água entre produtos agrícolas e ar	20
FIGURA 4 – Protótipos de silos verticais utilizados para o armazenamento de grãos de milho	25
FIGURA 5 – Sensor modelo MZ-19 com infravermelho não dispersivo tipo NIR utilizado para a medição de dióxido de carbono (CO ₂).....	26
FIGURA 6 – A) Aberturas superiores do silo; B) Instalação do Sensor modelo MZ-19 na parte superior e interna do silo e do sensor do Termohigrômetro no centro da massa de grãos; C) Sensor do Termohigrômetro e D) Visão do Sensor modelo MZ-19 e sensor do Termohigrômetro durante o armazenamento.	26
FIGURA 7 – Temperatura e umidade relativa do ar ambiente obtidas ao longo do período de armazenamento dos grãos de milho.....	28
FIGURA 8 – Temperatura e umidade relativa do ar ambiente e do ar intergranular ao longo dos 12 meses de armazenamento dos grãos de milho	29
FIGURA 9 – Concentração de CO ₂ na massa de grãos em função da temperatura do ar ao longo do armazenamento de grãos de milho.....	30
FIGURA 10 – Umidade de equilíbrio higroscópico em função da: A) Temperatura do ar e B) Umidade relativa do ar ao longo do tempo de armazenamento dos grãos de milho.....	31
FIGURA 11 – Perda de matéria seca ao longo do armazenamento em função: (A) Temperatura do ar e B) Umidade relativa do ar ao longo do tempo de armazenamento dos grãos de milho.....	32
FIGURA 12 – Concentração de CO ₂ na massa de grãos em função da perda de matéria seca ao longo do armazenamento	33

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 Limites máximos de tolerância expressos em porcentual (%).....	18
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1	OPERAÇÕES DE PRÉ-PROCESSAMENTO E ARMAZENAMENTO DO MILHO.....	12
2.2	QUALIDADE DE GRÃOS DE MILHO ARMAZENADOS	17
2.3	FATORES QUE INFLUENCIAM NA QUALIDADE DOS GRÃOS	18
2.4	PROCESSO RESPIRATÓRIO	20
2.5	PERDA DE MATÉRIA SECA.....	21
2.6	MONITORAMENTO DA QUALIDADE DE GRÃOS DE MILHO ARMAZENADOS.....	22
3	MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1	CONDIÇÕES DO EXPERIMENTO.....	24
3.1.1	Monitoramento dos grãos armazenados.....	25
3.1.2	Estimativa de perda de matéria seca.....	27
3.1.3	Massa específica aparente	27
3.1.4	Porosidade intergranular	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
4.1	MONITORAMENTO DOS GRÃOS ARMAZENADOS	27
5	CONCLUSÕES.....	34
	REFERÊNCIAS.....	35

1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) pertence à família Poaceae e é um dos grãos mais cultivados no mundo devido ao seu alto potencial produtivo, composição química e valor nutricional que possibilita ser utilizado tanto no consumo humano e alimentação animal, como na produção de biocombustível. A cultura do milho vem ganhando espaço no cenário nacional e internacional, caracterizando-se como o segundo grão mais exportado pelo Brasil. Atualmente o terceiro país no ranking dos principais produtores mundiais, com produção de 109 milhões de toneladas, ficando atrás apenas da China e Estados Unidos, com produção de 260,67 e 360,25 milhões de toneladas, respectivamente (CONAB, 2021).

O sucesso da produção de grãos, se dá, em grande parte, pela fase de pós-colheita, que compreende as etapas de limpeza, secagem, beneficiamento e armazenamento e tem como finalidade manter a qualidade dos produtos até a comercialização. A capacidade estática de armazenamento, por sua vez, ainda é precária no Brasil e não suporta toda a produção. No ano de 2021, o déficit de armazenamento atingiu 110 milhões de toneladas de grãos, acarretando em perdas quanti e qualitativas aos produtores durante a colheita, no transporte e no valor do produto, uma vez que são obrigados a escoar a produção logo após a colheita ou armazenar seus produtos de forma incorreta.

O armazenamento de grãos de milho pode ser realizado em sacarias ou a granel. O armazenamento a granel em silos metálicos é predominantemente utilizado devido a economia de espaço físico, mão de obra reduzida, conservação do produto ensilado, menor custo de transporte, bem como, fácil controle de escoamento e abastecimento. A massa de grãos no ambiente de armazenamento constitui um ecossistema dinâmico, formado por elementos bióticos e abióticos que são afetados tanto quimicamente como biologicamente por diversos fatores, intrínsecos e extrínsecos à massa de grãos.

A temperatura, umidade relativa do ar e concentração de dióxido de carbono (CO₂) devem ser monitorados, uma vez que variações anormais em qualquer um desses fatores pode criar condições favoráveis para a deterioração dos grãos. Os sistemas de monitoramento da massa de grãos limitam-se a medição da temperatura da massa de grãos (sistema de termometria) e da inspeção manual e visual. Os sensores utilizados na termometria detectam a variação da temperatura em pontos equidistantes, logo, o avanço da deterioração muitas vezes já é significativo quando detectado. Tratando-se da inspeção manual e visual, esta pode ser tendenciosa e varia de operador para operador.

O monitoramento adequado da qualidade dos grãos armazenados e a consequente detecção precoce da deterioração poderá reduzir perdas e diminuir os índices de contaminações dos grãos. Portanto, métodos tecnológicos de monitoramento, que permitam a detecção da deterioração no início da atividade biológica poderiam ser desenvolvidos e incorporados nos protocolos de gerenciamento de grãos armazenados.

Estudos foram desenvolvidos com intuito de avaliar os efeitos da temperatura, teor de água, presença de insetos e fungos nos grãos em função da produção de CO₂ durante o armazenamento. Os grãos por serem organismos vivos respiram e quando influenciados por fatores abióticos aceleram sua atividade metabólica aumentando o processo respiratório e a produção de CO₂, logo, alterações nesta concentração podem ser detectadas com sensibilidade em cada ponto de amostragem. Diante do exposto, já foram desenvolvidos sensores capazes de mensurar a concentração de CO₂ da massa de grãos, além de medirem a temperatura e umidade relativa do ar, no entanto, ainda são necessários modelos capazes de prever a deterioração de grãos, o que ajudaria na tomada de decisões em relação ao tempo de armazenamento, preservando a qualidade dos grãos e reduzindo as perdas.

Portanto, mais estudos com a utilização de sensores de CO₂ são necessários para fornecer informações a respeito da aplicabilidade desta ferramenta no monitoramento de grãos armazenados, especialmente em silos metálicos, visando a eficiência do sistema. Assim, objetivou-se monitorar os fatores abióticos que constituem o ecossistema de armazenamento, visando à detecção precoce da deterioração e controle da qualidade de grãos de milho armazenados em protótipos de silos verticais durante doze meses de armazenamento.

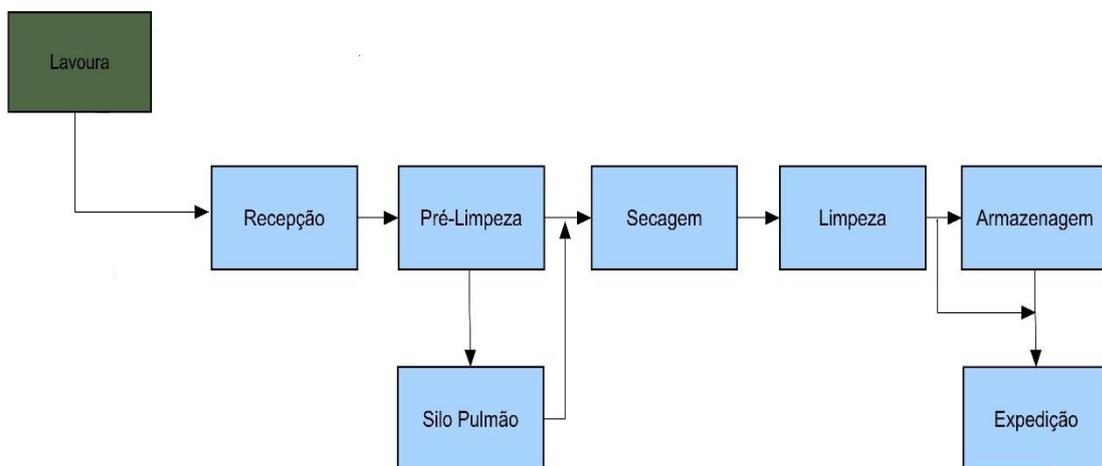
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 OPERAÇÕES DE PRÉ-PROCESSAMENTO E ARMAZENAMENTO DO MILHO

O sucesso da produção de grãos se dá, em grande parte, pela pós-colheita adequada. O termo pós-colheita refere-se ao conjunto de técnicas aplicadas à conservação dos produtos vegetais durante as etapas de limpeza, secagem e beneficiamento, visando evitar alterações físico-químicas indesejáveis (redução dos teores de proteína, teores de lipídios e aumento da acidez graxa, além de evitar danos físicos causados pelo ataque de insetos, proliferação de fungos e perda de matéria seca), a fim de proporcionar um armazenamento seguro e manter a qualidade dos produtos até a comercialização (OLIVEIRA, 2018)

O pré-processamento de grãos caracteriza-se pelas operações de recepção, limpeza, secagem, armazenagem e movimentação, e tem como objetivo garantir o abastecimento normal dos produtos durante a entressafra, além de diminuir suas perdas, tanto em qualidade como em quantidade. As instalações onde se realizam as operações de pré-processamento e armazenagem de grãos, são denominadas de Unidades Beneficiadoras de Grãos (UBG) (MILMAN, 2002). Para garantir um fluxo adequado (Figura 1), a UBG deve ser planejada com estruturas físicas e equipamentos, como moegas, silos pulmões, silos armazenadores, máquinas de pré-limpeza, máquina de limpeza, elevadores verticais e secadores, dispostos interligados entre si.

Figura 1 - Fluxograma operacional de uma Unidade Beneficiadora e Armazenadora de Grãos



Fonte: Autor.

A recepção dos grãos na unidade de armazenamento é fundamental para que seja realizada uma caracterização inicial. Ao chegar na UBG, a carga de grãos é submetida às operações de amostragem, pesagem e análises laboratoriais no setor de recepção, lugar que compreende as instalações de escritório, laboratório e balança rodoviária. Para a pesagem das cargas de grãos, utiliza-se um sistema de balança rodoviária onde são registradas informações como: tara do veículo, peso total, peso líquido, identificação do veículo, nome do proprietário da carga, produto transportado, horário de entrada e saída do veículo (OLIVEIRA, 2018).

A amostragem de grãos é a prática que consiste em obter uma porção representativa de um lote de grãos, a fim de conhecer a sua qualidade (INSTRUÇÕES PARA AMOSTRAGEM DE GRÃOS, 2015). A finalidade da amostragem é obter uma amostra de tamanho adequado

para os testes, na qual estejam presentes os mesmos componentes do lote a ser classificado e em proporções semelhantes. De acordo com os critérios estatísticos simples, as amostras são coletadas ao acaso, com auxílio de caladores mecânicos manuais ou pneumáticos. O número de calagens, por sua vez, é definido conforme o tamanho do veículo de carga (caminhão, carreta, entre outros) (CONAB, 2015).

A partir das análises laboratoriais (teor de água, impurezas e matérias estranhas, defeitos e determinação do grupo) dessas amostras, realizadas baseando-se no padrão estabelecido via Instrução Normativa nº 60, de 23/12/2011, que estabelece as especificações para a padronização, classificação e comercialização do milho, serão procedidas inferências sobre o estado da carga por completo. Desse modo, se a carga é indevidamente amostrada, os valores inferidos podem, por exemplo, subestimar os valores dos teores de impureza e de água (BRASIL, 2011).

Posteriormente, os grãos são submetidos a uma etapa de pré-limpeza, para remoção parcial das impurezas. Grãos colhidos com máquinas ou trilhadoras mecânicas apresentam elevada quantidade de impurezas (pedaços de ramos, folhas, palhas, torrões e poeira) (KONZEN; ROCHA, 2012). Visando facilitar e melhorar a eficiência dos sistemas de secagem, transporte, armazenagem e as demais operações de beneficiamento, as impurezas devem ser parcialmente eliminadas.

O teor de água adequado para o armazenamento depende da espécie e do período que se pretende armazenar os grãos, sendo que além do teor de água, fatores como temperatura, umidade relativa do ar, pragas e doenças podem interferir na qualidade. Se o milho for colhido com teor de água elevado (25-30%), é necessário ser submetido a uma etapa de secagem, que é conduzida até que os grãos atinjam teores seguros (12-14%) a fim de conservar as características físico-químicas e tecnológicas iniciais.

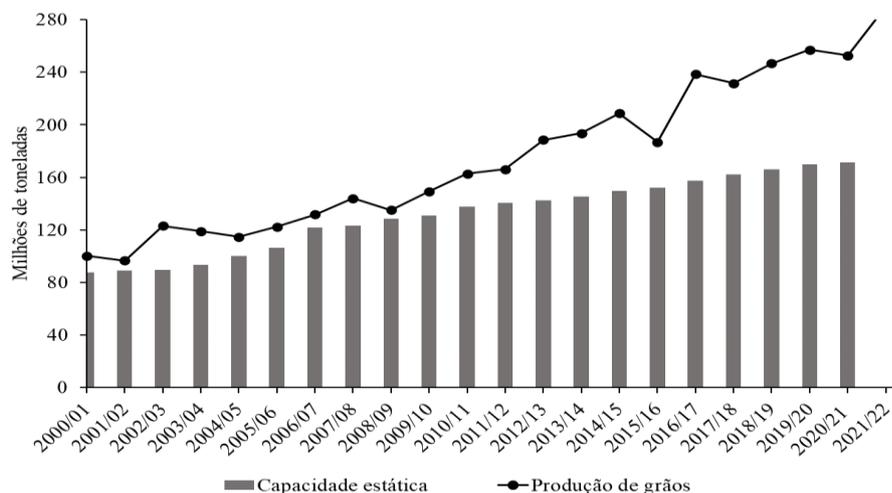
Para o armazenamento de milho, recomenda-se que os teores sejam inferior/es a 13% para armazenamento de até um ano e entre 12 e 11% para períodos superiores, sendo, portanto, indispensável a secagem no processo de armazenamento de grãos de milho. A secagem de grãos pode ser feita de diversas maneiras, sendo elas com movimentação dos grãos em sistemas contínuos e intermitentes, com fluxos de produtos e ar de secagem contracorrentes, concorrentes, cruzados, mistos, em sistemas de leitos fluidizados e camadas fixas. Para controle dos sistemas de secagem são monitoradas a temperatura do ar de secagem, a vazão de ar de secagem, o tempo de residência do produto no secador e os teores de água inicial e final do produto. A circulação de ar no secador é feita por sucção, utilizando ventiladores e exaustores (OLIVEIRA, 2018).

Após a secagem, caso necessário, os grãos de milho são submetidos a uma segunda etapa de limpeza, com objetivo de remover impurezas que ainda permaneceram junto aos grãos, estas quais podem ser remanescentes da pré-limpeza ou as produzidas pelo sistema de secagem. Esta operação caracteriza-se pela separação rigorosa de todos os materiais indesejáveis, como sementes ou grãos de outras espécies (cultivadas ou silvestres), sementes defeituosas e imaturas, sementes ou grãos quebrados, entre outros. Na operação de limpeza, usa-se, normalmente, uma máquina de ventilador e peneira, que, dependendo do rigor da separação, pode possuir várias peneiras e mais de um ventilador. A operação de limpeza deve reduzir os teores de matéria estranha e impureza para valores inferiores a 1%, a fim de garantir um armazenamento seguro.

O armazenamento, por ser uma das etapas de maior importância na pós-colheita, está presente em todo o circuito espacial dos produtos alimentares, tanto nos locais de produção, transporte in natura dos grãos, locais de industrialização, como nos estoques formados pelos atacadistas e varejistas, sem contar os grãos exportados e importados, demonstrando um papel de suma importância para a logística do agronegócio (FREDERICO, 2010).

Apesar da produção de grãos crescer a cada ano, a evolução de todos os elos da cadeia agroindustrial não ocorre no mesmo ritmo, visto que a capacidade estática de armazenamento não evolui significativamente. O Brasil vem enfrentando sérios problemas nesse setor, uma vez que a produção de grãos no país é maior do que a capacidade estática de armazenamento (Figura 2).

Figura 2 - Evolução da produção e da capacidade estática de armazenamento de grãos do Brasil, 2000-2019



Fonte: Conab (2021).

A falta de unidades de armazenamento aumentou os problemas, forçando os produtores a comercializar seus produtos a preços baixos de mercado, imediatamente após a colheita (CHEN et al., 2010; BOKUSHEVA et al., 2012; CORADI; LEMES, 2018).

De acordo com as recomendações da FAO, a capacidade de estática de armazenamento deve ser pelo menos 1,2 vezes maior que a produção anual. No entanto, a capacidade de armazenamento brasileira é de 180,6 milhões de toneladas, com um déficit de aproximadamente 110 milhões de toneladas em relação à produção (CONAB, 2021). As unidades responsáveis pelo recebimento da matéria-prima têm papel importante no agronegócio, especialmente no que se refere às políticas de escoamento e abastecimento de grãos, como importação e exportação de grãos.

O armazenamento de grãos de milho pode ocorrer em sacarias (armazenamento convencional) ou em estruturas que permitam o armazenamento a granel (AZEVEDO et al, 2008). No armazenamento convencional, os grãos de milho são estocados limpos e secos em sacos de 60 kg cada, tendo como vantagens o baixo custo de instalação, facilidade para segregar a produção e não precisar de técnicas aprimoradas no manuseio e conservação. Entretanto, este método de armazenamento apresenta limitações como o elevado preço da sacaria, impossibilidade de movimentar de forma automatizada os grãos e requerer um espaço maior para armazenamento. Tais limitações tornam o armazenamento em sacaria pouco utilizado, sendo destinado apenas para pequenos volumes de grãos (SCALEA, 2002).

O armazenamento a granel é predominantemente utilizado. Nesse caso os grãos são estocados em silos metálicos (estruturas verticais) e/ou em armazéns de alvenaria (estruturas horizontais). Os silos, bastante utilizados no armazenamento de grãos a granel, são estruturas individualizadas, construídas de chapas metálicas, concreto ou alvenaria e geralmente possuem forma cilíndrica.

O armazenamento de produtos em silos é considerado viável devido a diversos fatores como: economia de espaço físico, mão de obra reduzida, conservação do produto ensilado, menor custo de transporte, bem como fácil controle de escoamento e abastecimento (OLIVEIRA, 2018). Essas estruturas devem ser equipadas com sensores de termometria e/ou de detecção de dióxido de carbono (CO₂), que auxiliam no monitoramento e conservação dos grãos durante o armazenamento (ILELEJI et al., 2006; UBHI; SADAKA, 2015; ANTUNES et al., 2016; CORADI et al., 2016b).

O sistema de expedição consiste em um depósito elevado abaixo do qual é estacionado para carregamento caminhões ou vagões ferroviários. O depósito pode ser construído em concreto, chapas metálicas, ou ainda ser empregado silos metálicos. Todas essas estruturas

devem possuir fundo inclinado para propiciar a descarga por gravidade com fluxo de aproximadamente 360 toneladas de produto por hora (SILVA, 2009).

2.2 QUALIDADE DE GRÃOS DE MILHO ARMAZENADOS

A qualidade de armazenamento depende da qualidade inicial dos grãos, uma vez que no ambiente de armazenamento, a massa de grãos constitui um ecossistema dinâmico, formado por elementos bióticos (grãos, insetos e microflora) e abióticos (impurezas, ar intergranular, vapor de água e estrutura de armazenagem) que são afetados, tanto química como biologicamente por diversos fatores, intrínsecos e extrínsecos à massa de grãos (BROOKER et al., 1992; RAUDIENE et al., 2017), como temperatura, teor de água nos grãos, umidade relativa, atmosfera de armazenamento, conteúdo de grãos quebrados, conteúdo de impureza, presença de microrganismos, insetos, ácaros e tempo de armazenamento, estes quais podem reduzir a qualidade do grão (REED et al., 2007; REHMAN et al., 2002; PARAGINSKI et al., 2014a; PARAGINSKI et al., 2014b; PARAGINSKI et al., 2015; CORADI et al., 2016a; LANE; WOLOSHUK, 2017; PARAGINSKI, 2019).

A qualidade física e o valor comercial dos grãos de milho estão diretamente relacionados à integridade do grão em relação à presença de defeitos (trincas, fissuras, grãos quebrados e impurezas), geralmente produzidas por dano mecânico (durante a colheita e a movimentação do grão), ou por dano térmico (altas temperaturas) no processo de secagem. Os grãos quebrados e trincados que possuam qualidade nutricional satisfatória, por sua vez, são processados e beneficiados, para obtenção de alimentos derivados de milho, ou ainda, destinados à ração animal.

No Brasil, os critérios para classificação comercial dos grãos de milho são estabelecidos pela instrução normativa nº60 instituída pelo Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2011). Nela o milho é classificado em três tipos, onde é levado em consideração, principalmente, o índice de grãos avariados (ardidos, chochos, imaturos, fermentados, germinados, gessados ou mofados), quebrados, com matérias estranhas ou impurezas e carunchados (Tabela 1).

Tabela 1 - Limites máximos de tolerância expressos em porcentual (%)

Enquadramento	Grãos avariados		Grãos quebrados	Matérias estranhas e impurezas	Carunchados
	Ardidos	Total			
Tipo 1	1,00	6,00	3,00	1,00	2,00
Tipo 2	2,00	10,00	4,00	1,50	3,00
Tipo 3	3,00	15,00	5,00	2,00	4,00
Fora de Tipo	5,00	20,00	Maior que 5,00	Maior que 2,00	8,00

Fonte: Brasil (2011).

A classificação comercial dos grãos milho, de maneira geral, determina sua qualidade física, a qual é relacionada com a integridade do material e com sua pureza. Contudo, com o intuito de obter uma melhor caracterização do material, é possível determinar parâmetros adicionais (SILVA et al., 2015b).

2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA QUALIDADE DOS GRÃOS

A temperatura é um dos principais fatores que interferem a qualidade dos grãos durante o armazenamento (REHMAN et al., 2002; REED et al., 2007; PARK et al., 2012), uma vez que todos os fatores que ameaçam a perda de qualidade dos grãos, causam seu aumento. Assim, o monitoramento constante da temperatura dos grãos pode impedir um processo de deterioração. Além disso, a temperatura dos grãos armazenados é um bom índice do seu estado de conservação, sendo que toda variação brusca de temperatura deve ser encarada com bastante cautela e sua causa pesquisada o quanto antes, visando saná-la através da aeração ou transilagem (SCHIAVON et al., 2019).

A redução da temperatura dos grãos diminui a velocidade das reações bioquímicas e metabólicas dos grãos, pelas quais reservas armazenadas no tecido de sustentação são desdobradas, transportadas e ressintetizadas no eixo embrionário, permitindo a manutenção das características iniciais de armazenamento dos grãos por períodos mais longos (PARAGINSKI; ROCKENBACH; SANTOS; ELIAS; OLIVEIRA, 2015).

O teor de água nos grãos é um dos fatores de maior influência no processo de deterioração dos grãos (RAUDIENE et al, 2017), tanto que, ao manter baixos os seus níveis, os demais terão

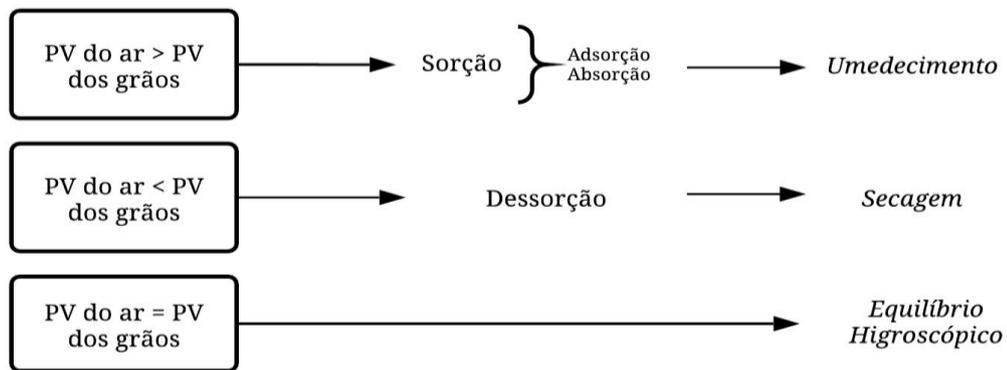
seus efeitos gradualmente diminuídos: menor ataque de microrganismos e diminuição da respiração dos grãos. Entretanto, a redução da quantidade de água dos grãos é apenas um dos requisitos para um armazenamento seguro, que deve estar associado a outras técnicas de pós-colheita como a limpeza dos grãos, limpeza dos equipamentos e das estruturas de armazenamento, controle de pragas e da temperatura de armazenamento (WU et al., 2020; CORADI et al., 2016a; PARAGINSKI et al., 2014a).

O teor de água em que os grãos começam a respirar mais intensamente é chamado de umidade crítica (14,5-15%). Quando o teor de água dos grãos excede um valor crítico, forma-se orvalho, iniciando atividades de hidrólise, respiração e enzima (JUODEIKIENE et al., 2011). Devido aos fatores ambientais físicos, químicos e biológicos, grãos e outros alimentos crus podem começar a se deteriorar imediatamente após a colheita (KALETA; GÓRNICKI, 2013).

Durante o período de armazenamento, o teor de água dos grãos varia em função dos grãos que tendem ao equilíbrio higroscópico, mudando de acordo com a umidade relativa e a temperatura do ar (LIMA et al., 2016). A umidade de equilíbrio higroscópico (U_e) e a perda de matéria seca (P_{ms}) são parâmetros comumente utilizados para determinar o conteúdo de água para garantir um armazenamento seguro, bem como prever a capacidade de armazenamento de diferentes produtos (CHITRAKAR et al., 2006; CORADI et al., 2015a).

O equilíbrio higroscópico caracteriza-se pelo teor de água no qual a pressão de vapor de água no produto é igual à pressão de vapor do ar que o envolve. Os produtos agrícolas possuem a propriedade de realizar trocas de água sob a forma de vapor, com o ambiente que os envolve. Essas trocas podem acontecer por meio do ganho ou da perda de água, fenômenos conhecidos, respectivamente, por sorção e dessorção (Figura 3), de acordo com as características higroscópicas do produto e do ar. A afinidade existente entre a água e os outros componentes (gordura, amido, açúcar, proteínas, etc.) de um produto define sua higroscopicidade (BROOKER et al., 1992). Portanto, faz-se importante o conhecimento das relações existentes entre o produto, a temperatura e a umidade relativa do ar objetivando estabelecer condições que amenizem prováveis alterações físicas, químicas, microbiológicas e fisiológicas durante o armazenamento.

Figura 3 - Pressão de vapor e transferência de água entre produtos agrícolas e ar



Fonte: Autor.

Para um produto com determinada composição, a relação de teor de umidade de equilíbrio (U_e) descreve como o teor de água dos grãos muda com a umidade relativa (UR) e a temperatura do ar que envolve o material. Para materiais higroscópicos a uma temperatura constante, a U_e aumenta à medida que a UR aumenta. Para uma UR constante, a U_e diminuiu à medida que a temperatura aumenta (BROOKER et al., 1992).

2.4 PROCESSO RESPIRATÓRIO

Os grãos, depois de colhidos, continuam a viver e, como todos os organismos vivos, eles respiram, acarretando no incremento na taxa respiratória, esta qual é proporcional ao aumento da temperatura, que depende diretamente do teor de água dos grãos. Esse processo oxidativo desencadeia transformações contínuas nos grãos, uma vez que a matéria orgânica, quando em contato com o oxigênio, transforma-se em CO_2 e H_2O , liberando energia em forma de calor, resultando em um ambiente mais propício para a infestação dos insetos-praga, ácaros, infecção por fungos, variações físico-químicos e fisiológicas, entre outros problemas. A combustão completa da glicose está especificada a seguir (Eq. 1):



A respiração do grão ocasiona o consumo da sua matéria seca e da consequente perda de nutrientes, além disso, ocorre a geração de CO_2 . Para a determinação da perda de matéria seca ao longo do armazenamento estas quantidades molares foram determinadas por meio das

concentrações de CO₂ produzido e de O₂ presente dentro dos silos ao longo do período de armazenamento.

A massa de grãos armazenadas em um ecossistema com a presença de oxigênio intergranular submete-se a um processo respiratório (MAIER et al., 2010). A concentração de CO₂ e a liberação de calor e água ocorrem em função da intensidade do processo respiratório da massa de grãos (HUANG et al., 2013). A intensidade da respiração da massa de grãos ocorre em função das características intrínsecas e extrínsecas do produto, como teores de água e temperaturas dos grãos, temperatura do ar e umidade relativa intergranular e do ambiente externo de armazenamento, bem como, a característica da própria estrutura (NEETHIRAJAN et al., 2010).

O crescimento de fungos durante o armazenamento praticamente zera em valores de UR inferiores a 70% (SULEIMAN et al., 2013). Logo, o teor de água para um armazenamento seguro é definido como o teor de água em equilíbrio com ar intergranular com uma UR em torno de 65-67%. Uma vez que os fungos estão ativos (ou seja, o produto é armazenado acima do teor de água máximo para um armazenamento seguro), a respiração aumenta produzindo calor e umidade que aumentam o teor de água e a temperatura do material acelerando assim o processo de deterioração (BROOKER et al., 1992; JIAN et al., 2014; OCHANDIO et al., 2017).

A respiração dos microrganismos está associada à decomposição de carboidratos, gorduras e outros compostos dos produtos armazenados, e geralmente é quantificada como perda de matéria seca (RUKUNUDIN et al., 2004; JIAN et al., 2014).

2.5 PERDA DE MATÉRIA SECA

A perda de matéria seca ou quebra técnica acontece na massa de grãos ou sementes armazenadas e diz respeito a perda de peso ao longo do período de armazenamento. Esta perda ocorre devido às reações químicas de oxidação, durante o processo respiratório, as quais consomem energias acumuladas sob forma de compostos orgânicos como os açúcares, amidos e outros, diminuindo de forma efetiva a massa e, portanto, o peso do produto (KALETA; GÓRNICKI, 2013).

Para Cardoso et al. (2012), o processo de deterioração é inevitável, mas pode ser retardado dependendo das condições de armazenamento e das características do grão ou semente. A liberação de CO₂ pelos grãos representa a quebra técnica do produto, sendo que a presença de fungos acelera este processo, ainda mais rapidamente em ambientes úmidos e quentes. A quebra

técnica pode ser ocasionada devido ao ataque de insetos, pássaros ou roedores, movimentação do produto, tipo de estrutura armazenadora, entre outros fatores.

O nível aceitável de perda de matéria seca é controverso, mas alguns autores assumem valores de 0,1% a 0,5% (BERN et al., 2002; ATUNGULU et al., 2017; SULEIMAN et al., 2018). No Brasil, levando em conta experiências práticas em unidades de armazenamento, foi estabelecido um índice oficial de quebra técnica de 0,15% por mês de armazenamento (BAUDET; VILLELA, 2000).

2.6 MONITORAMENTO DA QUALIDADE DE GRÃOS DE MILHO ARMAZENADOS

As perdas de grãos na pós-colheita devido à deterioração durante o armazenamento continuam sendo um grande problema em todo o mundo (HUANG et al., 2013). O monitoramento adequado da qualidade dos grãos armazenados e a consequente detecção precoce dos estragos visa reduzir perdas quanti e qualitativas, diminuir a produção de micotoxinas na cadeia alimentar e evitar perdas financeiras, a partir do gerenciamento oportuno do armazenamento (ILELEJ et al., 2006).

Os níveis de temperatura, pressão atmosférica, umidade relativa, dióxido de carbono (CO_2) e oxigênio (O_2) devem ser monitorados, uma vez que variações anormais em qualquer um desses fatores pode criar condições favoráveis para a deterioração dos grãos.

Os sistemas de monitoramento das condições de armazenamento comumente utilizados limitam-se ao uso da termometria e inspeção manual e visual (NAVARRO; NOYES, 2002; GONZALES et al., 2009). O sistema de termometria é de suma importância, visto que a temperatura é um dos principais fatores que interferem a qualidade dos grãos armazenados. Esse sistema é constituído por uma rede de sensores de temperatura, dispostos simetricamente na massa de grãos (KHATCHATOURIAN et al., 2017; BINELO et al., 2019). Avanço tecnológico quanto ao emprego de recursos de comunicação wireless e automação de processos, utilizando microprocessadores, atuadores e sensores digitais, têm proporcionado melhora nas ferramentas de monitoramento e gestão dos ecossistemas de armazenagem de grãos a granel, como os silos e armazéns.

Os cabos termométricos são utilizados pois os microrganismos produzem grande quantidade de calor no local de deterioração, no entanto, o monitoramento da temperatura geralmente não é sensível o suficiente devido às baixas difusões térmicas em grãos a granel, acarretando na detecção da variação de temperatura até poucos metros de distância, logo, o avanço da deterioração muitas vezes já é significativo quando detectado (GONZALES et al.,

2009; FERRASA et al., 2010). Tratando-se da inspeção manual e visual, esta pode ser tendenciosa e varia de operador para operador.

Os sensores de CO₂ outrora eram caros, volumosos e imprecisos, entretanto, recentemente foram aperfeiçoados tecnologicamente, o que os tornou precisos e acessíveis (MAIER et al., 2006). Nos últimos anos, devido à sua sensibilidade e confiabilidade, a medição da concentração de CO₂ como indicador da qualidade de alimentos durante o armazenamento atrai cada vez mais atenção. Vários métodos podem ser usados para medir a concentração de CO₂, tais como absorção química, cromatografia gasosa, sensores eletroquímicos e métodos ópticos (NEETHIRAJAN et al., 2009). Estes métodos têm precisão e sensibilidade diferentes, e são usados para medir CO₂ em diferentes condições (ZHANG et al., 2014) e para diferentes objetivos (REUSS et al., 1994).

Os dispositivos de medição de concentração de CO₂ mais comuns utilizam cromatografia gasosa, espectrometria de massa, sensores eletroquímicos ou ópticos (ZHANG et al., 2014; NEETHIRAJAN et al. 2009; REUSS et al., 1994; NEETHIRAJAN et al., 2010). A cromatografia gasosa e a espectrometria de massa são técnicas de medição bastante complexas, normalmente utilizadas em condições laboratoriais. Dependendo do princípio de medição, os sensores de CO₂ podem ser divididos em ópticos e eletroquímicos. Sensores eletroquímicos, como óxido de metal, NASICON (condutor super íon de sódio) ou polimérico, alteram parâmetros elétricos como a impedância, tensão potencial, entre outros, sendo esta alteração medida por um circuito elétrico (NEETHIRAJAN et al., 2010).

Os sensores ópticos são classificados em absorção de infravermelhos (IR), fibra e sol-gel. Os sensores de gás de fibra óptica têm a camada quimicamente sensível na extremidade da fibra óptica, que muda suas propriedades ópticas de acordo com a concentração de CO₂. Os sensores ópticos de CO₂ sol-gel utilizam a fita com um indicador de pH fluorescente. Com esta fita é medida a intensidade de luminosidade. Os sensores ópticos IR podem ser divididos em espectroscopia de infravermelhos dispersiva, não dispersiva e Fourier (FTIR). O princípio de todos os instrumentos de espectroscopia IR é a medição da absorção em um ou mais comprimentos de onda (NEETHIRAJAN et al., 2010).

A maioria dos sensores de CO₂ comercializados são não dispersivos do tipo IR (NIR). Os sensores NIR são menos complexos na estrutura e mais fáceis de usar. O princípio de operação é baseado na absorção de CO₂ na faixa de RI. Os sensores de gás infravermelho se destacam de outros dispositivos de medição analítica devido ao seu menor custo, tamanho pequeno, gestão simples do processo e possíveis medições contínuas (NEETHIRAJAN et al. 2009).

Alterações na concentração de CO₂ podem ser detectadas com sensibilidade em cada ponto de amostragem e podem ser consideradas como um indicador das atividades de insetos no armazenamento de grãos (ZHANG et al., 2014). Segundo Garcia-Cela (2019) a produção de CO₂ é maior nos grãos contaminados por fungos. Sendo assim, a concentração de CO₂ pode ser usada como indicador precoce do início da atividade de fungos e consequente produção de micotoxinas na massa de grãos.

De acordo com Maier et al. (2006) e Ileleji et al. (2006) o monitoramento da termometria por si só não é um indicador confiável das condições dos grãos nas estruturas de armazenamento, enquanto que os sensores de CO₂, utilizados na parte superior do silo, são uma alternativa viável como “aviso prévio” da deterioração dos grãos e fornecem informações importantes para a tomada de decisão.

Em estudo realizado por Maier et al. (2010), com grãos de milho, a resposta da utilização de sensores de CO₂ em condições de campo também foi positiva. Salientaram ainda que a detecção da deterioração pelos sensores de CO₂ se dá muito antes que os sensores tradicionais como inspeções visuais, cabos de odores e temperatura, o que evidencia sua eficácia para proteger as perdas econômicas durante o armazenamento.

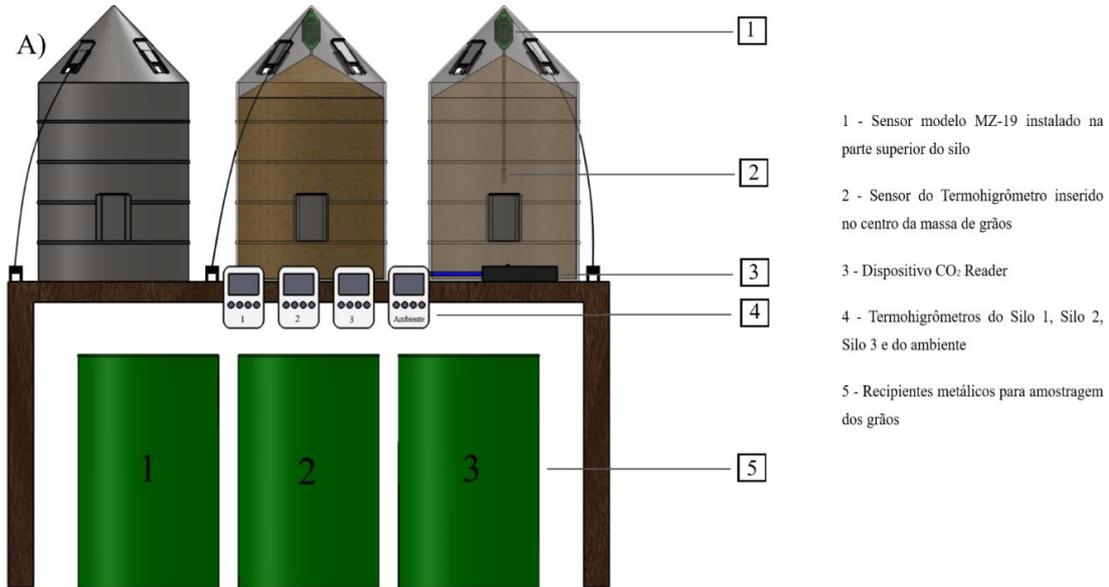
A concentração de CO₂ medido em um volume armazenado pode ser comparada com a concentração de CO₂ do ar ambiente (cerca de 400 ppm) como padrão para interpretar as leituras (SINGH et al., 1984).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CONDIÇÕES DO EXPERIMENTO

O experimento foi realizado no Laboratório de Pós-Colheita (LAPOS) da Universidade Federal Santa Maria (UFSM), Campus Cachoeira do Sul (CS); os dados foram obtidos por meio de monitoramento através de termohigrômetros e Dispositivos CO₂ Reader. Os grãos de milho utilizados foram obtidos com teor de água em torno de 30% e secos em secador de amostras, com temperatura do ar de secagem de 40 °C até os teores de água de 16, 14 e 12%. Os grãos foram limpos manualmente e armazenados em protótipos de silos verticais (Figura 4), com capacidade de 25 litros, preenchidos com aproximadamente 20 kg de amostra. Para amostragem, em paralelo os grãos foram armazenados em recipientes metálicos, no mesmo ambiente, com capacidade de 45 litros (preenchidas com cerca de 20 kg), com 4 aberturas nas tampas superiores para simular as condições dos protótipos.

Figura 4 – Protótipos de silos verticais utilizados para o armazenamento de grãos de milho



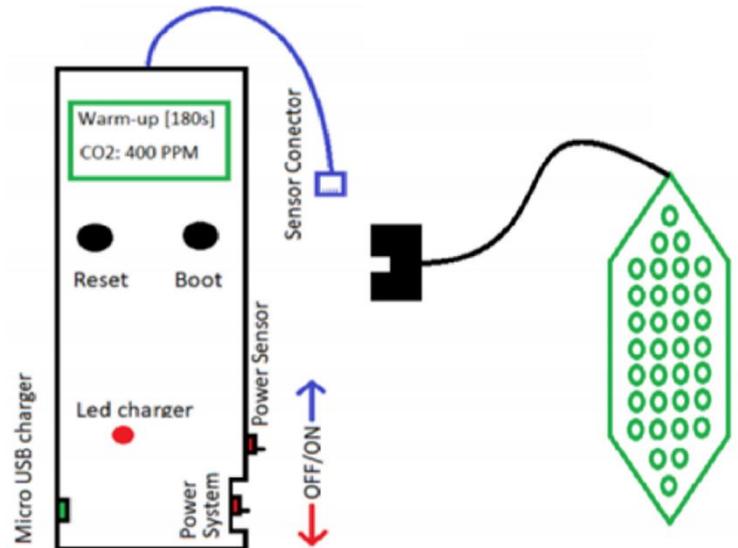
Fonte: Autor.

Os silos possuem 4 aberturas superiores, simulando os suspiros comumente encontrados nos silos metálicos e são equipados com Termohigrômetro e Dispositivo CO₂ Reader para monitoramento dos grãos armazenados.

3.1.1 Monitoramento dos grãos armazenados

Os dados de concentração de CO₂ da massa de grãos e temperatura e umidade relativa do ar ambiente, temperatura e umidade relativa do ar intergranular foram coletados diariamente durante 12 meses, três vezes ao dia: manhã (9h), tarde (15h) e noite (21h) Para a medição de dióxido de carbono (CO₂) foram utilizados sensores modelos MZ-19 com infravermelho não dispersivo tipo NIR (Figura 5), com faixa de medição de 0 a 5000 ppm e precisão de +- 3% do valor lido. A leitura da concentração de CO₂ foi realizada em display do tipo CO₂ Reader com alimentação independente e bateria interna. Os sensores que acompanham o CO₂ Reader foram devidamente calibrados na faixa de 400 ppm, considerando a concentração de CO₂ em ambiente natural, seguindo os procedimentos descritos pelo fabricante. Antes das instalações foram realizados testes preliminares para coletar informações dos sensores e verificar se ambos estavam funcionando adequadamente.

Figura 5 - Sensor modelo MZ-19 com infravermelho não dispersivo tipo NIR utilizado para a medição de dióxido de carbono (CO₂)



Fonte: Autor.

Os sensores de CO₂ foram instalados na parte superior e interna de cada silo armazenador, de maneira suspensa no chapéu e acima da massa de grãos. Os dados de temperatura e umidade relativa do ar ambiente, temperatura e umidade relativa do ar intergranular foram obtidos através de um termohigrômetro marca TLX, modelo DTH-16 (Shenzhen Tonglixing Technology Co, Ltda, Guangdong, China) instalado no centro da massa de grãos (Figura 6).

Figura 6 - A) Aberturas superiores do silo; B) Instalação do Sensor modelo MZ-19 na parte superior e interna do silo e do sensor do Termohigrômetro no centro da massa de grãos; C) Sensor do Termohigrômetro e D) Visão do Sensor modelo MZ-19 e sensor do Termohigrômetro durante o armazenamento



Fonte: Autor.

3.1.2 Estimativa de perda de matéria seca

O modelo utilizado para a estimativa da perda de matéria seca pode ser representado pela Eq. 2:

$$P_{ms} = 100(CO_2 - O_2) \left(\frac{\varepsilon P W_g}{2 p_g (1 - M_{cd}) R T} \right) \quad (2)$$

Em que P_{ms} , é a perda de matéria seca (%); O_2 e CO_2 são, respectivamente, a concentração de oxigênio comumente encontrada no ar (21%) e de CO_2 medida durante o armazenamento (v/v); ε é a porosidade intergranular (%); P é a pressão atmosférica local (96 kPa); W_g e P_g são a massa molar da glicose (180 kg kmol^{-1}) e massa específica aparente dos grãos (kg m^{-3}); M_{cd} é o teor de água dos grãos (decimal b.u.); R é a constante dos gases perfeitos ($8,314 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) e T é a temperatura intergranular ($^{\circ}\text{K}$).

3.1.3 Massa específica aparente

A massa específica aparente (kg m^{-3}) determinada com o auxílio de uma balança de peso hectolitro, da marca *Dallemole*, com capacidade de 0,25 L (250 mL), a partir de oito repetições para cada tratamento. Após o preenchimento e pesagem determinou-se a massa específica aparente (ρ_{ap}) por meio da relação da massa (kg) e volume (m^3) (BRASIL, 2009).

3.1.4 Porosidade intergranular

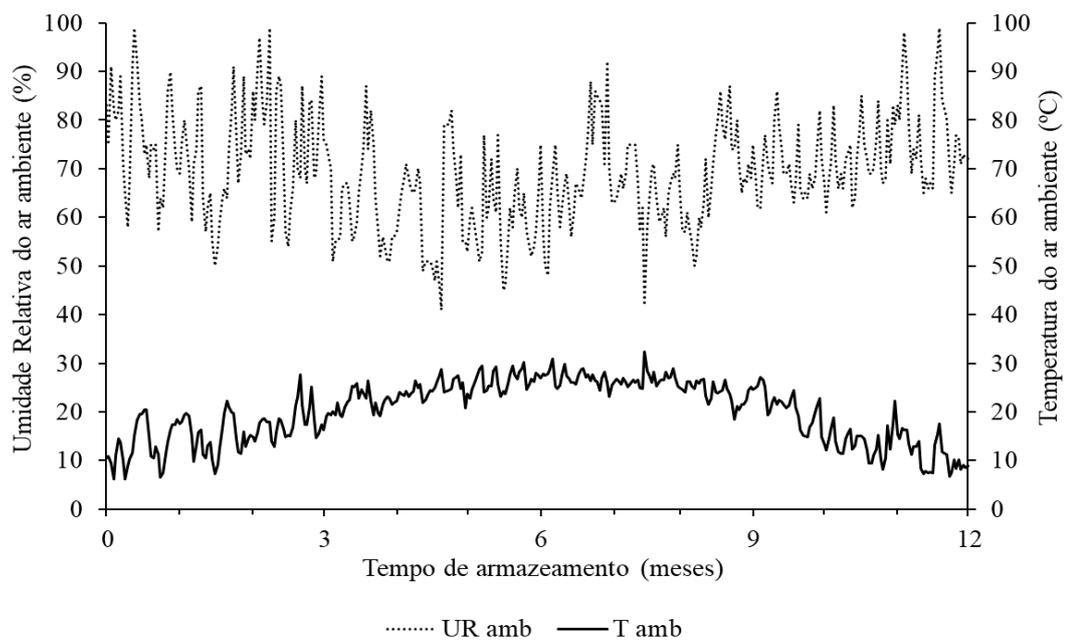
A porosidade intergranular foi obtida pelo método direto, em que foram utilizadas duas provetas de 100 mL e óleo de soja. Na primeira proveta foram colocados os grãos até atingirem a marca de 100 mL e na outra 100 mL de óleo de soja. O óleo foi colocado junto aos grãos na primeira proveta. Conhecendo-se o volume de líquido necessário para preencher os espaços vazios da massa de grãos, chega-se na porosidade intergranular (%).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MONITORAMENTO DOS GRÃOS ARMAZENADOS

Na Figura 7 observaram-se as variações de temperatura e umidade relativa do ar ambiente ao longo do período de armazenamento de 12 meses. Verificou-se que a temperatura teve amplitudes de 6,1 a 35°C e a umidade relativa do ar de 40 a 99%, os quais podem ter influenciado no armazenamento dos grãos de milho em função do aumento ou diminuição das trocas gasosas com o ar intergranular.

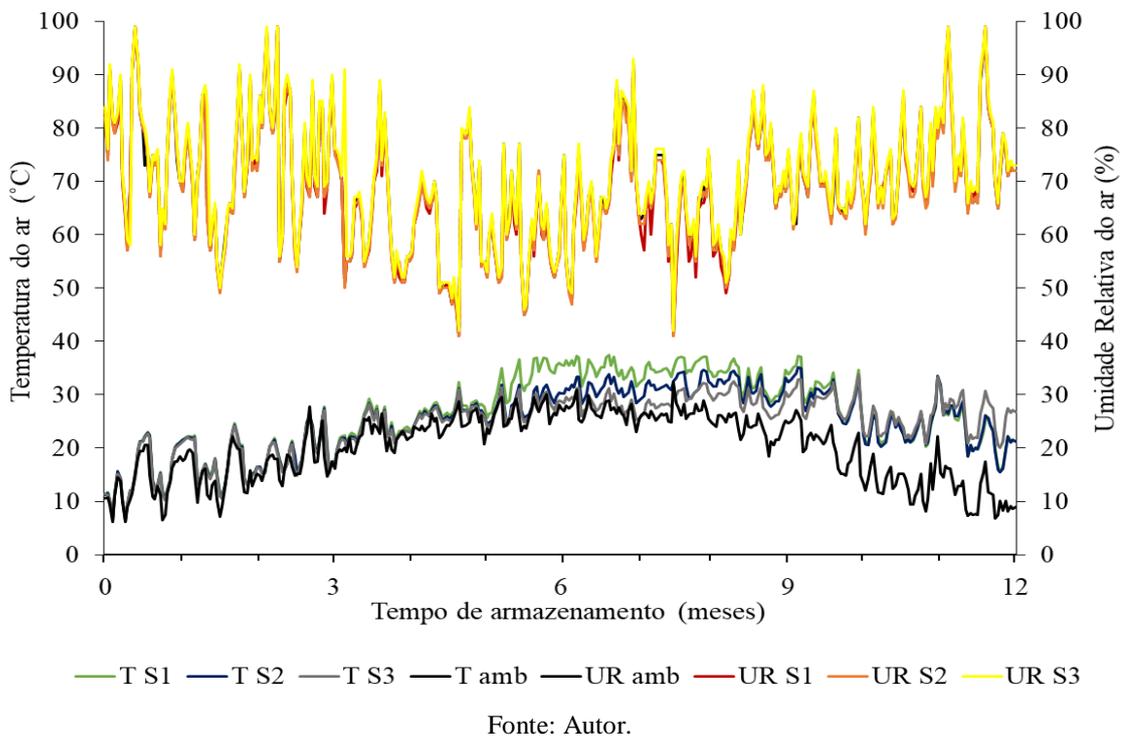
Figura 7 - Temperatura e umidade relativa do ar ambiente obtidas ao longo do período de armazenamento dos grãos de milho



Fonte: Autor.

A temperatura e umidade relativa do ar ambiente e do ar intergranular ao longo dos 12 meses de armazenamento de grãos de milho são apresentadas na Figura 8. A umidade relativa do ar intergranular sofreu variações ao longo do armazenamento em todos os tratamentos (S1, S2 e S3), entretanto, entre as temperaturas dos tratamentos e o ar ambiente pouca diferença foi observada. A temperatura do ar intergranular é um dos fatores mais importantes na conservação dos grãos armazenados, uma vez que a intensidade da respiração, a deterioração dos grãos e a perda de componentes nutricionais é acelerada com o seu acréscimo (LIU; ZHU, 2017). Ao longo do armazenamento, a temperatura do ar intergranular variou de 6,7 a 38,4, 6,5 a 35,8 e 6,4 a 34,5°C para os tratamentos S1, S2 e S3, respectivamente. Entre os tratamentos, por sua vez, até os cinco meses de armazenamento, não foi observada grandes variações.

Figura 8 - Temperatura e umidade relativa do ar ambiente e do ar intergranular ao longo dos 12 meses de armazenamento dos grãos de milho

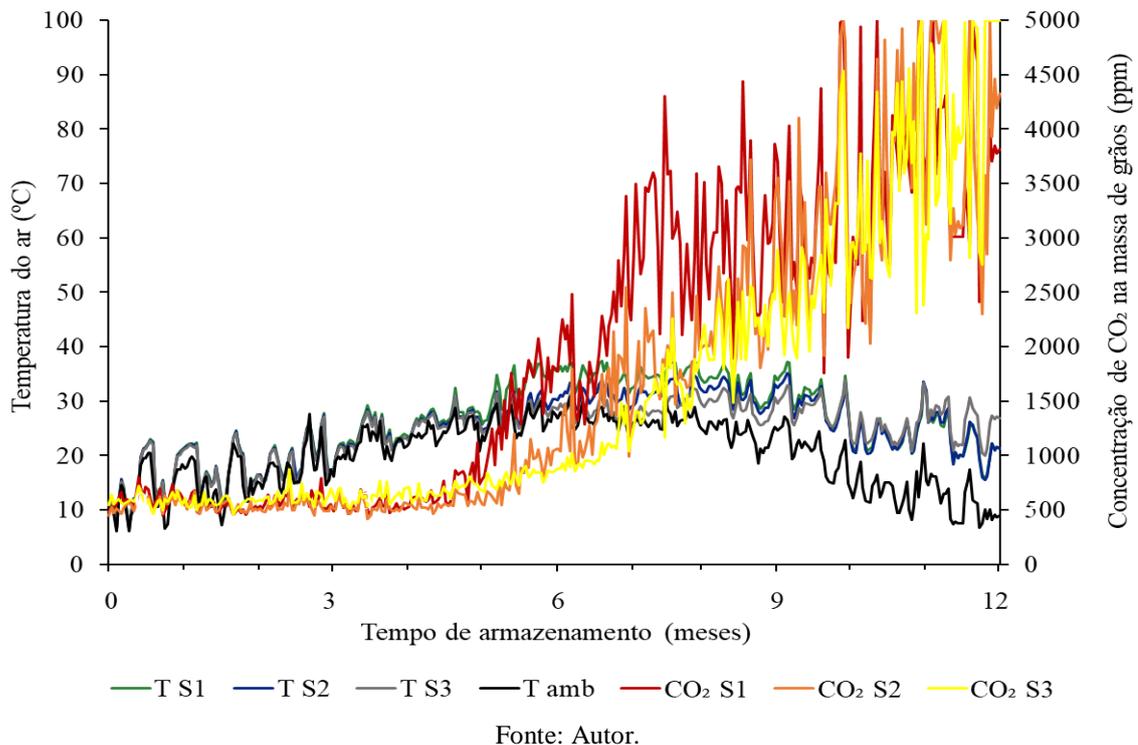


A partir dos cinco meses de armazenamento, observou-se aumento das temperaturas do ar intergranular, em uma relação direta com os tratamentos com maiores teores de água iniciais dos grãos. O teor de água dos grãos é, juntamente com a temperatura, fator primordial na manutenção da qualidade dos grãos armazenados (CHELLADURAI et al., 2016; SILVA et al., 2018; MACIEL et al., 2020).

A concentração de CO₂ advinda do processo respiratório dos grãos e dos microrganismos associados pode ser observada na Figura 9 em função da temperatura e umidade relativa do ar, ao longo dos 12 meses de armazenamento.

A média da temperatura do ar intergranular até os cinco meses de armazenamento foi de 20,8 °C e a concentração de CO₂ da massa de grãos se manteve entre 500 e 600 ppm para todos os tratamentos (Figura 9). Segundo Maier et al. (2010), este valor ainda é considerado seguro para o armazenamento. O mesmo autor afirma que as concentrações mais altas de CO₂ indicam atividade biológica acima do normal e correlaciona que as concentrações de 600 a 1200 ppm indicam o início da infecção por fungos e de 1500 a 4000 ppm ou mais indicam claramente infecção por fungo grave e/ou infestação de insetos.

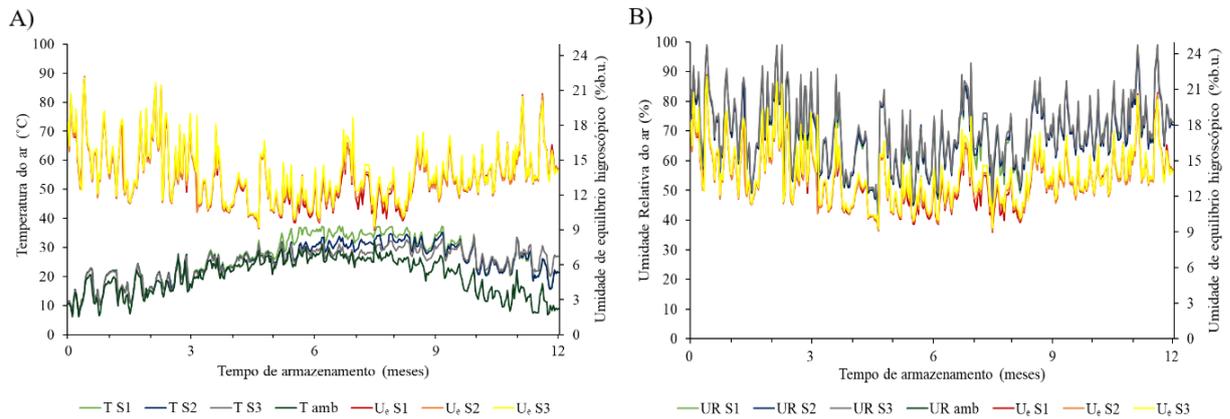
Figura 9 - Concentração de CO₂ na massa de grãos em função da temperatura do ar ao longo do armazenamento de grãos de milho



A partir dos cinco meses de armazenamento, precedendo ao aumento da temperatura intergranular, a concentração de CO₂ começou a aumentar. A média da concentração de CO₂ na massa de grãos ao longo do armazenamento nos tratamentos S1, S2 e S3 foi de 1639, 1029 e 888 ppm, respectivamente. Esses valores indicam que o teor de água inicial dos grãos influenciou na concentração de CO₂ na massa de grãos, sendo maior para os grãos armazenados com 16% de teor de água, seguidos por grãos armazenados com teores de água de 14 e 12%. Raudiene et al. (2017), ao estudarem as taxas de respiração e a concentração de dióxido de carbono no trigo em função de diversas temperaturas e teores de água, constataram que os grãos com teores de água maiores tiveram maior intensidade respiratória, quantificadas pelas concentrações de CO₂.

A umidade de equilíbrio higroscópico em função da temperatura do ar e da umidade relativa do ar pode ser visualizada na Figura 10.

Figura 10 - Umidade de equilíbrio higroscópico em função da: A) Temperatura do ar e B) Umidade relativa do ar ao longo do tempo de armazenamento dos grãos de milho



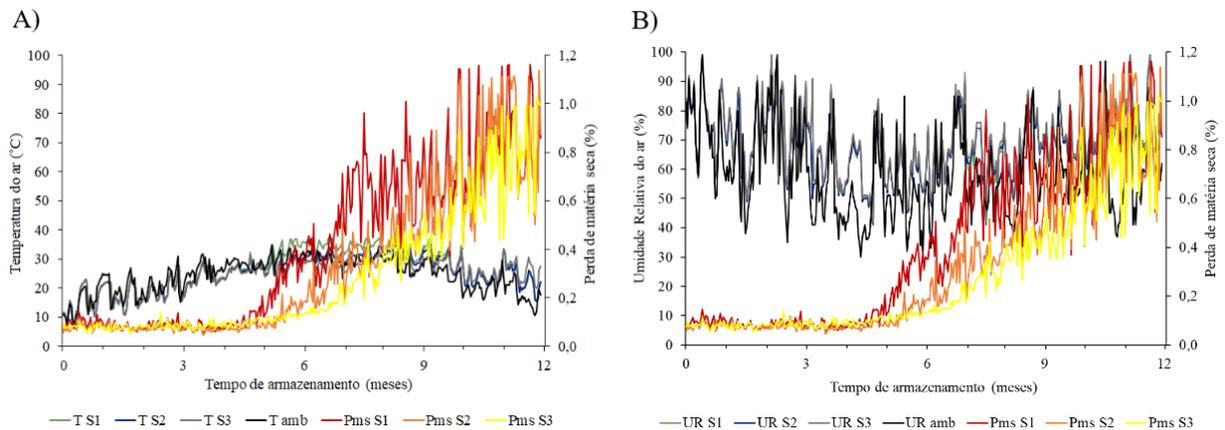
Fonte: Autor.

Entre os tratamentos não se observou diferenças significativas na umidade de equilíbrio higroscópico, sendo a média de 12,8% em todos os tratamentos ao longo do armazenamento.

O teor de água dos grãos, durante o período de armazenamento, variou em função da umidade relativa e a temperatura do ar, tendendo ao equilíbrio higroscópico, conforme já verificado por outros autores ao estudar grãos de milho (DIONELLO et al., 2000; SCHUH et al., 2011; FERRARI FILHO et al., 2014; TIECKER JUNIOR et al., 2014; LIMA et al., 2016). A partir disso, verificou-se que o aumento da temperatura intergranular, reduziu a umidade relativa intergranular e o teor de água dos grãos (Figura 10). Entretanto, entre os tratamentos não se observou diferenças significativas na umidade de equilíbrio higroscópico, sendo a média de 12,8% em todos os tratamentos ao longo do armazenamento.

Na Figura 11 é possível observar a perda de matéria seca em função da temperatura umidade relativa do ar. A perda de matéria seca foi maior a partir do quinto mês de armazenamento, concomitantemente ao aumento da temperatura e da umidade relativa do ar intergranular. Em relação ao teor de água, quanto mais elevado, maior foi a perda de matéria seca dos grãos de milho armazenados.

Figura 11 - Perda de matéria seca ao longo do armazenamento em função: (A) Temperatura do ar e B) Umidade relativa do ar ao longo do tempo de armazenamento dos grãos de milho

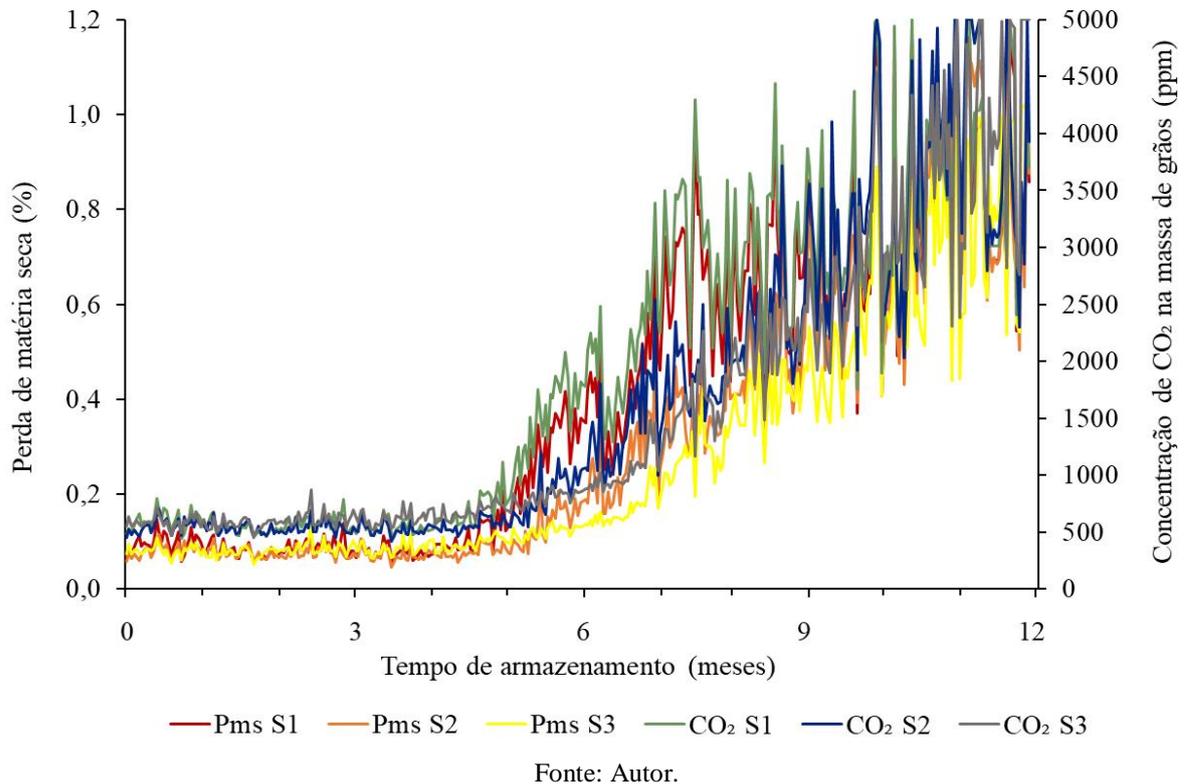


Fonte: Autor.

A perda de matéria seca dos grãos de milho foi proporcional à concentração de CO_2 ao longo do armazenamento (Figura 12).

Os grãos de milho com maiores teores de água apresentam maiores concentrações de CO_2 e conseqüentemente, maior perda de matéria seca durante o período de armazenamento. De acordo com Muir e White (2000), a respiração dos grãos é mais intensa à medida que se têm teores de água elevados, embora a temperatura, a umidade relativa e o estado de conservação também influenciam o metabolismo do grão.

Figura 12 - Concentração de CO₂ na massa de grãos em função da perda de matéria seca ao longo do armazenamento



A respiração promove o consumo das substâncias nutritivas do grão, que se traduz em ‘quebra técnica’ do produto armazenado. Consequentemente, a perda de matéria seca gera prejuízo aos gestores de unidades armazenadoras no momento da comercialização, uma vez que a valorização do produto agrícola é baseada na sua massa final. Por sua vez, a perda de matéria seca do grão fornece uma estimativa do tempo máximo de armazenamento seguro, definido como o período de tempo durante o qual os grãos podem ser armazenados sem perda significativa na sua qualidade e quantidade (KIBAR, 2015).

De acordo com estudos realizados por Steele et al. (1969), os grãos devem ser armazenados por um período no qual ocorra perda de matéria seca máxima de 0,5%. É possível observar que quanto maior o teor de água dos grãos, menor é o tempo limite no qual o produto pode ser armazenado com segurança, sem perda em sua qualidade e quantidade. O tempo limite para o armazenamento seguro usando a perda máxima de 0,5% de matéria seca é 7, 8 e 9 meses para os tratamentos S1, S2 e S3, respectivamente.

A partir dos dados obtidos, a média de perda de matéria seca ao longo do armazenamento foi de 21,4, 17,9 e 15,5 % do peso inicial dos grãos de milho nos tratamentos S1, S2 e S3,

respectivamente. O tempo limite para o armazenamento seguro usando a perda máxima de 0,5% de matéria seca é 7, 8 e 9 meses para os tratamentos S1, S2 e S3, respectivamente.

5 CONCLUSÕES

A perda de matéria seca dos grãos de milho foi proporcional à concentração de CO₂ ao longo do armazenamento. Os grãos de milho com maiores teores de água apresentam maiores concentrações de CO₂ e conseqüentemente, maior perda de matéria seca durante o período de armazenamento considerando a perda máxima de 0,5% de matéria seca o tempo seguro é de 7, 8 e 9 meses para os tratamentos S1, S2 e S3, respectivamente

O monitoramento de dióxido de carbono (CO₂) se mostrou eficaz no controle da qualidade de grãos de milho durante o armazenamento, uma vez que otimiza a detecção precoce da deterioração dos grãos, auxiliando da tomada de decisões e evitando perdas quanti e qualitativas.

REFERÊNCIAS

- ANTUNES, A. M.; DEVILLA, I. A.; NETO, A. C. B.; ALVES, B. G. X.; ALVES, G. R.; SANTOS, M. M. Development of an automated system of aeration for grain storage. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 43, p. 4293-4303, 2016.
- ATUNGULU, G. G., THOTE, S., WILSON, S. Perda de matéria seca para arroz bruto híbrido armazenado em condições de oxigênio reduzido. **Cereal Chemistry Journal**, v. 94, n. 3, p. 497-501, 2017.
- AZEVEDO, L. F.; OLIVEIRA, T. P.; PORTO, A. G.; SILVA, F. S. Capacidade estática de armazenamento de grãos no Brasil. **XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Rio de Janeiro, 2008.
- BAUDET, L.M.; VILLELA, F.A. **Armazenamento**. Seed News, Pelotas, v. 4, n. 4, p. 28-32, 2000. Disponível em: < <https://seednews.com.br/artigos/2106-armazenamento-edicao-julho-2000>> Acesso em: 10 de mar. de 2021.
- BERN, C. J., STEELE, J. L., MOREY, R. V. Shelled corn CO₂ evolution and storage time for 0.5% dry matter loss. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 18, n. 6, p. 703-706, 2002.
- BINELO, M. O. FAORO, V.; KATHATOURIANB, O. A.; ZIGANSHINB, B. Airflow simulation and inlet pressure profile optimization of a grain storage bin aeration system. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 164, p. 104-923, e104923, 2019.
- BOKUSHEVA, R.; FINGER, R.; FISCHLER, M.; BERLIN, R.; MARÍN, Y.; PÉREZ, F.; PAIZ, F. Factors determining the adoption and impact of a post-harvest storage technology. **Food Security**, v. 4, p. 279-293, 2012.
- BRASIL. **Instrução Normativa 60/2011 de 23/12/2011**, 2011: Regulamento Técnico do Milho. Brasília, 10p., 2011.
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinold, 1992. 450p.
- CARDOSO, R. B.; BINOTTI, F. F. S.; CARDOSO, E. D. Potencial fisiológico de sementes de crambe em função de embalagens e armazenamento. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.42, n.3, p.272-278, 2012.
- CHELLADURAI, V.; JIAN, F.; JAYAS, D. S.; WHITE, N. D. G.; MANICKAVASAGAN, A.; FIELDS, P. G. Quality changes in 12% moisture content canola stored in silo bags under Canadian Prairie conditions. **Journal of Stored Products Research**, v.68, p.33-43, 2016.
- CHEN, S. T.; KUO, H. I.; CHEN, C. C. Modeling the relationship between the oil price and global food prices. **Applied Energy**, v. 87, p. 2517-2525, 2010.
- CHITRAKAR, S.; BERN, C. J.; SHRESTHA, D. S. Quantifying corn deterioration due to fungal growth by use of CO₂-sensitive gel. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 22, n. 1, p. 81-86, 2006.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Instruções para amostragem de grãos. **Boletim Téc. Série Armazenamento**, Brasília, v. 1, n. 1, p. 1-32, 2015.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Série Histórica das Safras – Grãos (Por Unidade da Federação)**, Brasília, 2021. Online. Disponível em:

<<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>: Acesso em: 8 de abr. de 2021.

CORADI, P. C.; FILHO, A. F. L.; CHAVES, J. B. P.; MOTA, T. O. Loss of dry matter in grain corn stored under different conditions and effects on quality. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 9, n. 1, p. 1757-1770, 2015a.

CORADI, P. C.; MILANE, L. V.; ANDRADE, M. G. O.; CAMILO, L. J. SOUZA, H.S. Alternatives of storage of corn grains for the conditions of the brazilian cerrado. **Bioscience Journal**, v. 32, n. 1, p. 29-40, 2016b.

CORADI, P. C.; MILANE, L. V.; CAMILO, L. J.; ANDRADE, M. G. O. Drying and storage of corn grains for ethanol production in Brazil. **Bioscience Journal**, v. 32, n. 5, p. 1175-1190, 2016a.

CORADI, P. C.; LEMES, A. F. C. Validation of an experimental prototype of thick-layer fixed bed dryer and determination of the quality of the dried soybean grains. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 40, e35285, 2018.

DIONELLO, R. G.; RADUNZ, L. L.; CONRAD, V. J. D.; LUCCA FILHO, O.; ELIAS, M. C. Temperatura do ar na secagem estacionária e tempo de armazenamento na qualidade de grãos de milho. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 6, n. 2, p. 137-143, 2000.

FERRARI FILHO, E.; ANTUNES, L. E. G.; TIECKER JUNIOR, A.; DE LIMA, R. F.; DIONELLO, R. G. Efeito de diferentes fontes energéticas na secagem e de tempos de armazenagem sobre as características físicas e tecnológicas de grãos de milho. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 20, n. 1/2, p. 68-76, 2014.

FERRASA, M.; BIAGGIONI, M. A. M.; DIAS, A.H. Sistema de monitoramento de temperatura e umidade em silo grane-leiro via radiofrequência (RF). **Revista Energia na Agricultura**, v. 25, n. 2, p. 139-156, 2010.

FREDERICO, Samuel. DESVENDANDO O AGRONEGÓCIO: FINANCIAMENTO AGRÍCOLA E O PAPEL ESTRATÉGICO DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE GRÃOS. **Geosp - Espaço e Tempo**, São Paulo, v. 27, p. 47-61, 2010.

GARCIA-CELA, E.; KIAITSI, E.; SULYOK, M.; KRŠKA, R.; MEDINA, A.; DAMICO, P.; MAGAN, N. Influence of storage environment on maize grain: CO₂ production, dry matter losses and aflatoxins contamination. **Food Additives & Contaminants**, v. 36, p. 175-185, 2019.

GONZALES, H.B.; ARMSTRONG P.R.; MAGHIRANG, R.G. simultaneous monitoring of stored grain with relative humidity, temperature, and carbon dioxide sensors. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 25, n. 4, p. 595-604, 2009.

HUANG, H.; DANAIO, M. G. C.; RAUSCH, K. D.; SINGH, V. Diffusion and production of carbon dioxide in bulk corn at various temperatures and moisture contents, **Journal of Stored Products Research**, v. 55, p. 21-26, 2013.

ILELEJI, D. E.; MAIER, D. E.; BHAT, C.; WOLOSHUK, C. P. Detection of a developing hot spot in stored corn with a CO₂ sensor. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 22, n. 2, p. 275-289, 2006.

INSTRUÇÕES PARA AMOSTRAGEM DE GRÃOS. Brasília-Df: Companhia Nacional de Abastecimento, 2015. Trimestral.

JIAN, F.; CHELLADURAI, V.; JAYAS, D. S.; DEMIANYK, C. J.; WHITE, N. D. G. Interstitial concentrations of carbon dioxide and oxygen in stored canola, soybean, and wheat seeds under various conditions. **Journal of Stored Products Research**, v. 57, p. 63-72, 2014.

JUODEIKIENE, G.; BASINSKIENE, L.; VIDMANTIENE, D.; BARTKIENE, E.; BAKUTIS, B.; BALIUKONIENE, V. Acoustic sensing of deoxynivalenol in co-occurrence with zearalenone and T-2/HT-2 toxin in winter wheat cultivar Sirvinta from Lithuania, **World Mycotoxin Journal**, v. 4, n. 4, p. 395–404, 2011.

KALETA, A; GÓRNICKI, K. Criteria of determination of safe grain storage time - a review. **Advances in Agrophysical Research**, p. 295–318, 2013.

KHATCHATOURIAN, O. A.; BINELO, M. O.; NEUTZLING, R.; FAORO, V. Models to predict the thermal state of rice stored in aerated vertical silos. **Biosystems Engineering**, v. 161, p. 14–23, 2017.

KIBAR, H. Influence of storage conditions on the quality properties of wheat varieties. **Journal of Stored Products Research**, v. 62, p. 8-15, 2015.

KONZEN, Alessandro; ROCHA, Jeferson Cunha da. **ESTUDO DO FLUXOGRAMA OPERACIONAL DOS GRÃOS EM UNIDADE ARMAZENADORA NÍVEL COLETOR.** 2012. 19 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Agrícola, Departamento de Ciências Agrárias, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Erechin, 2012.

LANE, B; WOLOSHUK, C. Impact of storage environment on the efficacy of hermetic storage bags. **Journal of Stored Products Research**, v. 72, n. 1, p. 83-89, 2017.

LIMA, R. F.; JUNIOR, A. T.; JUNIOR, P. R. J. R.; DIONELLO, R. G.; RADUNZ, L. L. Qualidade de grãos de milho submetidos à secagem com lenha e posteriormente armazenados em ambiente natural. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 15, n. 3, p.594- 606, 2016.

LIU, Z.; ZHU, Y. Prediction of grain storage temperature based on deep learning. *Revista de la Facultad de Ingeniería UCV*, v. 32, n. 14, p. 918-924, 2017.

MACIEL, G.; TORRE, D.A.; CARDOSO, L.M.; CENDOYA, M.G.; WAGNER, J.R.; BARTOSIK, R.E. Determination of safe storage moisture content of soybean expeller by means of sorption isotherms and product respiration. **Journal of Stored Products Research**, v.86, e010567, 2020.

- MAIER D. E.; HULASARE, R.; QIAN, B.; ARMSTRONG, P. **Monitoring carbon dioxide levels for early detection of spoilage and pests in stored grain.** 9th International Working Conference on Stored Product Protection, p.1174- 1181, 2006.
- MAIER, D. E.; CHANNAIAH, L. H.; KAWAS-MARTINEZ, A.; LAWRENCE, J. S.; CHAVES, E. V.; CORADI, P. C.; FROMME, G. A. **Monitoring carbon dioxide concentration for early detection of spoilage in stored grain.** 10th International Working Conference on Stored Product Protection, p. 512-516, 2010.
- MILMAN, Mário José. **Equipamentos para pré-processamento de grãos.** Pelotas: Editora e Gráfica Universitária, 2002. 209 p.
- MUIR, W. E.; WHITE, N. D. G. Microorganisms in stored grain. In: MUIR, W. E. (ed.) Manitoba: **Grain Preservation Biosystems**, p. 1-17, 2000.
- NAVARRO, S.; NOYES, R. **The mechanics and physics of modern grain aeration management.** New York: crc press, 2002. 647 p.
- NEETHIRAJAN, S.; FREUND, M. S.; JAYAS, D. S.; SHAFAI, C.; THOMSON, D. J. WHITE, N. D. G. Development of carbon dioxide (CO₂) sensor for grain quality monitoring. **Biosystems Engineering**, v. 106, n. 4, p. 395–404, 2010.
- NEETHIRAJAN, S.; JAYAS, D.S.; SADISTAP, S. Carbon dioxide (CO₂) sensors for the agri-food industry—a review. **Food Bioprocess. Technol**, v. 2, p. 115–121, 2009.
- OCHANDIO, D.; BARTOSIK, R.; GASTÓN, A.; ABALONE, R.; ARIAS BARRETO, A.; YOMMI, A. Modelling respiration rate of soybean seeds (*Glycine max* (L.)) in hermetic storage. **Journal of Stored Products Research**, v. 74, p. 36-45, 2017.
- OLIVEIRA, Marília Boff de. **Efeito de diferentes operações de secagem e armazenagem na qualidade de duas cultivares de soja.** 2018. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.
- PARAGINSK, R. T.; ROCKENBACH, B. A.; SANTOS, R. F.; ELIAS, M. C.; OLVEIRA, M. Qualidade de grãos de milho armazenados em diferentes temperaturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 4, p. 358–363, 2015.
- PARAGINSKI, R. T.; COLUSSI, R.; DIAS, A. R. G.; ZAVAREZE, E. R.; ELIAS, M. C.; VANIER, N. L. Physicochemical, pasting, crystallinity, and morphological properties of starches isolated from maize kernels exhibiting different types of defects. **Food Chemistry**. 274, p. 330-336, 2019.
- PARAGINSKI, R. T.; VANIER, N. L.; BERRIOS, J. J.; OLIVEIRA, M.; ELIAS, M. C. Physicochemical and pasting properties of maize as affected by storage temperature. **Journal of Stored Products Research**. v. 59, p. 209-214, 2014a.
- PARAGINSKI, R. T.; VANIER, N. L.; MOOMAND, K.; OLIVEIRA, M.; ZAVAREZE, E. R.; MARQUES E SILVA, R.; FERREIRA, C. D.; ELIAS, M. C. Characteristics of starch isolated from maize as a function of grain storage temperature. **Carbohydrate Polymers**, v. 102, p. 88-94, 2014b.

PARAGINSKI, Ricardo T.; ROCKENBACH, Bruno A.; SANTOS, Rodrigo F. dos; ELIAS, Moacir C.; OLIVEIRA, Maurício de. Qualidade de grãos de milho armazenados em diferentes temperaturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l], p. 358-363, 2015.

PARK, C. E.; KIM, Y. S.; PARK, K. J.; KIM, B. K. Changes in physicochemical characteristics of rice during storage at different temperatures. **Journal of Stored Products Research**, v. 48, p. 25-29, 2012.

RAUDIENE, E.; RUSINSKAS, D.; BALCIUNAS, G.; JUODEIKIENE, G.; GAILIUS, D. Carbon dioxide respiration rates in wheat at various temperatures and moisture contents. **Journal of metrology society of India**, v. 32, n. 1, p. 51-58, 2017.

REED, C.; DOYUNGAN, S.; IOERGER, B.; GETCHELL, A. Response of storage molds to different initial moisture contents of maize (corn) stored at 25°C, and effect on respiration rate and nutrient composition. **Journal of Stored Products Research**. v. 43, n.4, p. 443–458, 2007.

REHMAN, Z. U.; HABIB, F.; ZAFAR, S. I., 2002. Nutritional changes in maize (*Zea mays*) during storage at three temperatures. **Food Chemistry**. v. 77, n. 2, p. 197-201, 2002.

REUSS, R.; DAMCEVSKI, K.; ANNIS, P. C. The impact of temperature, moisture content, grain quality and their interaction on changes in storage vessel atmospheres. **Proceedings of the 6th international working conference on stored-product protection**, v. 1, 1994.

RUKUNUDIN, I. H.; BERN, C. J.; MISRA, M. K.; BAILEY, T. B. Carbon dioxide evolution from fresh and preserved soybeans. **Transactions of the ASAE**, v. 47, n. 3, p. 827-834, 2004.

SCALEA, Leandro Borges. **TRANSPORTE E ARMAZENAGEM DE SOJA NO BRASIL**. 2002. 227 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2002.

SCHIAVON, R. A.; NOGUEIRA, I. S.; BORGES, G. B.; HOLANDA, H. S.; CASTRO, L. K. Arduino uma tecnologia de baixo custo para a termometria de grãos armazenados. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 10, p. 18825-18839, 2019.

SCHUH, G.; GOTTARDI, R.; FERRARI FILHO, E.; GUIMARÃES ANTUNES, L. E.; GOMES DIONELLO, R. Efeitos de dois métodos de secagem sobre a qualidade físicoquímica de grãos de milho safrinha-RS, armazenados por 6 meses. **Semina: Ciências Agrárias**, n. 32, v. 1, p. 235-244, 2011.

SILVA, A. B. P.; DANAIO, M. G. C.; GATES, R. S.; RAUSCH, K. D. Dry matter loss and chemical changes to soybean at 14, 18 and 22% moisture and 30 °C measured in a dynamic grain respiration system. In 2018 ASABE Annual International Meeting. **American Society of Agricultural and Biological**, p. 1, 2018.

SILVA, F.C.; CHALFOUN, S. M.; BATISTA L. R.; SANTOS, C.; LIMA, N. Taxonomia polifásica para identificação de *Aspergillus* seção flavi: uma revisão. **Revista Ifes Ciência**, v. 1, n. 1, p. 18-40, 2015b.

SILVA, L. C. Avaliação de perdas em unidades armazenadoras. **Revista Grãos Brasil**. Espírito Santo, 2009. Ano VIII, n. 38, p. 18-20. 2009.

SINGH, D., MUIR, W. E., SINHA, R. N. Apparent coefficient of diffusion of carbon dioxide through samples of cereals and rapeseed. **Journal of Stored Products Research**, v. 20, n. 3, p. 169-175, 1984.

STEELE, J. L.; SAUL, R. A.; HUKILL, W. V. Deterioration of shelled corn as measured by carbon dioxide production. **Transactions of the ASAE**, v. 12, n. 5, p. 685-689, 1969.

SULEIMAN, R.; BERN, C. J. BRUMM, T. J. ROSENTRATER, K. A. Impact of moisture content and maize weevils on maize quality during hermetic and non-hermetic storage. **Journal of Stored Products Research**, v. 78, p. 1-10, 2018.

SULEIMAN, R.; ROSENTRATER, K. A.; BERN, C. J. Effects of deterioration parameters on storage of maize: a review. **Journal of Natural Sciences Research**, v. 3, n. 9, p. 147-165, 2013.

TIECKER JUNIOR, A.; GUIMARÃES, L. E.; FILHO, E. F.; CASTRO, B.; DEL PONTE, E.; DIONELLO, R. Qualidade físico-química de grãos de milho armazenados com diferentes umidades em ambientes hermético e não hermético. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 13, n. 2, p. 174-186, 2014.

UBHI, G. S.; SADAKA, S. Temporal valuation of corn respiration rates using pressure sensors. **Journal of Stored Products Research**, v. 61, p. 39-47, 2015.

WU, Y.; LI, X.; MAO, E.; DU, Y.; YANG, F. Design and development of monitoring device for corn grain cleaning loss based on piezoelectric effect. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 179, e105793, 2020.

ZHANG, S-B.; ZHAI, H-C.; HUANG, S-X.; CAI, J-P. A site-directed CO₂ detection method for monitoring the spoilage of stored grains by insects and fungi in Chinese horizontal warehouses. **Journal of Stored Products Research**, v. 59, p. 146-151, 2014.