



VÂNIA ROSAL GUIMARÃES NASCIMENTO

**“SECAGEM CONVECTIVA E COM RADIAÇÃO
INFRAVERMELHA DE GRÃOS DE *Moringa oleifera* Lam.”**

CAMPINAS

2014



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

VÂNIA ROSAL GUIMARÃES NASCIMENTO

**“SECAGEM CONVECTIVA E COM RADIAÇÃO
INFRAVERMELHA DE GRÃOS DE *Moringa oleifera* Lam.”**

Orientador: Prof. Dr. João Domingos Biagi

Co-orientador: Prof. Dr. Rafael Augustus de Oliveira

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Doutora em Engenharia Agrícola, na área de concentração de Tecnologia Pós-Colheita.

CAMPINAS

2014

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

N17s Nascimento, Vânia Rosal Guimarães, 1983-
Secagem convectiva e com radiação infravermelha de grãos de Moringa
oleifera Lam / Vânia Rosal Guimarães Nascimento. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: João Domingos Biagi.
Coorientador: Rafael Augustus de Oliveira.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
Engenharia Agrícola.

1. coagulantes naturais. 2. Proteínas. 3. Turbidez de água. 4. Consumo
energético. I. Biagi, João Domingos, 1951-. II. Oliveira, Rafael Augustus de, 1979-.
III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV.
Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Convective drying with infrared radiation of Moringa oleifera L. grains

Palavras-chave em inglês:

Natural coagulant

Protein

Water turbidity

Energy consumption

Área de concentração: Tecnologia Pós-Colheita

Titulação: Doutora em Engenharia Agrícola

Banca examinadora:

João Domingos Biagi [Orientador]

Luís César da Silva

Juliana Tófano de Campos Leite Toneli

Flávio Luís Schmidt

José Euclides Stipp Paterniani

Data de defesa: 29-04-2014

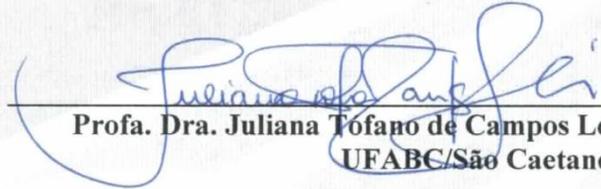
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Vânia Rosal Guimarães Nascimento**, aprovada pela Comissão Julgadora em 29 de abril de 2014, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



João Domingos Biagi – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp

Prof. Dr. Luís César da Silva – Membro Titular
UFES/Espírito Santo



Profa. Dra. Juliana Tófano de Campos Leite Toneli - Membro Titular
UFABC/São Caetano do Sul



Prof. Dr. Flávio Luís Schmidt - Membro Titular
FEA/Unicamp



Prof. Dr. José Euclides Stipp Paterniani - Membro Titular
Feagri/Unicamp

RESUMO

A radiação infravermelha aplicada na secagem de produtos agrícolas e alimentos apresenta a vantagem de aquecer diretamente o produto exposto, com poucas perdas com aquecimento do ar circundante, promovendo maior eficiência energética e redução do tempo de secagem. O produto estudado nesta pesquisa foi grãos de *Moringa oleifera* Lam, que dentre suas múltiplas aplicações, destaca-se como coagulante natural no tratamento de água, devido a uma proteína catiônica de ação clarificante. Embora seja constatada a necessidade de utilização de grãos secos nesses processos, não se verificou na literatura científica recomendação das condições de secagem adequadas aos grãos para serem utilizados na solução coagulante. Neste sentido, o uso combinado da radiação infravermelha com ar aquecido pode ser viável tecnicamente e eficiente na secagem de grãos de *Moringa oleifera* Lam, mantendo a qualidade dos grãos para utilização em tratamento de água. O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de aplicação da radiação infravermelha intermitente em associação com a secagem convectiva de grãos de *Moringa oleifera* L., quanto à eficiência de secagem, consumo energético e manutenção da qualidade dos grãos. Realizaram-se ensaios de secagem estudando os fatores temperatura e velocidade do ar, intensidade e tempo de aplicação da radiação infravermelha para definir aqueles que interferem no processo e seus níveis ótimos de operação. O aumento da intensidade da radiação infravermelha reduziu o tempo de secagem, o consumo de energia e propiciou maior eficiência na redução da turbidez de água quando esses grãos foram aplicados na produção de coagulante. A elevação dos níveis da velocidade do ar, por sua vez, diminuiu a taxa de secagem e aumentou o consumo de energia. O incremento da temperatura do ar de secagem provocou elevação da taxa de secagem, reduziu o tempo de secagem e contribuiu com a redução da turbidez de água sintética tratada com solução coagulante de grãos de *Moringa oleifera* L. O tempo de aplicação da radiação infravermelha aumentou a taxa de secagem e permitiu redução da turbidez de água sintética quando seus níveis foram aumentados. A difusividade efetiva variou entre $6,44 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $9,89 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Os modelos de Fick e Midilli apresentaram melhores ajustes aos dados experimentais. A temperatura do ar e o tempo de aplicação da radiação infravermelha elevaram a temperatura do ar dentro do secador e a temperatura dentro dos grãos durante os ensaios de secagem. O tempo de aplicação da radiação infravermelha reduziu consideravelmente o consumo total de energia durante as secagens. A elevação do nível de temperatura do ar de secagem, no entanto,

provocou proporcional aumento do consumo de energia. Constatou-se que a região do ponto central do planejamento experimental, temperatura do ar de 44°C e tempo de aplicação da radiação infravermelha de 3,4 min, apresentou a combinação entre os fatores com maior teor de proteína e que correspondeu maior remoção de turbidez quando esses grãos foram utilizados para produção de coagulante. Em relação à qualidade dos grãos de *Moringa oleifera* L., a secagem aumentou a concentração do teor de proteína, favoreceu a sedimentação dos sólidos devido à oxidação de lipídios e promoveu maior remoção da turbidez de água sintética tratada com solução a base desses grãos.

PALAVRAS-CHAVE: coagulante natural; proteína; turbidez de água; consumo energético.

ABSTRACT

CONVECTIVE DRYING WITH INFRARED RADIATION OF *Moringa oleifera* L. GRAINS

The infrared radiation applied for drying of agricultural products and foods presents the advantage of heating directly the exposed product, minimizing losses with heating of surrounding air, promoting greater energy efficiency and reducing in drying time. The product studied in this research was *Moringa oleifera* Lam grains, which among its many applications, stand out as a natural coagulant in water treatment, due to the presence of a cationic protein with clarifier action. Although it is observed the necessity to use dry grains in these processes, there was no recommendation in the scientific literature of appropriate drying conditions for grains to be used in the coagulant solution. In this way, the combined use of infrared radiation with heated air can be technically feasible and efficient in drying of *Moringa oleifera* L. grains, maintaining the quality attributes of grains for use in water treatment. This study aims to evaluate the potential application of intermittent infrared radiation in association with convective drying of *Moringa oleifera* L. grains, regarding the drying efficiency, energy consumption and maintenance of grains quality. Experimental runs were performed studying the factors air temperature, air velocity, infrared radiation intensity, and time of infrared radiation application to define those which have an effect on the process and its optimum levels of operation. The increased intensity of the infrared radiation reduced the drying time, energy consumption and propitiated greater efficiency in reducing the turbidity of water when these grains were applied in the coagulant production. Whereas elevated levels of air velocity decreased drying rate and increased energy consumption. The increase in the drying air temperature caused elevation of drying rate, decreased the drying time and contributed with turbidity reduction of synthetic water treated with coagulant solution of *Moringa oleifera* L. grains. The time of infrared radiation application increased the drying rate and allowed turbidity reduction of synthetic water when its levels were increased. The effective diffusivity ranged from $6.44 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ and $9.89 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Fick and Midilli models showed better fit to the experimental data. Air temperature and time of infrared radiation application increased air temperature inside the dryer and the temperature inside the grains during drying

experiments. The application of infrared radiation significantly reduced total energy consumption during drying. Increasing the level of air temperature caused a proportional increase in energy consumption. It was found that central point of the experimental design, air temperature of 44 °C and infrared time of 3.4 min, showed a combination of factors with higher protein content and corresponded to the highest turbidity removal when these grains were used for coagulant production. In relation to *Moringa oleifera* L. grain quality, drying increased the concentration of protein, favored the sedimentation of solids due to the oxidation of lipids and promoted greater removal of turbidity from synthetic water treated with these grains.

KEYWORDS: natural coagulant; protein; water turbidity; energy consumption.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
LISTA DE FIGURAS	xxi
LISTA DE TABELAS	xxiii
LISTA DE SÍMBOLOS	xxvii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 HIPÓTESE	3
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 Objetivo Geral	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Secagem de produtos biológicos	5
2.1.1 Secagem convectiva	5
2.1.2 Secagem com radiação no infravermelho distante	7
2.1.2.1 Princípios básicos da radiação infravermelha	7
2.1.2.2 Características da radiação infravermelha aplicada à secagem de produtos biológicos.....	9
2.2 Curva característica de secagem.....	14
2.3 Modelagem matemática de processos de secagem.....	18
2.4 Consumo energético de operações de secagem.....	21
2.5 <i>Moringa oleifera</i>	22
2.5.1 Origem e descrição botânica	22
2.5.2 Cultivo e armazenamento	24
2.5.3 Aplicações	26

2.5.3.1	<i>Moringa oleifera</i> como coagulante natural	26
2.6	Planejamento experimental - Metodologia da superfície de resposta	30
3	MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1	Equipamento de secagem - Secador agitador/misturador.....	32
3.2	Planejamento experimental e análise estatística.....	34
3.3	Fluxograma das operações de secagem	35
3.4	Ponto de colheita das vagens de <i>Moringa oleifera</i> L.	35
3.5	Propriedades físicas dos grãos de <i>Moringa oleifera</i> L.	36
3.6	Composição centesimal dos grãos de <i>Moringa oleifera</i> L.	37
3.7	Secagem de <i>Moringa oleifera</i> L.	37
3.7.1	Secagem convectiva com aplicação de radiação infravermelha.....	37
3.7.1.1	Seleção dos fatores que interferem na secagem	38
3.7.1.1.1	Secagem conduzida até alcançar equilíbrio higroscópico	38
3.7.1.1.2	Secagem conduzida até alcançar teor de água pré-definido	41
3.7.1.2	Definição da melhor condição de operação da secagem	42
3.7.2	Secagem de validação das condições otimizadas	44
3.8	Temperatura do ar no interior da câmara de secagem e no grão	44
3.9	Consumo energético	45
3.10	Qualidade dos grãos após secagem	46
3.10.1	Teor de água	46
3.10.2	Atividade de água	46
3.10.3	Teor de proteína.....	47
3.10.4	Índice de peróxidos.....	48
3.11	Tratamento de água com turbidez sintética	49
3.11.1	Preparo da solução coagulante	49

3.11.2	Preparo de água bruta sintética.....	49
3.11.3	Tratamento de água no Jar-Test.....	50
3.11.4	Turbidez e pH.....	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1	Determinação do ponto de colheita	52
4.2	Caracterização inicial da matéria prima	55
4.3	Secagem convectiva com aplicação de radiação infravermelha.....	58
4.3.1	Seleção dos fatores que interferem na secagem	58
4.3.1.1	Secagem conduzida até alcançar equilíbrio higroscópico	58
4.3.1.2	Secagem conduzida até alcançar teor de água pré-definido	64
4.3.2	Definição da melhor condição de operação da secagem	75
4.3.2.1	Temperatura do ar no interior da câmara de secagem e dentro dos grãos.....	75
4.3.2.2	Consumo de energia	81
4.3.2.3	Avaliação da secagem e da qualidade dos grãos de <i>Moringa oleifera</i> L.	86
4.3.2.4	Efeito dos tratamentos de secagem na qualidade dos grãos de <i>Moringa oleifera</i> L. utilizados no tratamento de águas.....	92
4.3.2.5	Relações matemáticas entre os parâmetros de operação da secagem e as respostas avaliadas.....	101
4.3.3	Validação das condições otimizadas	106
5	CONCLUSÕES	107
5.1	Seleção dos fatores que interferem na secagem	107
5.1.1	Secagem conduzida até alcançar equilíbrio higroscópico	107
5.1.2	Secagem conduzida até alcançar teor de água pré-definido	107
5.2	Definição da melhor condição de operação da secagem	108
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110
	APÊNDICE	119

“A tribulação produz a paciência, a paciência prova a fidelidade e a fidelidade, comprovada, produz a esperança. E a esperança não engana. Porque o amor de Deus foi derramado em nossos corações pelo Espírito Santo que nos foi dado”.

Romanos 5, 3-5

DEDICATÓRIA

*A Deus,
minha rocha, meu refúgio, em quem eu posso confiar.*

*Aos meus pais, Otaídes e Felizarda, e aos meus irmãos, Gisele, Marcos e Rafael,
família linda que Deus me deu, pelo amor fraternal e apoio constante.*

*Ao meu marido, Carlos Henrique,
companheiro fiel, pelo amor, respeito e dedicação em todos os momentos... com você sou mais
feliz.*

*Ao meu filho, Lucas Henrique,
amor da minha vida, pela realização de poder gerá-lo, pela perspectiva de poder cuidá-lo,
educá-lo, mimá-lo, enfim, ser sua mãe.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar sempre presente, dando-me amor e alegria, pela paz nos momentos de tribulação, por renovar minhas forças nos momentos em que tudo parecia dar errado e por conceder-me esperança e fé na sua divina providência.

Aos meus pais, Otaídes e Felizarda, por todo amor, cuidado, paciência e ensinamentos a mim dedicados ao longo de minha vida, vocês valem mais que ouro! Aos meus irmãos, Gisele, Marcos e Rafael, pelos momentos de convivência, estar com vocês alegria o meu coração. Aos meus cunhados, Railda e Félix, e aos meus lindos sobrinhos, Nicoló e Nicolas, por fazerem parte da minha vida.

Ao meu marido, meu amigo, meu amor e pai do meu filho, Carlos Henrique, por toda dedicação que tens a mim. Ao nosso filho, Lucas Henrique, por completar a nossa família com a ternura de sua presença, por ser paciente e ter colaborado nos experimentos finais, na escrita e defesa da tese no ventre da mamãe.

Aos meus orientadores, prof. João Domingos Biagi e prof. Rafael Augustus de Oliveira, pela confiança, conhecimento técnico e científico, teórico e prático repassados nesses anos de UNICAMP, pela orientação desde a elaboração do plano de pesquisa, buscas por subsídios financeiros, na execução do projeto e na parte escrita da tese. Também sou grata pela convivência harmoniosa, paciência, compreensão e especialmente pelos laços de amizade que estreitamos durante esses anos.

À Rosa, pelo auxílio muito além do profissional, por ter sido segunda mãe, amiga e conselheira, sempre disponível a ajudar no que fosse preciso. Muito obrigada por tudo! À Carol, pelo companheirismo nas disciplinas, nos trabalhos realizados em conjunto, pela ideia inicial de realizar a pesquisa com Moringa oleifera L. e pela sincera amizade. À Rívia, por ser amiga, companheira e colega de trabalho, no Brasil e na Espanha. À Franciane e Audirene pela ajuda nas análises e troca de experiências nas gestações dos nossos meninos. Ao Conan, pela hospedagem em Piracicaba e, sobretudo, pela amizade verdadeira de todas as horas. Ao Renan, pelo auxílio nos experimentos e análises laboratoriais durante sua iniciação científica. À Mara Lígia, Stella, Gabriel, Arthur, Marina, Rodolfo, Wesley, Maria Paula, Flávia, Gabriela, Monalisa, Julyenne, Glenda, Milla, Kátia, Douglas e Danielle Valadão pela amizade e pelos momentos de descontração.

Aos meus queridos compadres e afilhada, Iris Cecília, Miguel e Iris Alejandra, pelo vínculo de amor e cuidado que construímos, pelos almoços de domingo, pela partilha de experiências e por terem me concedido a felicidade de ser a dindinha da Ale.

Às amigas e companheiras de república, Adriana, Anna Luíza, Carolina, Yuri e Marta, pelos momentos de convívio, de festas e troca de experiências que vivemos juntas, foi muito bom dividir o dia-a-dia com vocês. Agradeço aos meninos, Jaime e Magno, pela convivência nos finais de semana.

À Camila Arantes pela amizade, disponibilidade e auxílio nos ensaios de tratamento de água.

Agradeço à Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI) e à Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), pela oportunidade concedida de participar desse programa de doutorado.

Aos professores, Benedito Carlos Benedetti e Marlene Rita de Queiroz da FEAGRI, à prof^a. Maria Isabel Rodrigues da FEA/UNICAMP, à prof^a. Ana Dionisia L. Coelho Novembre da ESALQ/USP e ao prof^o. Gonzalo Roa, pelos conhecimentos repassados nas disciplinas.

Ao professor Luiz Antonio Rossi e ao Edson Caires pela disponibilidade e super ajuda com os medidores de energia e parte elétrica do secador.

À Coordenadoria de Pós-Graduação (CPG/FEAGRI), prof. Zigomar, Célia, Marta, Sidnei, Fábio, prof. Luiz Henrique e Rita de Cássia, pelo trabalho indispensável que cada um desempenhou na gestão do programa de pós-graduação.

Aos profissionais de pesquisa, Rosa Helena Aguiar, Francisco e Maria Rosália do Lab. de Tecnologia Pós-Colheita da FEAGRI, Franciane Colares do Lab. de Secagem da FEAGRI, Leandro do Lab. de Instrumentação e Controle da FEAGRI, Giovani Brota do Lab. de Saneamento da FAEGRI, Alessandra Coelho e Márcio Schmiele do Lab. de Cereais, Raízes e Tubérculos da FEA, pela disponibilidade e auxílio oportuno na realização dos experimentos e das análises.

À CAPES pela bolsa de estudos do doutorado, ao FAEPEX e à CPG/FEAGRI pelo auxílio financeiro para a realização da pesquisa, à CATI de Marília/SP e ao Eng. Agrônomo Eduardo Gazola, pelo fornecimento de parte da matéria prima utilizada nos experimentos.

Ao Programa Erasmus Mundus, à Coordenadoria de Relações Institucionais e Internacionais (CORI) e à Marta, pela oportunidade de realizar intercâmbio na Universidade Politécnica da Catalunha (Barcelona/Espanha) e pela bolsa de estudos concedida.

À prof^a. Montserrat Pujolà Cunil, prof^a. Isabel Achaerandio e Sheila Benítez da Universidade Politécnica da Catalunha (UPC), pelos ensinamentos na área de recobrimentos comestíveis em frutas minimamente processadas e, especialmente, pela amizade durante o período de intercâmbio.

Aos professores, Luís César da Silva, Juliana Tófano de C. L. Toneli, Flávio Luís Schmidt e José Euclides Stipp Paterniani, pelas contribuições dadas ao trabalho e pela participação na banca de defesa desta tese.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Característica espectral da radiação de corpo negro a diferentes temperaturas.	8
Figura 2. Espectro eletromagnético com ênfase na localização da radiação infravermelha.	9
Figura 3. Comportamento típico da secagem convectiva sob condições externas constantes.	17
Figura 4. Imagem ilustrativa da árvore (A), flor (B), vagem (C), semente com tegumento (D) e semente sem tegumento (E) de <i>Moringa oleifera</i> Lam.	23
Figura 5. Imagem frontal (A), lateral (B) e interna (C) do Secador agitador/misturador.	34
Figura 6. Fluxograma das operações de secagem de grãos <i>Moringa oleifera</i> L.	35
Figura 7. Imagens de uma (A), duas (B) e três (C) resistências de infravermelho no interior do secador.	40
Figura 8. Imagem do sistema de aquisição de dados (A) e dos sensores de temperatura instalados dentro da câmara de secagem (B).	45
Figura 9. Imagem dos multimedidores de energia da Kron (A) e da ESB / Landis Gyr (B), utilizados na medição do consumo de energia elétrica dos ensaios de secagem.	46
Figura 10. Imagem do determinador de atividade de água.	47
Figura 11. Imagem do bloco digestor inserido em capela de fluxo laminar (A) e do destilador (B) utilizados na determinação do teor de proteína dos grãos de <i>Moringa oleifera</i> L.	48
Figura 12. Imagem do equipamento Jar-Test.	50
Figura 13. Imagem do turbidímetro (A) e do pHmetro (B) utilizados na avaliação de águas tratadas com solução de <i>Moringa oleifera</i> L.	51
Figura 14. Ilustração da coloração das vagens e dos grãos de <i>Moringa oleifera</i> L. em diferentes estádios de maturação.	52
Figura 15. Ilustração da coloração da vagem quase marrom (A) e sua identificação na carta de Munsell (C); coloração da vagem marrom (B) e sua identificação na carta de Munsell (D).	53
Figura 16. Curvas experimentais (Exp) de secagem e curvas preditas (Pred) pelo modelo de Fick para os pontos fatoriais (ensaios 1 a 4) do planejamento experimental.	61
Figura 17. Curvas experimentais (Exp) de secagem e curvas preditas (Pred) pelo modelo de Fick para os pontos fatoriais (ensaios 5 a 8) do planejamento experimental.	62
Figura 18. Curvas experimentais (Exp) de secagem e curvas preditas (Pred) pelo modelo de Fick para os pontos centrais (ensaios 9 a 11) do planejamento experimental.	62

Figura 19. Curvas da taxa de secagem (dX/dt) dos grãos de <i>Moringa oleifera</i> L. relativas aos ensaios 1, 2, 3 e 11 – Planejamento fatorial fracionado.	68
Figura 20. Cinética de redução da turbidez experimental (Exp) e predita (Pred) pela Equação 19, obtida durante o tempo de sedimentação de 60 min – Ensaio 8.....	72
Figura 21. Monitoramento da temperatura interna do secador (Temp ar) e no interior do grão de <i>Moringa oleifera</i> L. (Temp moringa) durante os ensaios de secagem 1, 2, 8 e 11.....	77
Figura 22. Superfícies de resposta e curvas de contorno das variáveis: temperatura do ar na câmara de secagem (A) e temperatura no interior do grão (B) durante os ensaios de secagem de <i>Moringa oleifera</i> L.	81
Figura 23. Consumo de energia do ventilador, resistências radiantes de infravermelho e resistências elétricas, relativo aos ensaios de secagem de grãos de <i>Moringa oleifera</i> L.	84
Figura 24. Superfícies de resposta da energia total (A) e da energia específica (B), obtidos da secagem de grãos de <i>Moringa oleifera</i> L.	86
Figura 25. Curvas da taxa de secagem (dX/dt) dos grãos de <i>Moringa oleifera</i> L. relativas aos ensaios 4, 5, 8 e 11 – Delineamento composto central rotacional.....	89
Figura 26. Superfícies de resposta e curvas de contorno das variáveis: tempo de secagem (A) e taxa de secagem (B) de grãos de <i>Moringa oleifera</i> L.....	91
Figura 27. Cinética de redução da turbidez experimental (Exp) e predita (Pred) pela Equação 19, obtida durante o tempo de sedimentação de 60 min – Ensaio 1.....	96
Figura 28. Superfície de resposta (A) e curva de contorno (B) do teor de proteína de grãos de <i>Moringa oleifera</i> L.	99
Figura 29. Superfície de resposta (A) e curva de contorno (B) da turbidez remanescente de água tratada com solução coagulante de grãos de <i>Moringa oleifera</i> L.	99
Figura 30. Superfície de resposta (A) e curva de contorno (B) do índice de peróxidos de grãos de <i>Moringa oleifera</i> L.	100
Figura 31. Superfície de resposta (A) e curva de contorno (B) da constante de redução da turbidez (k_c) de grãos de <i>Moringa oleifera</i> L.	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Tipo de modelo aplicado na descrição da secagem com aplicação de radiação infravermelha em função do produto.....	20
Tabela 2. Caracterização físico-química de grãos de <i>Moringa oleifera</i> L.	24
Tabela 3. Especificação dos métodos e referências das análises físico-químicas da matéria-prima.....	37
Tabela 4. Condições dos fatores da secagem convectiva com aplicação de radiação infravermelha para seleção de variáveis.....	39
Tabela 5. Planejamento dos ensaios de secagem convectiva com aplicação de radiação infravermelha de acordo com os níveis das variáveis codificada e real.....	39
Tabela 6. Modelos utilizados na análise da secagem de grãos de <i>Moringa oleifera</i> L.	41
Tabela 7. Condições dos fatores das operações de secagem convectiva com aplicação de radiação infravermelha - DCCR.....	43
Tabela 8. Planejamento dos ensaios de secagem convectiva com aplicação de radiação infravermelha de acordo com os níveis das variáveis codificada e real - DCCR.....	43
Tabela 9. Resultados do teor de água e do teor de proteína dos grãos de <i>Moringa oleifera</i> L. em diferentes estádios de maturação.	54
Tabela 10. Dados médios, desvio padrão e coeficiente de variação de características físicas de grãos de <i>Moringa oleifera</i> L.	56
Tabela 11. Composição centesimal de grãos de <i>Moringa oleifera</i> L.	57
Tabela 12. Difusividade efetiva, teor de água, atividade de água e tempo de secagem de grãos de <i>Moringa oleifera</i> L.	58
Tabela 13. Efeitos principais e interação de primeira ordem dos fatores significativos sobre as respostas difusividade efetiva ($m^2 s^{-1}$), teor de água (% b.u.) e atividade de água com nível de confiança de 90%.....	59
Tabela 14. Coeficientes dos modelos de Page, Midilli e Newton para os ensaios de secagem de grãos de <i>Moringa oleifera</i> L.	63
Tabela 15. Coeficientes de determinação (R^2 %) dos modelos de Page, Midilli e Newton para os ensaios de secagem de grãos de <i>Moringa oleifera</i> L.	63

Tabela 16. Variáveis independentes: temperatura (T) e velocidade do ar (V), tempo (t) e intensidade (I) da radiação infravermelha. Variáveis dependentes: teor de água (TA), atividade de água (a_w), tempo (t_s) e taxa de secagem (dX/dt) de grãos de <i>Moringa oleifera</i> L.....	65
Tabela 17. Efeitos principais e interações de primeira ordem das variáveis independentes sobre as variáveis dependentes: teor de água (TA) e atividade de água (a_w) (95% de confiança).	66
Tabela 18. Efeitos principais e interações de primeira ordem das variáveis independentes sobre as variáveis dependentes: tempo de secagem (t_s) e taxa de secagem (dX/dt) (90% de confiança).	66
Tabela 19. Variáveis independentes: temperatura (T) e velocidade (V) do ar, tempo (t) e intensidade (I) da radiação infravermelha. Variáveis dependentes: teor de proteína dos grãos, turbidez, constante de redução da turbidez (k_c) e pH de água tratada com os grãos de <i>Moringa oleifera</i> L. secos.....	69
Tabela 20. Efeitos principais e interações de primeira ordem das variáveis independentes sobre as variáveis dependentes: teor de proteína e turbidez (90% de confiança).....	69
Tabela 21. Efeitos principais e interações de primeira ordem das variáveis independentes sobre as variáveis dependentes: coeficiente de redução da turbidez e pH (90% de confiança).	71
Tabela 22. Variáveis independentes: temperatura (T) e velocidade do ar (V), tempo (t) e intensidade (I) da radiação infravermelha. Variáveis dependentes: energia consumida e energia específica dos ensaios de secagem de grãos de <i>Moringa oleifera</i> L.	73
Tabela 23. Efeitos principais e interações de primeira ordem das variáveis independentes sobre as variáveis dependentes: energia consumida e energia específica (90% de confiança). 73	73
Tabela 24. Variáveis independentes: temperatura do ar de secagem (T) e tempo de aplicação da radiação infravermelha (t) e variáveis dependentes: temperatura média do ar, temperatura média dos grãos e temperatura máxima dos grãos, obtidas nos ensaios de secagem de grãos de <i>Moringa oleifera</i> L.	76
Tabela 25. Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) das variáveis dependentes: temperatura do ar no interior da câmara de secagem, temperatura no interior dos grãos e temperatura máxima no interior dos grãos.....	79

Tabela 26. Análise de variância (ANOVA) para as respostas temperatura do ar no interior da câmara de secagem, temperatura no interior dos grãos e temperatura máxima no interior dos grãos.	80
Tabela 27. Variáveis independentes: temperatura do ar de secagem (T) e tempo de aplicação da radiação infravermelha (t) e variáveis dependentes: consumo de energia do ventilador (E_V), resistências elétricas (E_R), resistências de infravermelho (E_I), energia total (E_T) e energia específica (E_E) dos ensaios de secagem de grãos de <i>Moringa oleifera</i> L.	82
Tabela 28. Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) das variáveis dependentes: consumo de energia total e energia específica.....	84
Tabela 29. Análise de variância (ANOVA) para as respostas energia total e energia específica.	85
Tabela 30. Planejamento experimental dos ensaios e as respostas obtidas: teor de água, atividade de água, tempo de secagem e taxa de secagem.....	87
Tabela 31. Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) das variáveis dependentes: teor de água e atividade de água (95% de confiança).....	87
Tabela 32. Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) das variáveis dependentes: tempo de secagem e taxa de secagem.....	88
Tabela 33. Análise de variância (ANOVA) para as respostas taxa de secagem e tempo de secagem.	90
Tabela 34. Planejamento experimental dos ensaios de secagem e respostas das análises de qualidade dos grãos destinados ao tratamento de água: turbidez remanescente, pH, k_c , teor de proteína e índice de peróxidos.....	92
Tabela 35. Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) das variáveis dependentes: teor de proteína, turbidez e índice de peróxidos.	93
Tabela 36. Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) das variáveis dependentes constante de redução da turbidez (k_c) e pH.	93
Tabela 37. Análise de variância (ANOVA) para as respostas turbidez, k_c , teor de proteína e índice de peróxidos.....	98
Tabela 38. Valores experimentais (Exp), preditos (Pred) pelos modelos e o erro relativo entre eles, obtidos para as respostas temperatura do ar dentro do secador e no interior dos grãos de <i>Moringa oleifera</i> L. dos ensaios realizados.....	103

Tabela 39. Valores experimentais (Exp), preditos (Pred) pelos modelos e o erro relativo entre eles, obtidos para as respostas consumo de energia total e de energia específica dos ensaios de secagem de grãos de <i>Moringa oleifera</i> L.	103
Tabela 40. Valores experimentais (Exp), preditos (Pred) pelos modelos e o erro relativo entre eles, obtidos para as respostas taxa e tempo de secagem de grãos de <i>Moringa oleifera</i> L. dos ensaios realizados.	104
Tabela 41. Valores experimentais (Exp), preditos (Pred) pelos modelos e o erro relativo entre eles, obtidos para as respostas turbidez remanescente e constante de redução da turbidez (k_c) de água tratada com solução coagulante dos grãos de <i>Moringa oleifera</i> L. dos ensaios de secagem.	105
Tabela 42. Valores experimentais (Exp), preditos (Pred) pelos modelos e o erro relativo entre eles, obtidos para as respostas teor de proteína e índice de peróxidos dos grãos de <i>Moringa oleifera</i> L. dos ensaios de secagem.	106

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
A	Área	m ²
a, b, c, y, g, h	Constantes empíricas dos modelos de secagem	-
A _T	Área da seção transversal da câmara	m ²
c	Velocidade da luz	m s ⁻¹
C	Turbidez final	NTU
C ₀	Turbidez inicial	NTU
C _a	Calor específico	kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹
CEE	Consumo de energia específica do ventilador de alta pressão ou das resistências elétricas	MJ kg _{água} ⁻¹
CV	Coefficiente de variação	%
D ₀	Termo pré-exponencial da equação de Arrhenius	m ² s ⁻¹
D _{ef}	Difusividade efetiva da umidade	m ² s ⁻¹
DP	Desvio padrão	-
DRM	Módulo do desvio relativo médio	-
E	Emissividade total	-
e	Erro	-
ε	Emissividade de um corpo	-
E _a	Energia de ativação	kJ mol ⁻¹
E _b	Emissividade do corpo negro	-
E _E	Energia específica	kWh/kg
E _I	Consumo de energia do infravermelho	kWh
E _n	Consumo de energia elétrica do ventilador de alta pressão ou das resistências elétricas	MJ
E _R	Consumo de energia das resistências elétricas	kWh
E _T	Consumo de energia total	kWh
E _V	Consumo de energia do ventilador	kWh
F _{cal}	Valor calculado do Teste F	-

F_{tab}	Valor tabelado do Teste F	-
h	Constante de Plank	
h_c	Coefficiente de transferência de calor convectivo	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
I	Intensidade da radiação infravermelha	W
K	Número de fatores	-
k e n	Coefficientes do modelo de Page	-
k, k_1 e k_2	Constantes da taxa de secagem	$1/\text{s}$
k_0	Constante de Boltzmann	-
k_c	Constante de transformação de 1ª ordem	$1/\text{tempo}$
K_e	Fator de conversão de unidades (74)	-
L	Espessura do produto	m
M_{HCl}	Molaridade do HCl	mol/L
MR	Razão de umidade	-
MR_c	Taxa do teor de água crítico	-
m_w	Água removida	$\text{kg}_{\text{água}}$
n_w	Taxa de secagem	-
n_{wc}	Taxa de secagem constante	-
R^2	Coefficiente de determinação	-
R_c	Constante universal dos gases (8.314)	$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
T	Temperatura do ar de secagem	$^{\circ}\text{C}$
t	Tempo de aplicação da radiação infravermelha	min
$T(L)$	Termo linear da variável temperatura do ar	-
$t(L)$	Termo linear da variável tempo de aplicação da radiação infravermelha	-
$T(L) \times t(L)$	Interação entre os termos lineares da temperatura do ar e tempo de aplicação da radiação infravermelha	-
$T(Q)$	Termo quadrático da variável temperatura do ar	-
$t(Q)$	Termo quadrático da variável tempo de aplicação da radiação infravermelha	-
TA	Teor de água	$\%$ base úmida
t_c	Intervalo de tempo entre C_0 e C	min

T_f	Temperatura do produto exposto ao fluido	$^{\circ}\text{C}$
T_g	Temperatura do ar	$^{\circ}\text{C}$
T_K	Temperatura absoluta em graus Kelvin	K
t_s	Tempo de secagem	h
T_{wb}	Temperatura de bulbo úmido	$^{\circ}\text{C}$
V	Velocidade do ar	m s^{-1}
V_b	Volume de HCl consumido na titulação do “branco”	mL
V_{HCl}	Volume de HCl consumido na titulação	mL
V_o	Volume total do fluxo de ar	m^3
w	Peso da amostra	g
X	Teor de água ($M_{\text{água}}/M_{\text{matéria seca}}$)	g/g
x_1 e x_2	Variáveis codificadas -1 e +1 dos fatores	-
Y	Adimensional de umidade	-
Y_{Exp}	Valor experimental do adimensional de umidade	-
Y_{Pred}	Valor predito por modelo matemático do adimensional de umidade	-
α	Absortividade	-
β	Parâmetros do modelo de regressão	-
ΔT	Diferença de temperatura	$^{\circ}\text{C}$
ρ	Refletividade	-
ρ_a	Densidade do ar	kg m^{-3}
σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($5,670 \times 10^{-8}$)	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$
τ	Transmissividade	-

1 INTRODUÇÃO

O processo de secagem consiste na remoção de água de determinado material. Produtos agrícolas com teor de água entre 11% e 13% têm o metabolismo reduzido e encontram-se microbiologicamente estáveis, com reduzida atividade enzimática, fúngica e bacteriana. Essa prática pós-colheita visa, portanto, manter a qualidade de produtos agrícolas durante o período de armazenamento, além de oferecer as vantagens de redução de massa e volume e não necessitar de refrigeração do produto durante esse período, o que favorece a redução de custos.

A execução de operações de secagem geralmente envolve aplicação de calor, que pode ser empregada pela passagem forçada de ar aquecido (convecção) através do produto, condução indireta do calor por meio de uma superfície de metal, aplicação de pressões negativas (vácuo), utilização de radiação no infravermelho distante e radiação de micro-ondas.

O método de secagem convectiva é amplamente difundido e empregado na secagem de alimentos. No entanto, sua característica de transferência de calor indireta para o condicionamento do ar de secagem (temperatura e umidade relativa) reduz a eficiência energética dessa operação, elevando seu custo. Outro aspecto relevante é o longo tempo de secagem, provocado pelo fato de a transferência de calor do ar para o produto ocorrer lentamente.

Operações de secagem demandam quantidade significativa de energia, dessa forma a pesquisa de novos métodos de secagem, tipos de secadores e fontes de energia são importantes na busca de alternativas que favoreçam a redução do consumo de energia.

O fornecimento de calor por meio da aplicação de radiação no infravermelho distante em processos de secagem pode superar as características indesejáveis do método convectivo. Isso porque essa radiação aquece diretamente o produto exposto, com poucas perdas com aquecimento do ar circundante, o que favorece uma maior eficiência energética e, além disso, atinge rapidamente altas taxas de aquecimento, promovendo redução do tempo de secagem. A convecção de ar aquecido, por sua vez, atua removendo a água evaporada e substituindo o ar saturado por ar seco, com maior volume específico.

Moringa oleifera L. é uma planta tropical originária da Índia, introduzida no Brasil na década de 50 e encontrada principalmente no nordeste brasileiro. Trata-se de uma planta com diversas possibilidades de utilização e todos os seus constituintes podem ser aproveitados. As folhas e frutos têm valor alimentar, sendo as folhas ricas em vitaminas A e C, cálcio, ferro e fósforo e os frutos apresentam altos teores de proteína. A maioria das partes da planta tem valor medicinal. O óleo extraído das sementes é utilizado industrialmente para lubrificar relógios, maquinarias delicadas e na fabricação de perfumes.

Dentre as formas de uso dos grãos de *Moringa oleifera* L., destaca-se a sua utilização como coagulante natural no tratamento de águas. A ação coagulante dos grãos é devida à presença de proteínas catiônicas solúveis em água, as quais desestabilizam e agregam microrganismos e partículas coloidais de carga superficial negativa, contidas na água. A clarificação de águas é geralmente realizada com o extrato dos grãos em processos combinados de coagulação/floculação, sedimentação e/ou filtração.

Na etapa de preparo da solução coagulante à base de grãos de *Moringa oleifera* L. diversos autores relataram a realização de secagem dos grãos antes do processo de moagem para obtenção do pó, no entanto, não existe uma recomendação específica, alguns autores secaram os grãos em estufa durante 24 horas sob temperatura de 50 °C, outros em dessecador durante período de 1, 2 ou 3 dias. Outros autores apenas indicam que utilizaram grãos secos, mas não informam se realizaram secagem. Todos esses autores utilizaram grãos secos em seus estudos, sejam colhidos secos ou com a realização de secagem artificial, no entanto nenhum deles relata sobre a importância da utilização dos grãos secos para o tratamento de água.

As razões pelas quais se faz necessário utilizar grãos secos nos procedimentos que visam o tratamento de água foi citada por Ndabigengesere *et al.* (1995), os quais constataram que somente grãos obtidos de vagens de *Moringa oleifera* L. secas apresentam atividade coagulante. Ressalta-se também que a utilização de grãos secos facilita a operação de moagem, etapa realizada na preparação da solução coagulante. Considerando-se que a quantidade de grãos colhidos seja superior à demanda momentânea ou que os mesmos não sejam utilizados imediatamente após a colheita, estes deverão ser armazenados, e para isso, um dos cuidados que se deve ter é mantê-los fora da faixa favorável ao desenvolvimento de microrganismos, ou seja, com baixo teor de água.

Na literatura científica pesquisada não existem estudos que avaliem as condições operacionais da secagem e nem recomendações relacionadas ao efeito desse processo sobre a qualidade dos grãos de *Moringa oleifera* L. utilizados como coagulante natural no tratamento de água. Os autores colhem os grãos aparentemente secos e/ou secam esse produto sem critérios definidos, não informando o teor de água no momento da colheita e no final da secagem.

1.1 HIPÓTESE

A aplicação da radiação infravermelha em secagem convectiva de grãos de *Moringa oleifera* L. é viável tecnicamente e eficiente na transferência de calor para a remoção de água, além de manter os atributos de qualidade dos grãos para utilização em tratamento de água, como coagulante natural.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial de aplicação da radiação infravermelha intermitente em associação com ar aquecido na secagem de grãos de *Moringa oleifera* L., quanto à eficiência de secagem, consumo energético e utilização como coagulante natural no tratamento de água.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar caracterização dos grãos de *Moringa oleifera* L., quanto às propriedades físicas e análises físico-químicas;
- Selecionar dentre os fatores: temperatura e velocidade do ar, intensidade e tempo de aplicação da radiação infravermelha, aqueles que exercem efeito significativo sobre a secagem de grãos de *Moringa oleifera* L., tais como: teor de água, atividade de água, tempo de secagem, taxa de secagem e difusividade efetiva da água;

- Avaliar a representação e ajuste dos modelos da segunda lei de Fick de difusão, Page, Midilli e Newton aos dados experimentais da secagem de grãos de *Moringa oleifera* L;
- Definir as condições de máxima resposta dos fatores significativos do processo de secagem convectiva com aplicação de radiação infravermelha intermitente, avaliando a eficiência do processo e a qualidade dos grãos destinados ao tratamento de água;
- Estabelecer relações matemáticas entre os parâmetros de operação da secagem e a qualidade do produto por meio de modelos matemáticos;
- Avaliar o comportamento da temperatura no interior da câmara de secagem e dentro dos grãos de *Moringa oleifera* L. durante os ensaios de secagem;
- Avaliar o consumo de energia dos ensaios de secagem.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Secagem de produtos biológicos

A remoção de água é o objetivo primordial das operações de secagem de produtos biológicos, o que confere maior vida útil, baixo custo de embalagem e redução do custo de transporte. A execução desse processo geralmente envolve aplicação de calor, que pode ser realizada pela passagem forçada de ar aquecido (convecção) através do produto, condução indireta do calor por meio de uma superfície de metal, aplicação de pressões negativas (vácuo), utilização de radiação infravermelha e energia de micro-ondas.

Durante a secagem ocorrem simultaneamente os processos de transferência de calor e massa, de forma que o calor é transferido para a amostra ocasionando redução do seu teor de água na medida em que aquece. O ponto de equilíbrio é alcançado quando a temperatura da amostra não apresenta alterações significativas, encerrando a transferência de calor. A transferência de massa, por sua vez, ocorre devido à pressão de vapor da amostra ser maior que a do ar, assim o teor de água da amostra é transferido para o seu entorno até ser alcançada a condição de equilíbrio entre as pressões de vapor dentro e fora da amostra (MCMINN e MAGEE, 1999; OKOS *et al.*, 2007; VILLA-CORRALES *et al.*, 2010).

2.1.1 Secagem convectiva

A convecção forçada de ar aquecido é o processo de secagem mais utilizado na conservação de alimentos. Consiste na redução do teor de água do produto por meio da passagem forçada de ar aquecido, com baixa umidade relativa, através do produto. A redução do teor de água provoca diminuição da massa, do volume, do crescimento de fungos e da atividade enzimática e microbiana (VILLA-CORRALES *et al.*, 2010).

A produção de alimentos secos em larga escala é frequentemente realizada pela utilização da técnica de secagem convectiva (OKOS *et al.*, 2007). Durante o processo, ocorrem diversas mudanças físicas, químicas e nutricionais nos alimentos e são afetadas por uma série de parâmetros internos e externos de transferência de calor e massa. Parâmetros externos podem incluir a velocidade, temperatura, pressão e umidade relativa do ar de secagem, enquanto os parâmetros internos estão relacionados com a natureza física do

alimento, composição, teor de água, densidade, permeabilidade, porosidade e características de sorção-dessorção do material (MCMINN e MAGEE, 1999; OKOS *et al.*, 2007; KAYA *et al.*, 2008).

Durante operações de secagem convectiva, a transferência de calor ocorre devido à movimentação de um fluido aquecido. O movimento do fluido, no caso da secagem o ar, provoca a transferência de energia do ar quente para regiões frias (WILHEM *et al.*, 2005). Assim, o calor é transferido do ar para a superfície do alimento, sendo utilizado na forma de calor sensível para elevação da temperatura e na forma de calor latente para evaporação da água, ou transferência de massa (ANWAR e TIWARI, 2001). Convecção natural ocorre quando o movimento do ar aquecido move-se devido a diferenças de densidade no ar. Convecção forçada ocorre quando o ar é movido por outros métodos, como por exemplo, bomba ou ventilador. A transferência de calor convectivo entre um fluido e uma superfície é normalmente escrita em termos do coeficiente de transferência de calor convectivo. Assumindo a transferência de calor de um fluido para uma superfície, a equação é dada por (WILHEM *et al.*, 2005):

$$Q = h_c A (T_g - T_f) \quad (1)$$

Baseado no pressuposto teórico mencionado, verifica-se que a secagem convectiva promove a transferência de calor de forma indireta para o condicionamento do ar de secagem (temperatura e umidade relativa). Apresentando assim, baixa eficiência energética, o que eleva o custo de processo. Outro inconveniente é o longo tempo de secagem, provocado pela transferência de calor do ar para o produto ocorrer lentamente. Diversos autores vêm estudando fontes de energia que associem desempenho satisfatório da operação de secagem a alta eficiência energética, reduzindo-se as perdas. Swasdisevi *et al.* (2007) apontam para a radiação do infravermelho distante como técnica de secagem alternativa devido ao aquecimento rápido, à maior uniformidade e à característica da radiação ser transferida do elemento de aquecimento ao produto sem aquecer o ar que circunda o produto de interesse.

2.1.2 Secagem com radiação no infravermelho distante

2.1.2.1 Princípios básicos da radiação infravermelha

A radiação incidente sobre um corpo pode ser absorvida, refletida ou transmitida, seguindo o balanço da Equação 2. Tratando-se de radiação térmica, a parte absorvida é convertida em calor (RATTI e MUJUMDAR, 2006).

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2)$$

Os materiais podem ser classificados baseando-se em suas características de transmissividade, dependendo do estado físico do corpo quando a radiação é incidida. Um corpo que não permite a radiação ser transmitida através dele é chamado opaco ($\tau = 0$). Denomina-se corpo negro ($\alpha = 1$) a substância que absorve toda a energia que incide sobre ela. Corpo branco, ao contrário, trata-se daquele que a reflete ($\rho = 1$) (KEEY, 1972; RATTI e MUJUMDAR, 2006).

Quando um corpo negro é aquecido a uma temperatura T, energia eletromagnética é emitida da superfície. A quantidade de radiação emitida por unidade de área é dependente da temperatura e das características da superfície do corpo. O corpo negro também é definido como aquele que emite o máximo de radiação. Dessa forma, o poder emissivo do corpo negro depende somente da sua temperatura. A emissividade de um determinado corpo é, então, definida como a razão entre a emissividade total em relação à do corpo negro para a mesma temperatura (Equação 3) (KEEY, 1972; RATTI e MUJUMDAR, 2006).

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \quad (3)$$

A Lei de Plank representa o fluxo de energia E_λ irradiado de um corpo negro numa faixa de comprimento de onda de λ para $\lambda + d\lambda$ (Equação 4) (SAKAI e MAO, 2006).

$$E_\lambda = \frac{2\pi c^2}{\lambda^5} \frac{d\lambda}{\exp\left(\frac{ch}{k_0 \lambda T_K}\right) - 1} \quad (4)$$

A Figura 1 demonstra que o aumento da energia de radiação com a elevação da temperatura do corpo negro. Observa-se ainda que o pico de comprimento, λ_{max} , correspondente à máxima energia de radiação, encurta-se com o aumento da temperatura.

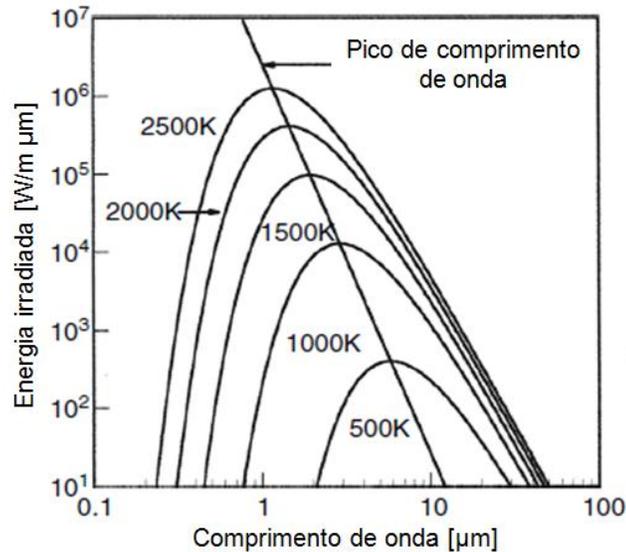


Figura 1. Característica espectral da radiação de corpo negro a diferentes temperaturas.

Fonte: Sakai e Mao, 2006.

A lei de deslocamento de Wien (Equação 5) relaciona λ_{max} e T_K pela diferenciação da Equação 4. Considera-se a temperatura constante e fixa-se o resultado igual a zero (SAKAI e MAO, 2006).

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T_K} \quad (5)$$

A Lei de Stefan-Boltzmann (Equação 6) permite a obtenção da emissividade total da energia irradiada pelo corpo negro por meio da integração da Equação 4 para todos os comprimentos de onda. Essa lei mostra que a energia radiante do corpo negro é proporcional à quarta potência da sua temperatura (RATTI e MUJUMDAR, 2006).

$$E_b = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda = \sigma T_K^4 \quad (6)$$

A energia irradiada por um aquecedor infravermelho ou por um alimento é menor que a emitida pelo corpo negro à mesma temperatura. A eficiência da emissividade desse material

é dada pela razão entre a energia radiada total do material em relação à do corpo negro (Equação 7).

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} = \frac{E}{\sigma T_K^4} \quad \therefore E = \varepsilon \sigma T_K^4 \quad (7)$$

onde, ε é um número entre 0 e 1 e o material que obedece essa equação é denominado corpo cinza (SAKAI e MAO, 2006).

2.1.2.2 Características da radiação infravermelha aplicada à secagem de produtos biológicos

Radiação infravermelha é uma forma de energia eletromagnética, compreendida entre a luz visível (0,38 – 0,78 μm) e a energia de micro-ondas (1 – 1000 mm) (SAKAI e MAO, 2006; NINDO e MWITHIGA, 2011). No espectro eletromagnético sua banda abrange comprimentos de onda de 0,78 – 1000 μm . Além disso, a radiação infravermelha é dividida em três classes (Figura 2): infravermelho próximo (0,78 – 3 μm); infravermelho médio (3,0 – 25 μm) e infravermelho distante (25 – 1000 μm) (NINDO e MWITHIGA, 2011). No entanto, essa classificação não é utilizada por outros autores. Um exemplo disso é a classificação utilizada por Sakai e Mao (2006), a qual define os comprimentos de onda entre 0,78 a 1,4 μm como infravermelho próximo, 1,4 a 3 μm como infravermelho médio e de 3 a 1000 μm como infravermelho distante.

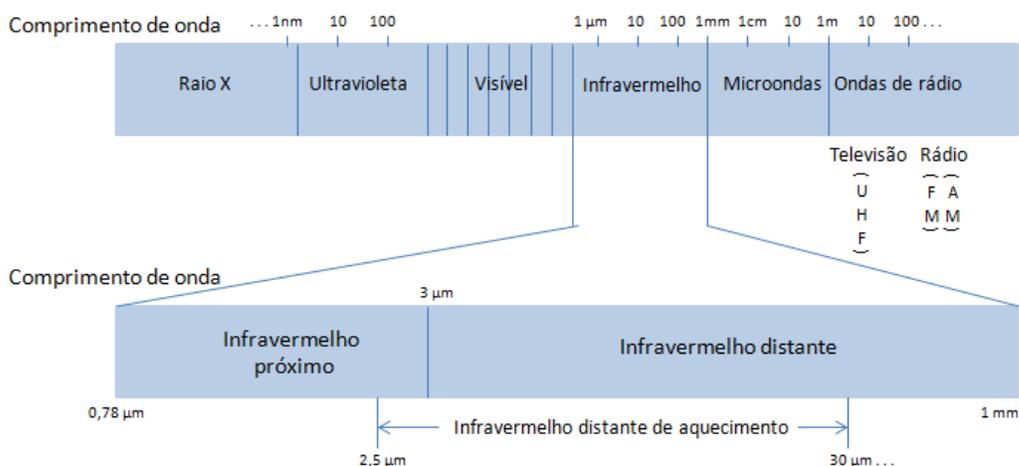


Figura 2. Espectro eletromagnético com ênfase na localização da radiação infravermelha.

Fonte: Nindo e Mwithiga, 2011.

A amplitude da faixa de comprimento de onda relativa à radiação térmica é distinta entre os especialistas. Sakai e Mao (2006) consideram, para fins de aquecimento industrial, comprimentos de onda na faixa de 2,5 μm a 30 μm . Nindo e Mwithiga (2011) afirmam que para fins de secagem são geralmente utilizados comprimentos de onda de infravermelho de 2,5 μm a 2000 μm . Keey (1972) considera, para todos os materiais de engenharia, que a radiação térmica ocorre dentro da faixa de 0,2 μm e 800 μm . Sandu (1986) e Ratti e Mujumdar (2006) afirmam que, quando incidente sob um corpo físico, a radiação na faixa de 0,1 μm a 100 μm gera calor.

Uma vez que produtos alimentícios submetidos à secagem geralmente contêm grande quantidade de água, a absorção da energia infravermelha pela água é uma variável importante, que afeta a cinética de secagem. Em comprimento de onda curto a radiação infravermelha é transmitida pela água, enquanto que em comprimento de onda longa essa energia é absorvida na superfície. Dessa forma, operações de secagem em camada delgada apresentam maior eficiência em comprimento de onda longo, enquanto secagem em camada espessa obtém melhor resultado em comprimento de onda curto (NOWAK e LEWICKI, 2004). Keey (1972) afirma, entretanto, que comprimento de onda curto corresponde à maior temperatura na superfície.

As quatro principais bandas de absorção para água líquida são 3 μm , 4,7 μm , 6 μm e 15,3 μm . Os comprimentos de absorção de aminoácidos, proteínas e ácidos nucleicos correspondem a duas faixas: 3 – 4 μm e 6 – 9 μm . Enquanto lipídeos absorvem em três faixas do espectro: 3 – 4 μm , 6 μm e 9 – 10 μm . Açúcares, por sua vez, apresentam absorção em 3 μm e na faixa de 7 a 10 μm (SANDU, 1986).

Na secagem com radiação infravermelha o calor é transferido para o material a ser seco na forma de energia eletromagnética. A determinação, no espectro, do comprimento de onda de uma radiação depende da natureza e da temperatura da fonte de calor. Esse método de secagem envolve o uso de geradores de radiação infravermelha, tais como lâmpadas elétricas especiais e painéis cerâmicos ou metálicos aquecidos por eletricidade ou gás. A transmissão da radiação eletromagnética não necessita de um meio para sua propagação e o material a ser seco constitui-se no absorvedor da radiação (RATTI e MUJUMDAR, 2006; NINDO e MWITHIGA, 2011).

A taxa da transferência de energia entre o aquecedor e o alimento depende da diferença de temperatura entre a fonte e o alimento. A radiação infravermelha distante emitida do aquecedor passa através do ar e é absorvida pelo alimento; a energia é, então, convertida em calor por interação com as moléculas no alimento. O calor passa em todo o alimento a partir da camada superficial por condução (SAKAI e MAO, 2006).

As vantagens da radiação infravermelha na transferência de calor que a torna adequada em processos de secagem são:

- A energia é transmitida diretamente para o produto de acordo com as leis da óptica, reduzindo o tempo de processamento e custo com energia;
- Nenhum contato com o material é requerido;
- A radiação infravermelha, similar à luz visível, pode ser direcionada para aumentar a intensidade de aquecimento;
- Altas taxas de transferências de calor são alcançáveis com aquecedores compactos;
- A instalação de aquecedores é simples e possível em projetos compactos e automáticos;
- Possibilidade de utilização combinada com secagem convectiva, condutiva e micro-ondas;
- Pode ser associado eficientemente com operações a vácuo para permitir a remoção da água evaporada;
- O aquecimento pode ser aplicado continuamente ou de forma intermitente ao longo do tempo de secagem, para economizar energia e manter a qualidade do produto;
- Nenhuma poluição do meio ambiente quando comparado aos combustíveis fósseis, os quais são chamados não renováveis (RATTI e MUJUMDAR, 2006; SAKAI e MAO, 2006; NINDO e MWITHIGA, 2011).

Sakai e Mao (2006) alertam, no entanto, que um controle exato do aquecimento é requerido porque existe o perigo de superaquecimento devido às altas taxas de aquecimento.

Embora a radiação infravermelha apresente todas as vantagens citadas, também existem limitações. As principais estão relacionadas à pequena penetração no material e ao aquecimento desuniforme (KEEY, 1972; NINDO e MWITHIGA, 2011). Condições

homogêneas somente ocorrem em materiais planos e finos. Em alimentos, a espessura e a absorção diferencial pelas proteínas, gorduras, carboidratos e água podem influenciar na uniformidade da secagem. Fatores como: características da superfície do material, composição espectral e direção da radiação incidente também determinam a absorção da radiação. As variáveis: espaçamento entre os aquecedores e distância entre a fonte de radiação e o produto também interferem na homogeneidade do aquecimento (NINDO e MWITHIGA, 2011).

Sandu (1986) recomenda a aplicação de radiação intermitente para a secagem de produtos alimentícios que apresentem espessura maior que a profundidade de penetração da radiação. Nesse caso, o fornecimento de energia deve ser maior no primeiro estágio de secagem, quando o teor de água é maior na camada superficial, e curtos períodos de irradiação alternados com pausas suficientemente longas no estágio de transferência de massa do interior do produto para a camada superficial.

A radiação infravermelha tem sido utilizada na secagem de alimentos, como: maçã (NOWAK e LEWICKI, 2004; TOGRUL, 2005; ZHU e PAN, 2009; ZHU *et al.*, 2010), banana (NIMMOL *et al.*, 2007; SWASDISEVI *et al.*, 2007; SWASDISEVI *et al.*, 2009), abacaxi (TAN *et al.*, 2001; PONKHAM *et al.*, 2011), uva (CELMA *et al.*, 2009b), cebola (MONGPRANEET *et al.*, 2002; SHARMA *et al.*, 2005; GABEL *et al.*, 2006), batata (TAN *et al.*, 2001), batata doce (LIN *et al.*, 2005; DOYMAZ, 2011), tomate (CELMA *et al.*, 2009a), cenoura (TOGRUL, 2006) e arroz em casca (ABE e AFZAL, 1997; PAN *et al.*, 2008).

A secagem com aplicação exclusiva de radiação infravermelha foi realizada em resíduos industriais de tomate por Celma *et al.* (2009a) e em fatias de maçã por Togrul (2005). Em ambos os estudos foi observado elevação na taxa de secagem e redução do tempo de processo com o aumento do aquecimento fornecido pelos emissores de radiação.

Diversos autores utilizaram a radiação infravermelha em associação com outros métodos de secagem. Mongpraneet *et al.* (2002), Swasdisevi *et al.* (2007) e Swasdisevi *et al.* (2009) realizaram secagem com radiação no infravermelho distante sob condições de vácuo. Nowak e Lewick (2004) e Ponkham *et al.* (2011) combinaram a secagem convectiva com a aplicação da radiação no infravermelho distante. Tan *et al.* (2001) aplicaram infravermelho intermitente e aquecimento convectivo contínuo em produto pré-tratado osmoticamente.

Nimmol *et al.* (2007) estudaram a associação de vapor de alta pressão superaquecido com radiação no infravermelho distante. Lin *et al.* (2005) avaliaram o efeito da radiação do infravermelho distante sobre o processo de liofilização de batata-doce.

Estudo comparativo entre a secagem com radiação infravermelha e com ar convectivo, sob condições equivalentes, foi desenvolvido por Nowak e Lewick (2004). Radiadores de infravermelho próximo com pico de comprimento de onda a 1200 nm, níveis de velocidade do ar de $0,5 \text{ m s}^{-1}$, $1,0 \text{ m s}^{-1}$, $1,5 \text{ m s}^{-1}$ e altura de aplicação da radiação infravermelha de 10 cm, 20 cm, 30 cm foram utilizados na secagem de fatias de maçã ($5,5 \pm 0,1 \text{ mm}$). Verificaram que, em relação à secagem convectiva, o tempo de processo pode ser reduzido em 50% quando o aquecimento é feito com energia infravermelha. A cinética da secagem com infravermelho foi inversamente proporcional tanto à distância dos emissores quanto à velocidade do ar.

A utilização combinada da radiação no infravermelho distante com ar convectivo na secagem de rodela de abacaxi foi estudada por Ponkham *et al.* (2011). Intensidade de radiação de $1\text{-}5 \text{ kW m}^{-2}$, temperatura do ar de $40\text{-}60^\circ\text{C}$ e velocidade do ar de $0,5\text{-}1,5 \text{ m s}^{-1}$ foram as condições de secagem consideradas. Com maiores intensidades de radiação, a maior absorção de calor resultou em maior transferência de massa, acelerando a taxa de secagem e, conseqüentemente, reduzindo o tempo de secagem. O aumento da velocidade do ar, entretanto, resultou em decréscimo da temperatura do produto, devido ao efeito do resfriamento, mas não afetou significativamente a redução do teor de água.

Utilizando potência de infravermelho de 300 W, 400 W e 500 W, temperatura do ar de 35°C , 40°C e 45°C e velocidade do ar de $1,0 \text{ m s}^{-1}$ a $1,5 \text{ m s}^{-1}$, Sharma *et al.* (2005) realizaram secagem convectiva com aplicação de radiação infravermelha de fatias de cebola. Observaram redução do tempo de secagem de aproximadamente 2,25 vezes com o aumento da potência do infravermelho de 300 W para 500 W, da temperatura do ar de 35°C para 45°C e da velocidade do ar de $1,0$ a $1,5 \text{ m s}^{-1}$.

Afzal *et al.* (1999) realizaram secagem de cevada associando ar convectivo e radiação infravermelha e compararam com a secagem aplicando somente ar aquecido. As condições utilizadas foram intensidade de radiação de $0,167 - 0,500 \text{ W cm}^{-2}$, temperatura do ar de $40 -$

70°C e velocidade do ar de 0,3 m s⁻¹ - 0,7 m s⁻¹. Observaram que a taxa de secagem foi maior e o tempo de secagem menor sob secagem combinada quando comparado com a utilização somente da secagem convectiva. Entretanto, maiores intensidades de radiação repercutiram em redução da porcentagem de germinação das sementes de cevada. Menor velocidade do ar propiciou tempo de secagem mais curto, porém favoreceu a maior deterioração da qualidade em relação a maiores velocidades devido ao aumento da temperatura da cevada.

Swasdisevi *et al.* (2007) aplicaram radiação no infravermelho distante associada com condições de vácuo na secagem de fatias de banana. Foram utilizadas pressões de vácuo de 5 kPa, 10 kPa e 15 kPa, temperaturas de 50°C, 55°C e 60°C e espessuras das fatias de 2 mm, 3 mm e 4 mm. Observaram que a pressão de vácuo, a temperatura e a espessura tiveram efeito significativo na cinética de secagem e em relação à cor, firmeza e encolhimento. A melhor condição de secagem foi temperatura de 50°C, pressão de 5 kPa e espessura de 2 mm.

Dentre as aplicações da radiação infravermelha em alimentos, Pan e Atungulu (2011) propõem sua utilização para fins de branqueamento. Dessa forma, dois processos podem ser realizados em um único procedimento, tanto a inativação de enzimas responsáveis pela alteração da cor de frutas e vegetais, como a secagem desses produtos. Zhu e Pan (2009) realizaram processo simultâneo de branqueamento e secagem com radiação infravermelha em fatias de maçã com aquecimento contínuo. Os parâmetros estudados foram intensidade de radiação (3000, 4000 e 5000 W m⁻²), espessura das fatias (5, 9 e 13 mm) e tempo de processamento (2, 5, 7, 10, 15 e 20 min). Verificaram que alta intensidade de radiação e/ou espessura fina aumentaram a temperatura do produto mais rapidamente, com maior rapidez na remoção de água e inativação das enzimas polifenol oxidase e peroxidase, em relação à menor intensidade de radiação.

2.2 Curva característica de secagem

Cinética de secagem refere-se às alterações do teor de água do material e da temperatura do ar ao longo do tempo, sendo necessária para calcular a quantidade de água evaporada, tempo de secagem, consumo de energia e qualidade do produto. As alterações do teor de água do material e da temperatura do ar são geralmente controladas por transferência

de calor e massa, entre a superfície sólida, o ambiente e no interior do produto (CARRÍN e CAPRISTE, 2009).

Curvas representativas do processo de secagem são construídas a partir de dados obtidos em ensaios laboratoriais, em que medições das alterações de massa e temperatura da amostra são realizadas ao longo do tempo. Esses ensaios são realizados em estado estacionário, ou seja, com as condições externas de temperatura, velocidade e umidade relativa do ar constantes (CARRÍN e CAPRISTE, 2009). A partir dos dados experimentais, pode-se determinar a taxa de secagem, que é definida como a quantidade de água removida do produto em um determinado intervalo de tempo. Sendo, então, calculada pela derivada do teor de água em função do tempo (OKOS *et al.*, 2007; CARRÍN e CAPRISTE, 2009). Okos *et al.* (2007) ressalta que a taxa de secagem é importante para a seleção do secador adequado.

Keey (1978), Okos *et al.* (2007) e Carrín e Capriste (2009) afirmam que o processo de secagem pode ser dividido em dois períodos característicos, denominados período de taxa constante (ou inicial) e período de taxa decrescente. O período de taxa decrescente subdivide-se ainda em duas seções. Ao ponto de teor de água na transição entre esses períodos é chamado de teor de água crítico por diversos autores, mas Oliveira (2009) considera somente esse ponto como de inflexão, uma vez que não depende apenas das características do produto alimentício, mas também das condições psicrométricas do ar de secagem e do tipo de secador empregado.

A Figura 3 ilustra um processo típico de secagem convectiva sob condições externas constantes e quando a temperatura inicial do produto é inferior à temperatura de bulbo úmido do ar.

No período de secagem inicial (Figura 3: linha A – B) o material é aquecido enquanto ocorre evaporação na superfície do produto. No período de taxa constante (Figura 3: B – C) o teor de água diminui linearmente com o tempo, de forma que a taxa de secagem, proporcional à inclinação, é constante. A água evapora como se o produto não tivesse matriz sólida e ocorre até que a água do interior já não esteja disponível na superfície. Este comportamento ocorre até o teor de água crítico (C) ser alcançado. O período de taxa decrescente (Figura 3: C – E) apresenta duas seções, no primeiro período de secagem (Figura 3: C – D), do ponto C para o D

as áreas úmidas da superfície tornam-se completamente secas. No segundo período de secagem (Figura 3: linha D – E) a água se move do centro para a superfície do produto por evaporação. Neste período a taxa de secagem é relativamente pequena, no entanto, pode levar um tempo consideravelmente longo para atingir o teor de água de equilíbrio (OKOS *et al.*, 2007; CARRÍN e CAPRISTE, 2009).

Ressalta-se ainda que no período inicial da secagem (Figura 3), o produto tem uma temperatura menor que a temperatura de bulbo úmido (T_{wb}). Posteriormente, a taxa de secagem na faixa entre os pontos A e B aumenta com a temperatura do produto até a temperatura da superfície atingir o valor da T_{wb} . No período de secagem de taxa constante (B – C na Figura 3) a temperatura do material é igual à temperatura de bulbo úmido. Em secagem de produtos higroscópicos ou quando o processo é controlado pelo transporte de massa interna o período de taxa constante não se pronuncia. O período de taxa decrescente (C – E na Figura 3) começa quando a razão de umidade atingiu o valor crítico (MR_c) ou ponto de inflexão. Altas taxas de secagem elevam o ponto crítico e as baixas taxas de secagem o diminuem. Neste ponto, a quantidade de água na superfície de secagem começa a diminuir gradualmente, levando à redução da pressão de vapor acima da superfície do material, o que reduz a taxa de secagem. No início deste período a superfície do produto não está mais inteiramente úmida e com o passar do tempo a área úmida diminui continuamente até que a superfície se apresente completamente seca no ponto D (Figura 3). O segundo período de taxa decrescente começa neste ponto, quando a superfície está completamente seca. Como o teor de água diminuiu a resistência interna à transferência de massa pode tornar-se predominante, enquanto a temperatura do produto se aproxima da temperatura de bulbo seco. O teor de água assintoticamente atinge o valor de equilíbrio para as condições psicrométricas do ar de secagem, umidade relativa e temperatura (CARRÍN e CAPRISTE, 2009).

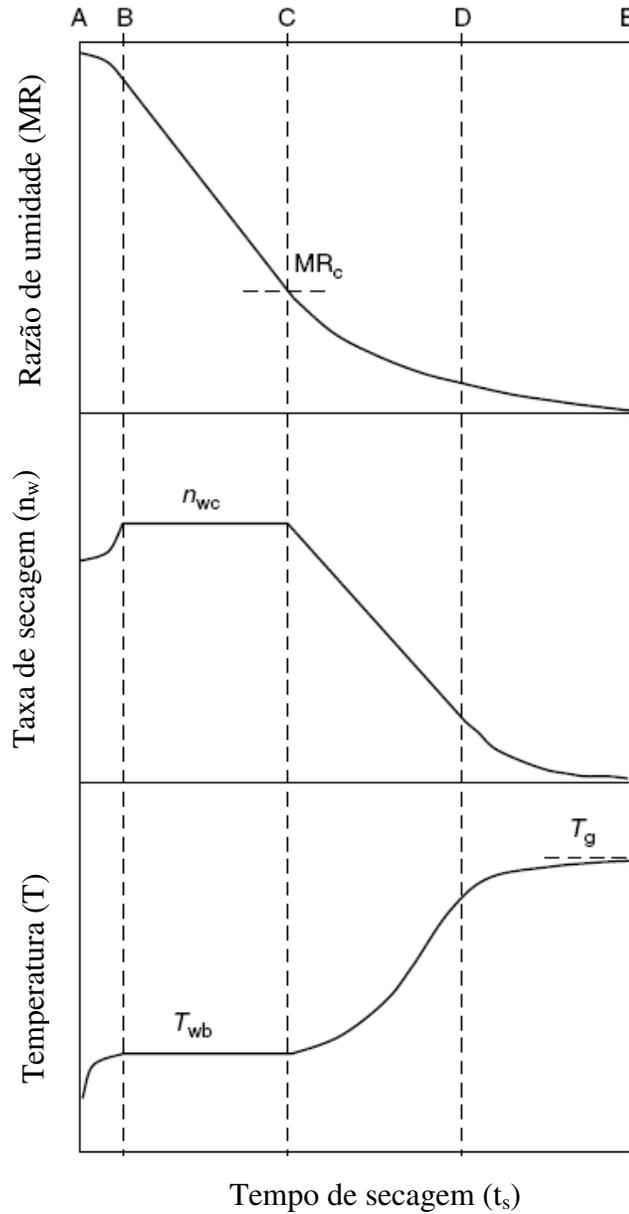


Figura 3. Comportamento típico da secagem convectiva sob condições externas constantes.
 Fonte: Carrín e Capriste, 2009

Okos *et al.* (2007) afirmam ainda que a taxa de secagem no período de taxa constante é determinado por condições externas ao produto a ser seco, incluindo a temperatura e velocidade do ar, pressão total e pressão parcial de vapor. A transferência de massa durante esse período envolve a difusão de vapor de água da superfície do material através de uma camada limite para o meio de secagem. Durante o período de taxa decrescente, a taxa de secagem diminui com o tempo, e a taxa de transferência de massa interna à superfície do

material normalmente controla o processo. A taxa decrescente da secagem pode ser observada quando a resistência da transferência interna de massa controla o processo e a pressão de vapor da superfície da matriz sólida decresce com a redução do teor de água.

2.3 Modelagem matemática de processos de secagem

A modelagem matemática da secagem é complexa, pois além de considerar que ocorrem simultaneamente processos de transferência de calor e massa, os mesmos devem ser ajustados para o formato do produto e tipo de secagem. Diversos trabalhos são encontrados na literatura relacionados à modelagem da secagem de alimentos. O estudo desses modelos é importante para o dimensionamento de secadores, previsão da taxa de secagem, melhoria das condições de secagem e avaliação da qualidade do processo.

Celma *et al.* (2009a) considera que os aspectos mais relevantes das operações de secagem são a modelagem matemática do processo e o equipamento. Uma modelagem precisa do comportamento de secagem de alimentos requer regressões específicas e métodos estatísticos de correlação, para a obtenção de equações que permitem uma descrição adequada do sistema.

Processos de secagem de produtos biológicos ocorrem principalmente no período de taxa decrescente, como observado por Sharma *et al.* (2005) e Celma *et al.* (2009a) em secagem com fatias de cebola e resíduos de tomate, respectivamente. Nesse período de secagem a difusão da umidade representa todos os mecanismos de transferência de água, tais como: fluxo capilar (difusão em fase líquida); migração de umidade da camada adsorvida; vaporização-condensação e difusão de vapor no ar.

A equação de balanço de massa de água no interior do produto proposta pela lei de Fick (Equação 8), que expressa o fluxo de massa por unidade de área como sendo proporcional ao gradiente de concentração de água, tem sido amplamente utilizada para descrever processos de secagem durante o período de taxa decrescente para a maioria dos materiais biológicos (SRIKIATDEN e ROBERTS, 2006; HASSINI *et al.*, 2007; OLIVEIRA, 2009).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ef} \nabla X) \quad (8)$$

A difusividade efetiva da água, como mencionado, representa o termo condutor de todos os mecanismos de transferência de água e normalmente é determinada a partir de curvas de secagem experimental. Os critérios importantes dessa determinação é que a secagem seja limitada à transferência de massa e que a temperatura permaneça isotermicamente em toda a amostra durante todo o curso da secagem (SRIKIATDEN e ROBERTS, 2006).

O modelo de Page (Equação 9) também é utilizado frequentemente na representação de curvas de secagem (DOYMAZ, 2004):

$$MR = \exp(-kt_s^n) \quad (9)$$

A dependência da difusividade efetiva em relação à temperatura e teor de água é geralmente descrita pela equação de Arrhenius (Equação 10) (CARRÍN e CAPRISTE 2009):

$$D_{ef} = D_0(X) \exp\left(-\frac{E_a(X)}{R_c T_K}\right) \quad (10)$$

Abe e Afzal (1997), Afzal e Abe (1998), Sharma *et al.* (2005) Celma *et al.* (2009a), Celma *et al.* (2009b) e Ponkham *et al.* (2011) realizaram secagem com aplicação da radiação no infravermelho distante de arroz, batata, cebola, resíduos de tomate, resíduos de uva e abacaxi, respectivamente, e utilizaram a segunda lei de Fick para estimar o coeficiente de difusividade da água e a equação de Arrhenius para a obtenção da energia de ativação da secagem.

Quando a teoria difusional não é adequada para descrever o comportamento da taxa de secagem, devido a interferências no efeito de resistência interna do material, pode-se aplicar os modelos empíricos (OLIVEIRA, 2009). Modelos semi-teóricos amplamente utilizados na literatura científica para descrever a cinética de processos de secagem são apresentados por Celma *et al.* (2009a). Abe e Afzal (1997) avaliaram o ajuste de quatro modelos matemáticos (exponencial, Page, de difusão e aproximação do modelo de difusão) para descrever a secagem com infravermelho de camada delgada de arroz. Observaram que o modelo exponencial, Page e aproximação da difusão foram estatisticamente similares, mas o

modelo de Page descreveu melhor o processo. Zhu *et al.* (2010) avaliaram o modelo de Page na descrição do comportamento da secagem com infravermelho de fatias de maçã e também observaram bom desempenho do modelo.

Dados experimentais de secagem com infravermelho de fatias de maçã e cenoura foram aplicados a várias equações de secagem (Newton, Page modificado, logarítmico, aproximado da difusão e modelo de Midilli) por Togrul (2005) e Togrul (2006), respectivamente. A equação de Midilli foi a que melhor caracterizou o comportamento da secagem desses produtos na faixa de temperatura de 50 a 80 °C.

A Tabela 1 apresenta os modelos que foram aplicados na secagem com radiação infravermelha para diferentes tipos de produtos. Dentre os artigos apresentados o modelo de Page foi o mais utilizado.

Tabela 1. Tipo de modelo aplicado na descrição da secagem com aplicação de radiação infravermelha em função do produto.

Modelo	Produto	Referência
Page	Arroz em casca	Abe e Afzal (1997)
	Maçã	Togrul (2005)
	Cenoura	Togrul (2006)
	Cebola	Gabel <i>et al.</i> (2006)
	Abacaxi	Ponkham <i>et al.</i> (2011)
	Maçã	Zhu e Pan (2009)
	Batata doce	Lin <i>et al.</i> (2005)
Modelo de difusão de Fick	Cenoura	Togrul (2006)
	Batata doce	Lin <i>et al.</i> (2005)
	Abacaxi	Ponkham <i>et al.</i> (2011)
	Arroz em casca	Abe e Afzal (1997)
Henderson e Pabis	Abacaxi	Ponkham <i>et al.</i> (2011)
	Maçã	Togrul (2005)
Newton, Lewis ou Exponencial	Arroz em casca	Abe e Afzal (1997)
	Batata doce	Lin <i>et al.</i> (2005)

2.4 Consumo energético de operações de secagem

A demanda energética em processos de secagem convectiva deve-se aos sistemas de aquecimento e ventilação, enquanto que na secagem com aplicação de radiação infravermelha refere-se aos emissores da radiação. O consumo de energia de ambos os processos está diretamente relacionado à potência dos equipamentos envolvidos e ao tempo de secagem.

Em processo combinado de aplicação de ar aquecido e radiação infravermelha, elevando-se a potência das resistências radiantes aumenta-se também a intensidade de emissão e, conseqüentemente, o tempo de secagem é reduzido. Entretanto, nesse caso, a velocidade do fluxo de ar tem efeito contrário em relação à taxa de secagem, isso porque a elevação do fluxo de ar provoca maior resfriamento da superfície do produto durante a secagem. Dessa forma, aumentando-se a intensidade de emissão e reduzindo-se a velocidade do ar reduz-se o tempo de secagem, diminuindo-se, assim, o consumo de energia (MONTEVALI *et al.*, 2011).

Afzal *et al.* (1999) realizaram secagem de cevada utilizando ar convectivo e radiação infravermelha. Aplicando intensidade de radiação $0,333 \text{ W cm}^{-2}$, o tempo de secagem foi de 0,92 horas, sendo de 2,43 horas o tempo requerido para alcançar o mesmo resultado quando somente ar aquecido foi utilizado no processo. Os autores concluíram, então, que a aplicação da radiação propiciou secagem mais rápida e reduziu consideravelmente o consumo de energia, quando comparado com o aquecimento convectivo isolado.

A quantificação do consumo de energia das operações de secagem pode ser realizada de forma direta, com a utilização de medidor de grandezas elétricas, ou indireta, por meio de equação que represente o processo. Nimmol e Devahastin (2010) com o objetivo de determinar a energia específica requerida para a secagem convectiva de arroz realizaram a medição da potência em função do tempo requerido para operar um ventilador de alta pressão e resistências elétricas e relacionaram aos dados de água removida (Equação 11).

$$CEE = \frac{E_n}{m_w} \quad (11)$$

Montevali *et al.* (2011) ao contrário, mensuraram o consumo de energia requerido para a secagem convectiva de um quilograma de romã utilizando a Equação 12.

$$E_T = A_T \cdot V \cdot \rho_a \cdot C_a \cdot \Delta T \cdot t_s \quad (12)$$

Afzal *et al.* (1999), por sua vez, calcularam a entalpia requerida para aquecimento do ar das condições ambiente até a temperatura de bulbo seco desejada para a secagem de cevada de acordo com a Equação 13.

$$Energia = K_e \cdot V_o \cdot \Delta T \quad (13)$$

Em relação à secagem com radiação infravermelha, Montevali *et al.* (2011) utilizaram a lei de Stefan-Boltzmann (Equação 6) para calcular a energia demandada pelos radiadores, considerando a equação de Wien (Equação 5) para a mensuração da temperatura máxima emitida pelos aquecedores de infravermelho. O consumo de energia por quilowatt hora foi, então, calculado multiplicando-se a energia determinada na Equação 6 pelo tempo de secagem (em horas) e pela superfície de secagem. Afzal *et al.* (1999) calcularam o consumo de energia de secagem com a radiação infravermelha simplesmente assumindo que os aquecedores de infravermelho apresentam 90% de eficiência na conversão da potência elétrica em calor.

2.5 *Moringa oleifera*

2.5.1 Origem e descrição botânica

A *Moringa oleifera* é uma leguminosa da família Moringaceae, a qual contém um único gênero, *Moringa*, e 13 espécies conhecidas. A espécie arbórea mais difundida é a *Moringa oleifera* Lam. A ocorrência natural dessa planta se estende da Arábia à Índia, sendo amplamente cultivada na África Tropical, América Tropical, Sri Lanka, México, Malabar, Malásia e ilhas Filipinas. Foi introduzida no Brasil por volta de 1950 na região nordeste nos Estados do Maranhão, Piauí e Ceará. Popularmente é conhecida como lírio branco, quiabo-de-quina, Acácia-branca, árvore-rabanete-de-cavalo, cedro e moringueiro (RANGEL, 1999; CYSNE, 2006; VIEIRA *et al.*, 2008).

A espécie *Moringa oleifera* L. é uma árvore perene de pequeno porte, mas de crescimento rápido (1,5 cm por dia), podendo atingir cerca de 12 metros de altura. É constituída de tronco único, copa aberta, folhas verde pálidas, decíduas alternada, pecioladas e compostas. As flores são perfumadas, de coloração creme ou branca e desenvolvem-se agrupadas em inflorescências terminais, denominadas panículas (CYSNE, 2006).

Os frutos são vagens pendulares deiscentes, denominadas cápsulas, com comprimento variando de 30 a 120 cm e 1,8 cm de espessura. Sua coloração varia de verde a marrom, dependendo do estágio vegetativo, apresentando formato triangular, que se quebra longitudinalmente em três partes quando seco. As vagens contêm de 10 a 20 sementes, nas quais o núcleo é encoberto por uma concha escura trialada. As sementes apresentam formato globóide com polpa branca e oleosa medindo até 1 cm de diâmetro. A raiz é semelhante ao rábano, tanto na aparência quanto no sabor (CYSNE, 2006).

A Figura 4 apresenta imagens ilustrativas da árvore, flores, vagens e sementes, com e sem tegumento, de *Moringa oleifera* Lam.

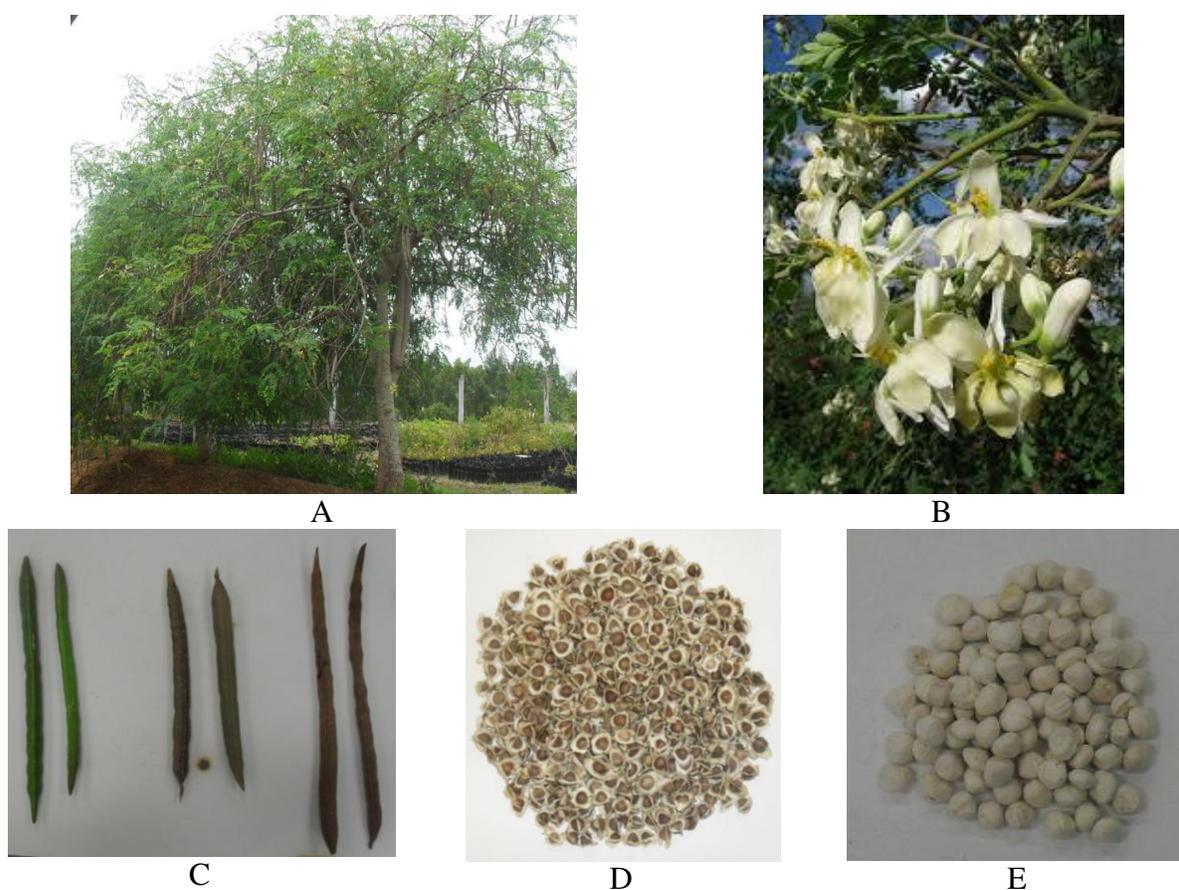


Figura 4. Imagem ilustrativa da árvore (A), flor (B), vagem (C), semente com tegumento (D) e semente sem tegumento (E) de *Moringa oleifera* Lam.

Madrona (2010) realizou a caracterização físico-química de grãos de *Moringa oleifera* L. provenientes de dois cultivos diferentes, sendo a Amostra A originária de Aracajú – SE e a amostra B de Iguatemi – PR. Observou que a composição físico-química foi diferente

para as amostras analisadas, provavelmente devido às condições climáticas e do solo relacionadas ao cultivo dos grãos (Tabela 2).

Tabela 2. Caracterização físico-química de grãos de *Moringa oleifera* L.

Parâmetro	Amostra A (%)	Amostra B (%)
Lipídios	33,98 ± 0,02	29,02 ± 0,02
Proteína	26,72 ± 0,01	28,16 ± 0,02
Teor de água	8,49 ± 0,02	8,61 ± 0,01
Cinzas	2,56 ± 0,03	2,74 ± 0,04
Carboidratos*	28,25 ± 0,04	31,47 ± 0,03

* Carboidratos por diferença

Fonte: Madrona, 2010.

Verma *et al.* (2009) afirmam que as folhas de moringa apresentam propriedades antioxidantes, devido à presença de altos teores de ácidos fenólicos (ácido gálico, ácido clorogênico, ácido elágico e ácido ferúlico) e flavonóides (canferol, quercetina e rutina).

2.5.2 Cultivo e armazenamento

A cultura da *Moringa oleifera* não está incluída no Registro Nacional de Cultivares (RNC) e no Zoneamento Agrícola de Risco Climático, publicados pelo Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA). Embora existam indícios na literatura da ocorrência de seu cultivo em pequena escala, dados relacionadas à área plantada e quantidade produzida ainda não são quantificados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Na internet encontram-se diversas empresas que comercializam sementes e mudas dessa cultura.

O cultivo de *Moringa oleifera* L. pode ser realizado em regiões quentes, semi-áridas e úmidas, sendo adaptada a uma faixa ampla de solos, porém se desenvolve melhor em solos arenosos ou argilosos bem drenados. A faixa de temperatura adequada para o cultivo varia de 26 a 40°C e a precipitação anual deve ser de pelo menos 500 mm. Em relação à altitude, desenvolve-se bem desde o nível do mar até 1000 m (RANGEL, 1999). Estas características fazem da *Moringa oleifera* L. uma espécie adaptada às condições climáticas do Nordeste brasileiro.

A propagação da *Moringa oleifera* pode ser por meio de estacas ou sementes, as quais não requerem tratamento prévio antes da germinação. A taxa de viabilidade das sementes frescas é de aproximadamente 80%, reduzindo-se para cerca de 50% após 12 meses de armazenamento. O plantio pode ser diretamente no campo ou em sementeiras, com transplante após 2 a 3 meses. A época do ano adequada ao plantio é a estação chuvosa (RANGEL, 1999). Pesquisas relacionadas ao estabelecimento de metodologias para micropropagação *in vitro* de *Moringa oleifera* foram desenvolvidas por Cysne (2006) e Léo *et al.* (2008).

Bezerra *et al.* (2004b) observaram que sementes pesadas (272,41 g/1000 sementes) e médias (218,88 g/1000 sementes) apresentam maior porcentagem e velocidade de germinação do que as leves (177,07 g/1000 sementes). Sementes pesadas também proporcionaram plântulas mais vigorosas. O substrato *Plantmax*[®] e a mistura de composta de solo esterilizado, húmus de minhoca e pó de coco lavado (2:1:1 v/v) apresentaram porcentagem e velocidade de germinação superior à vermiculita. As plântulas desenvolveram-se melhor no substrato *Plantmax*[®].

A viabilidade de sementes de *Moringa oleifera* durante armazenamento refrigerado e sob condições naturais (sem controle de temperatura e umidade relativa do ar), foi pesquisada por Bezerra *et al.* (2004a). Observaram manutenção de 85% do poder germinativo em sementes armazenadas em condições refrigeradas (10°C e 55% de umidade relativa) por 12 meses e uma queda para 71% em 24 meses. As sementes armazenadas em condições naturais conservaram a sua porcentagem de germinação inicial (84%) por seis meses (81%), observando-se uma redução significativa dessa variável aos 12 (19%) e 24 (0%) meses de armazenamento.

Teófilo *et al.* (2003) avaliaram a qualidade fisiológica de sementes de *Moringa oleifera* em dois ambientes (câmara fria a 10°C e 55% UR e natural a 30-32°C e 75% UR), duas embalagens (saco de papel multifoliado e garrafa plástica tipo PET de 600 mL) e armazenamento por 9 meses. Verificaram que as sementes possuem comportamento ortodoxo, mantendo-se viável por nove meses quando armazenadas em câmara fria, independente da embalagem e da condição de armazenamento.

2.5.3 Aplicações

Moringa oleifera é considerada uma planta de uso múltiplo. Uma vez que suas raízes, folhas, frutos e sementes têm aplicação alimentícia, tanto para humanos como para animais, medicinal, industrial, em tratamento de água, ornamental, como quebra-vento e em sistemas agroflorestais (FOLKARD e SUTHERLAND, 2011; NDABIGENGESERE e NARASIAH, 1998; GUEVARRA *et al.*, 1999; RICHTER *et al.*, 2003; MENDIETA-ARAICA *et al.*, 2011).

O óleo extraído das sementes é utilizado em aplicações industriais, como na produção de cosméticos, lubrificantes de máquinas e óleo de cozinha devido à alta resistência a rancificação oxidativa (FERREIRA *et al.*, 2008). Pesquisas recentes têm sido feitas avaliando o potencial das sementes de *Moringa oleifera* na produção de biodiesel e de bioinseticidas, inclusive visando à mortalidade de larvas de *Aedes aegypti* (COELHO *et al.*, 2009; RASHID *et al.*, 2011; OLIVEIRA *et al.*, 2011).

Em estudo relacionado ao efeito antimicrobiano da proteína presente em extrato de grãos de *Moringa oleifera*, Ghebremichael *et al.* (2005) observaram agregação celular dessa proteína com *Escherichia coli* e *Bacillus thuringiensis* (BT7 e Bt75). Verificaram também redução da contagem de 1,1 log em *E. coli* (C 31) e de 4 log em *E. coli* (K 12), *B. thuringiensis* (BT7, Bt75) e *P. aeruginosa*.

Gifoni *et al.* (2012) isolaram, a partir de grãos de *Moringa oleifera*, uma proteína de ligação a quitina termoestável (14,3 kDa e pI 10,8), denominada Mo-CBP3, por cromatografia de afinidade em quitina, seguido por cromatografia de troca iônica. Observaram que a Mo-CBP3 apresenta actividade anti-fúngica in vitro contra os fungos fitopatogênicos *Fusarium solani*, *F. oxysporum*, *Colletotrichum musae* e *C. gloesporioides*. Dessa forma, os autores sugerem que a proteína Mo-CBP3 pode ser envolvida nos mecanismos de defesa das plantas e poderia ser utilizada como agente antifúngico em potencial para o controle de fungos patogênicos em plantas.

2.5.3.1 *Moringa oleifera* como coagulante natural

Uma das principais utilizações dos grãos de *Moringa oleifera* é no tratamento de água. Diversos estudos vêm sendo desenvolvidos relacionados à avaliação do potencial destas

quanto à atividade coagulante em águas. Lédo *et al.* (2009) afirmam que grãos de *Moringa oleifera* representam potencial substituto ao sulfato de alumínio na clarificação de águas. Madrona (2010) ressalta que as vantagens da *Moringa oleifera* em relação aos coagulantes químicos (sais de alumínio e ferro) estão relacionadas à biodegradabilidade, baixa toxicidade e baixo índice de produção de lodo residual. Ndabigengesere *et al.* (1995) acrescentam que, ao contrário do sulfato de alumínio, a *Moringa oleifera* não afeta significativamente o pH e a condutividade de águas após o tratamento.

A ação coagulante de extratos de grãos de *Moringa oleifera* é devida à presença de uma proteína catiônica de alto peso molecular. Essa proteína desestabiliza e agrega microrganismos e partículas coloidais contidas na água, que apresentam carga superficial negativa (GHEBREMICHAEL *et al.*, 2005; ARANTES, 2010; MADRONA, 2010).

Gassenschmidt *et al.* (1995) isolaram e caracterizaram a proteína floculante da *Moringa oleifera* Lam. Os autores constataram que a massa molecular da proteína é de cerca de 6,5 kDa com ponto isoelétrico acima de pH 10. Pela análise de aminoácidos e sequenciamento, observaram altos teores de glutamina, arginina, prolina e um total de 60 resíduos. Por outro lado, Ndabigengesere *et al.* (1995) observaram, por meio de diálise, que a proteína capaz de melhorar a qualidade da água apresenta peso molecular entre 12 e 14 kDa.

Ghebremichael *et al.* (2005) avaliaram a extração com sal e água da proteína coagulante de grãos de *Moringa oleifera*, sua purificação usando troca iônica, suas características químicas e propriedades de coagulação. Verificaram que ambos os extratos corresponderam a uma proteína catiônica com ponto isoelétrico maior que 9,6 e de massa molecular inferior a 6,5 kDa. Em análise por espectrometria de massa do extrato de água purificada indicou que continha pelo menos quatro proteínas homólogas. A proteína é termo-resistente e permaneceu ativa após 5 h de tratamento térmico a 95 °C. Com amostras de alta turbidez (250 a 300 NTU), o extrato de *Moringa oleifera* mostrou atividade coagulante semelhante ao sulfato de alumínio.

As operações unitárias básicas no tratamento de água são compostas pelas etapas de coagulação, floculação, sedimentação e/ou flotação e/ou filtração. Durante a etapa de coagulação ocorre a desestabilização das cargas negativas presentes na superfície das

partículas. Posteriormente, realiza-se a etapa de floculação, que consiste na promoção de choques entre as partículas para a formação de flocos com massa elevada e passíveis de sedimentação, filtração ou flotação.

A etapa de sedimentação pode ocorrer simplesmente pela ação da gravidade sob os flocos com tamanho aumentado no processo de floculação ou, quando a ação exclusiva de coagulantes não é suficiente para a formação de flocos densos o suficiente para que ocorra a sedimentação, auxiliares de floculação conhecidos como polieletrólitos podem ser adotados. A etapa final do tratamento de água é a filtração, que consiste basicamente na passagem da água por um meio poroso filtrante, capaz de reter os flocos que não sedimentaram e, eventualmente, algum microrganismo (ARANTES, 2010; MADRONA, 2010).

Pritchard *et al.* (2010) explicam como ocorre o mecanismos de coagulação no tratamento de águas. Os autores relatam que muitas impurezas da água estão presentes como sólidos coloidais finamente dispersos e suspensos, os quais produzem turvação e conferem cor à água. Essas partículas apresentam diâmetro entre 10^{-6} e 10^{-4} mm, geralmente possuem carga elétrica negativa e não podem ser suficientemente removidas por simples sedimentação. Estas partículas são cercadas por uma dupla camada elétrica, evitando o contato entre si. A adição de um coagulante (em geral carregado positivamente) e o misturando, a água causa compressão da camada dupla e, assim, a neutralização do potencial eletrostático da superfície das partículas. As partículas resultantes desestabilizadas ficam juntas, em contato, formando sólidos conhecidos como "flocos". A mistura rápida durante alguns segundos é importante após a adição de um coagulante para assegurar uma dispersão uniforme do mesmo e também para aumentar a possibilidade de contato entre partículas. Uma mistura suave e prolongada subsequente (pelo menos 15 min) ajuda na formação de flocos. Esses flocos, então, são grandes o suficiente para sedimentar por gravidade e podem ser removidos por filtração.

Os parâmetros que afetam a eficiência da *Moringa oleifera* na purificação de água foram estudados por Pritchard *et al.* (2010). Os referidos autores definiram que, para valores de turbidez entre 40 e 200 NTU a dosagem do extrato de *Moringa oleifera* deve variar entre 30 e 55 mg L⁻¹; as condições de pH alcalino apresentaram melhor eficiência na remoção da turbidez e quanto maior a temperatura mais eficaz foi a coagulação.

Avaliação da eficiência de extrato coagulante de sementes de *Moringa oleifera* obtidos com água e com KCl (1 M) e armazenados sob refrigeração (5 °C) durante sete meses também foi realizada por Madrona (2010). A capacidade coagulante/floculante foi avaliada em ensaios com Jar Test, os quais indicaram que a extração com água possui atividade coagulante até cinco dias de armazenamento enquanto a solução extraída com KCl foi eficiente por até cinco meses.

A estabilidade do teor de proteína de grãos de *Moringa oleifera* armazenados em ambiente refrigerado durante dois anos foi objeto de estudo de Madrona (2010). Análises nos tempos zero, um e dois anos foram realizadas e observaram-se teores de proteína de 1.832,53 mg L⁻¹, 804,75 mg L⁻¹ e 390,86 mg L⁻¹, respectivamente. Portanto, houve redução de 2,3 vezes na concentração de proteína após um ano de armazenamento e 4,7 vezes em dois anos em relação ao teor inicial. Essa redução do teor de proteína foi correlacionada com consequente diminuição do potencial de remoção da cor, turbidez e compostos com absorção em ultravioleta (UV) a 254 nm.

Na etapa de preparo da solução coagulante à base de grãos de *Moringa oleifera* L. diversos autores relataram a realização de secagem dos grãos antes do processo de moagem para obtenção do pó. Katayon *et al.* (2006) secou os grãos em estufa durante 24 horas sob temperatura de 50 °C. Arantes (2010) manteve os grãos em dessecador durante período de 2 a 3 dias para redução do teor de água. Franco (2010) colheram vagens secas da árvore e mantiveram os grãos em dessecador durante 24 horas. Outros autores apenas indicam que utilizaram grãos secos, mas não informam se realizaram secagem (SILVA e MATOS, 2008; BORBA, 2001; MUYIBI e EVISON, 1995). Todos esses autores utilizaram grãos secos em seus estudos, sejam colhidos secos ou com a realização de secagem artificial, no entanto nenhum deles relata sobre a importância da utilização dos grãos secos para o tratamento de água.

As razões pelas quais se faz necessário utilizar grãos secos nos procedimentos que visam o tratamento de água foi citada por Ndabigengesere *et al.* (1995), os quais constataram que somente grãos obtidos de vagens de *Moringa oleifera* L. secas apresentam atividade coagulante. Rodrigues (2005) recomenda que os grãos devem ser colhidos, preferencialmente,

no período de estiagem, uma vez que no período chuvoso a concentração dos agentes coagulantes diminui.

A utilização de grãos secos também facilita a operação de moagem, etapa realizada na extração do coagulante. Considerando-se que a quantidade de grãos colhidos seja superior à demanda momentânea ou que os mesmos não sejam utilizados imediatamente após a colheita, estes deverão ser armazenados, e para isso, um dos cuidados que se deve ter é mantê-los fora da faixa favorável ao desenvolvimento de microrganismos, ou seja, com baixo teor de água.

Passos *et al.* (2013) realizaram caracterização físico-química da folha, flor, grão e vagem de *Moringa oleifera* L. na forma in natura e seca. A secagem foi realizada ao sol durante 4 horas. Os referidos autores notaram que o maior resultado das análises de acidez titulável, cinzas, lipídios, proteínas e carboidratos, de todas as partes da *Moringa oleifera* L., foram obtidos na forma seca. Ressaltam que isso ocorreu devido à concentração dos sólidos promovida pela realização da secagem. Observaram ainda, que os maiores teores de acidez titulável, lipídios e proteínas foram encontrados nos grãos secos, indicando que essa parte da planta tem maior potencial nutritivo e com possibilidade de gerar um novo produto alimentício.

Esclarecidas as razões da necessidade de utilizar grãos secos em operações de tratamento de água, ainda faltam recomendações de quão seco esse grão deve estar e se é necessário realizar a secagem do mesmo antes de utilizá-lo como coagulante. Percebe-se que os autores colhem os grãos aparentemente secos e/ou secam esse produto sem critério definido, não informando o teor de água no momento da colheita e no final da secagem.

2.6 Planejamento experimental - Metodologia da superfície de resposta

A metodologia da superfície de resposta é definida por Williges (2006) como um conjunto de delineamento experimental sequencial e procedimentos de análise projetados para construir modelos empíricos e definir o ótimo desempenho em um espaço de dados definido por fatores que afetam a resposta. A superfície pode ser visualizada usando gráficos de contorno ou diagramas tridimensionais.

Armstrong (2006) afirma que a metodologia da superfície de resposta permite uma compreensão mais profunda de um processo ou produto e tem muitas aplicações importantes. As duas mais importantes são a otimização e o estabelecimento da robustez do processo ou produto.

O delineamento composto central rotacional (DCCR) com 2 níveis é frequentemente utilizado para obtenção de modelos de segunda ordem. Este delineamento consiste de 2^K pontos fatoriais, 2^K pontos axiais e no mínimo 3 pontos centrais, sendo K o número de fatores estudados (RODRIGUES e IEMMA, 2009).

Os ensaios dos pontos fatoriais possibilitam o ajuste de modelo linear (Equação 14) aos dados experimentais, enquanto a adição de ensaios nos pontos axiais permite ajuste de modelo de segunda ordem (Equação 15). A execução de ensaios no ponto central do espaço experimental viabiliza o cálculo de resíduos e, conseqüentemente, do erro padrão e, então, das estimativas por intervalo dos testes. Ressalta-se ainda que ensaios no ponto central possam oferecer informações do comportamento das respostas entre os níveis inicialmente atribuídos aos fatores e evidenciar a qualidade da repetibilidade do processo. Os níveis dos pontos fatoriais são -1 e +1 e dos axiais $-\alpha$ e $+\alpha$, onde $\alpha = (2^K)^{1/4}$ (Rodrigues e Iemma, 2009).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + e \quad (14)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + e \quad (15)$$

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios de secagem foram realizados no Laboratório de Secagem da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI), enquanto as análises laboratoriais ocorreram nos laboratórios de Tecnologia Pós-colheita e de Saneamento da mesma faculdade, além do Laboratório de Cereais, Raízes e Tubérculos da Faculdade de Engenharia de Alimentos (FEA), todos pertencentes à Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), São Paulo.

3.1 Equipamento de secagem - Secador agitador/misturador

O secador agitador/misturador faz parte do parque de equipamentos do Laboratório de Secagem da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, o qual foi idealizado e patentado por pesquisadores da mesma instituição (OLIVEIRA, 2009).

O equipamento é destinado à secagem de produtos sólidos, semi-sólidos e líquidos sob diferentes pressões de ar em sua câmara, com a possibilidade de agitação e mistura do material de interesse e, ainda, podendo operar em processo contínuo ou em batelada. O método de secagem utilizado é a secagem por convecção de ar aquecido. Entretanto, o equipamento também é composto por um módulo de emissores de radiação infravermelha que permite a complementação da secagem pela utilização da energia térmica desse tipo de radiação.

O secador consiste em uma câmara cilíndrica com diâmetro de 0,50m e extensão de 1,20m, dotado de eixo rotativo em forma de pás, capaz de realizar transporte e movimentação de material sólido no interior da câmara (Figura 5). Para a utilização em secagem contínua, o secador dispõe de sistema de alimentação (motor, rosca-sem-fim e moega) localizado em uma das extremidades na parte superior e de uma abertura para descarga do material, posicionada na extremidade oposta na parte inferior. No caso da secagem em batelada, remove-se o eixo do secador e acrescenta-se uma bandeja perfurada no interior da câmara para se obter uma superfície plana e dispor as amostras de produto a ser seco.

A partir da Figura 5 pode-se observar a localização dos componentes do secador, que são: (1) tampa da câmara de secagem; (2) sistema de ventilação; (3) sistema de aquecimento; (4) sistema de aquisição de dados de temperatura; (5) medidor de energia; (6) caixa de

controle de acionamento; (7) bomba de vácuo; (8) corpo do secador; (9) sistema de alimentação; (10) movimentação de sólidos; (11) caixa com inversor de frequência do ventilador; (12) inversor de frequência do sistema de movimentação de sólidos; (13) módulo de resistências radiantes de infravermelho; (14) eixo rotativo munido de pás e (15) chapa perfurada para entrada de ar do plenum na câmara de secagem.

Um ventilador centrífugo, da marca WEG de alto rendimento, com potência de 2,2 kW realiza a insuflação do ar ambiente para a câmara de secagem. Desde o ventilador até a câmara de secagem o ar é aquecido por uma bateria de resistências elétricas, com potência total de 6 kW, posteriormente, penetra no plenum, que finalmente o distribui, através de uma placa perfurada para o interior da câmara de secagem.

Unidades radiantes infravermelhas com tubo de quartzo (modelo CQZ 10, fabricadas pela empresa Corel Aquecimento Industrial) de potência total 4500 W e fluxo de energia irradiada de $0,75 \text{ W cm}^{-2}$ estão posicionadas na parte superior da câmara do secador, encobrendo todo o leito de secagem. Emissores deste tipo consistem em fios de níquel-cromo espiralados encapsulados por tubos de quartzo e encapados por porcelana ou por terminais metálicos. Geralmente são montados em uma estrutura que contém refletores (OLIVEIRA, 2009).

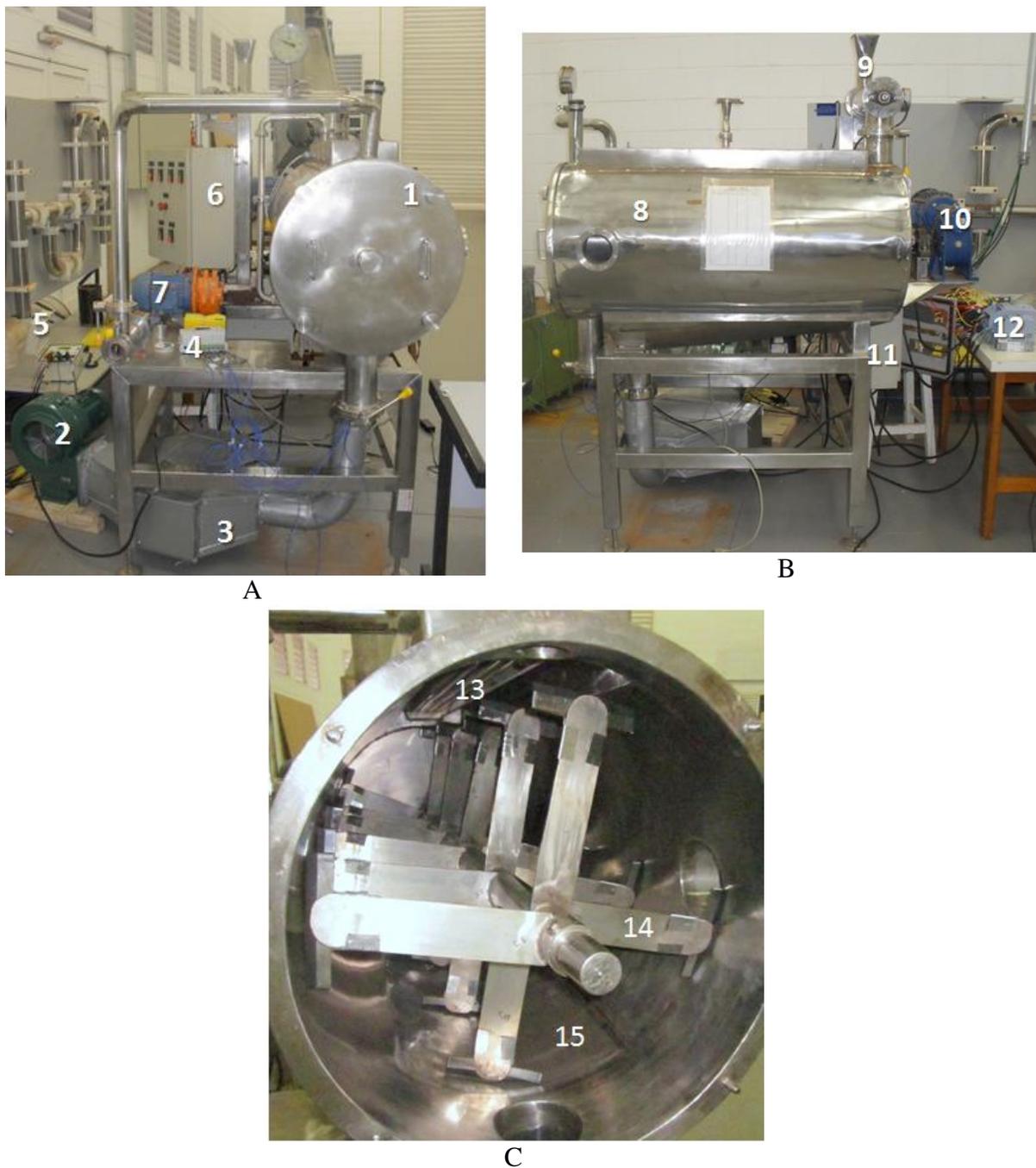


Figura 5. Imagem frontal (A), lateral (B) e interna (C) do Secador agitador/misturador.

3.2 Planejamento experimental e análise estatística

Os planejamentos experimentais utilizados foram: delineamento fatorial fracionado e delineamento composto central rotacional (DCCR).

Análise de variância (ANOVA), Teste F e o coeficiente de determinação (R^2) foram aplicados aos resultados para verificar se o modelo foi significativo e preditivo do processo. Em caso positivo, foram obtidas superfícies de respostas e curvas de contorno correspondentes ao modelo ajustado. Essas avaliações foram realizadas com auxílio do software STATISTICA, versão 9.0.

3.3 Fluxograma das operações de secagem

Na Figura 6, é apresentado o fluxograma das operações realizadas durante a pesquisa, desde a colheita dos frutos até a definição da melhor condição de operação da secagem de grãos de *Moringa oleifera* L.

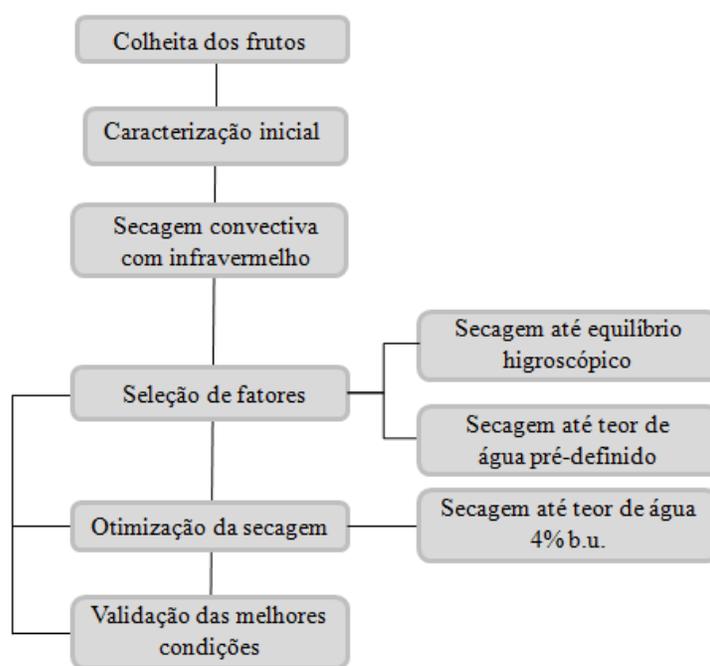


Figura 6. Fluxograma das operações de secagem de grãos *Moringa oleifera* L.

3.4 Ponto de colheita das vagens de *Moringa oleifera* L.

A determinação do ponto de colheita se deu pela avaliação da coloração das vagens, do teor de proteína e teor de água dos grãos. Utilizou-se a carta de Munsell (Munsell Soil Color Chart) para identificar a cor das vagens de diferentes estádios de maturação, o método de Kjeldahl (960.52 – AOAC, 1998) para determinar o teor de proteína e o método padrão da estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ durante 24h (BRASIL, 2009) para obter o teor de água dos grãos.

As vagens de *Moringa oleifera* L. utilizadas nesta pesquisa, com exceção dos ensaios para “Definição da melhor condição de operação da secagem”, foram colhidas de árvores do campo experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP e do Núcleo de Produção de Mudas da Coordenadoria de Assistência Técnica Integrada (CATI) de Marília/SP.

O procedimento de colheita foi manual e se deu pelo corte do pedúnculo das vagens por intermédio de podão. Posteriormente, as vagens foram abertas para retirada dos grãos, os quais foram acondicionados em sacos plásticos e mantidos sob refrigeração (5 °C) até o momento da realização dos ensaios de secagem.

Com o objetivo de minimizar a variabilidade da matéria-prima, devido às condições de cultivo, decidiu-se restringir a localidade das árvores e o tamanho dos grãos utilizados nos ensaios, além do critério de coloração da vagem, nos ensaios para “Definição da melhor condição de operação da secagem”. Dessa forma, os grãos foram colhidos em setembro de 2013, apenas de árvores do campo experimental da FEAGRI/UNICAMP, com tamanho (sem tegumento) variando entre 6,30 e 8,00 mm e massa média na faixa de 0,175 a 0,252 g. Essa classificação por tamanho foi realizada com auxílio de peneiras (ABNT 5/16”, 1/4” e 3,5). Grãos com tamanho e massa menores que as descritas acima foram descartados. Silva e Matos (2008) consideraram a uniformidade de tamanho e cor na seleção dos grãos utilizados em estudo sobre dispersão de *Moringa oleifera* L. para tratamento de água.

Avaliou-se o teor de proteína dos grãos e a eficiência na remoção da turbidez de água utilizando-se os grãos de *Moringa oleifera* L. classificados em tamanhos. Então, depois da retirada do tegumento os grãos foram passados por um grupo de peneiras para definição da granulometria dos mesmos.

3.5 Propriedades físicas dos grãos de *Moringa oleifera* L.

As características físicas dos grãos de *Moringa oleifera* Lam., como dimensões, diâmetro equivalente, área projetada, volume, esfericidade, massa específica real e aparente, porosidade, ângulo de talude, velocidade terminal foram determinadas de forma semelhante ao proposto por Benedetti (1987).

3.6 Composição centesimal dos grãos de *Moringa oleifera* L.

Determinou-se a composição centesimal da matéria-prima através das análises de teor de água, proteínas, lipídeos, fibras e cinzas de acordo com os métodos especificados na Tabela 3. O teor de carboidratos foi estimado por diferença, subtraindo de 100, o somatório das análises citadas anteriormente, sendo o resultado expresso em porcentagem, segundo normas do Instituto Adolfo Lutz (1976).

Tabela 3. Especificação dos métodos e referências das análises físico-químicas da matéria-prima.

Análise	Método	Referência
Teor de água	925.10	AOAC, 1998
Proteínas	Kjeldahl 960.52	AOAC, 1998
Lipídeos	Bligh e Dyer	Cecchi, 2003
Fibras	930.10	AOAC, 1998
Cinzas	923.03	AOAC, 1998

3.7 Secagem de *Moringa oleifera* L.

Na realização dos ensaios da secagem convectiva preliminar e para seleção dos fatores que interferem na secagem foram utilizados grãos de *Moringa oleifera* L. de um lote misto colhido em janeiro de 2013, o qual continha grãos de plantas matrizes cultivadas no Núcleo de Produção de Mudas da Coordenadoria de Assistência Técnica Integrada (CATI) de Marília/SP e no Campo Experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas/SP (FEAGRI/UNICAMP).

3.7.1 Secagem convectiva com aplicação de radiação infravermelha

Para alcançar os objetivos desta pesquisa, realizaram-se ensaios de secagem de grãos de *Moringa oleifera* L. avaliando, inicialmente, todos os fatores do processo que poderiam interferir significativamente na eficiência das operações de secagem e na qualidade do produto, selecionando aqueles que efetivamente afetassem as respostas estudadas. Posteriormente, foram realizados ensaios com os fatores selecionados para definir seus níveis ótimos na secagem dos grãos.

3.7.1.1 Seleção dos fatores que interferem na secagem

Foram realizados dois blocos de ensaios para selecionar as condições de operação que interferiam significativamente na secagem de grãos de *Moringa oleifera* L. Nos primeiros ensaios, realizou-se a secagem até atingir a condição de equilíbrio entre as pressões de vapor do ar de secagem e no interior dos grãos, sendo ao final definido um teor de água para interromper as secagens posteriores. No segundo bloco de ensaios, com o intuito de remover a mesma quantidade de água dos grãos em cada experimento e, assim, avaliar o efeito dos tratamentos de secagem sobre a qualidade do produto, as operações de secagem foram finalizadas quando atingido teor de água único, definido nos ensaios anteriores.

3.7.1.1.1 Secagem conduzida até alcançar equilíbrio higroscópico

Nos ensaios de secagem convectiva de grãos de *Moringa oleifera* L. foram seguidos os parâmetros operacionais definidos pelo planejamento experimental fatorial fracionado 2^{4-1} com adição de três pontos centrais, totalizando 11 ensaios. As variáveis independentes (fatores) estudadas foram: temperatura (T) e velocidade do ar de secagem (V), tempo de aplicação da radiação infravermelha (t) e intensidade da radiação infravermelha (I). As variáveis dependentes (respostas) estudadas foram: difusividade efetiva, teor de água, atividade de água e tempo de secagem. Avaliou-se também o ajuste dos modelos de Page, Midilli, Newton e da segunda lei de Fick de difusão aos dados experimentais de secagem.

Os níveis dos fatores são apresentados na Tabela 4. Na Tabela 5 apresenta-se o planejamento dos ensaios de secagem com as variáveis codificada e real. Definiu-se a temperatura do ar de secagem variando entre baixa (30°C) e média (60°C) intensidade, não foi possível trabalhar com alta intensidade por restrição do equipamento de secagem. Os níveis de velocidade do ar variaram entre 0,55 e 1,05 m s⁻¹, os quais foram inferiores à velocidade terminal dos grãos de *Moringa oleifera* L. (4,62 m s⁻¹). Em relação aos níveis do tempo de aplicação da radiação infravermelha, esses foram definidos pelas observações realizadas em ensaios de secagem de outros produtos, pois já se tinha observado que tempos inferiores a 2 min não eram suficientes para aquecer o produto a ser seco, a energia retirada da fonte era utilizada apenas para iniciar o processo e, como essa radiação atinge altas taxas de aquecimento, o tempo de 5 min é suficiente para que o produto alcance altas temperaturas. Os

níveis da intensidade da radiação infravermelha foram definidos pela potência do emissor da radiação.

Tabela 4. Condições dos fatores da secagem convectiva com aplicação de radiação infravermelha para seleção de variáveis.

FATORES	-1	0	1
Temperatura (°C)	30	45	60
Velocidade do ar (m s ⁻¹)	0,55	0,80	1,05
Tempo de aplicação da radiação infravermelha (min)	2,0	3,5	5,0
Intensidade da radiação infravermelha (W)	1500	3000	4500

Tabela 5. Planejamento dos ensaios de secagem convectiva com aplicação de radiação infravermelha de acordo com os níveis das variáveis codificada e real.

ENSAIOS	VARIÁVEL CODIFICADA				VARIÁVEL REAL				
	X1	X2	X3	X4	T (°C)	V (m s ⁻¹)	t (min)	I (W)	
Pontos fatoriais	1	-1	-1	-1	-1	30	0,55	2,0	1500
	2	1	-1	-1	1	60	0,55	2,0	4500
	3	-1	1	-1	1	30	1,05	2,0	4500
	4	1	1	-1	-1	60	1,05	2,0	1500
	5	-1	-1	1	1	30	0,55	5,0	4500
	6	1	-1	1	-1	60	0,55	5,0	1500
	7	-1	1	1	-1	30	1,05	5,0	1500
	8	1	1	1	1	60	1,05	5,0	4500
Pontos centrais	9	0	0	0	0	45	0,80	3,5	3000
	10	0	0	0	0	45	0,80	3,5	3000
	11	0	0	0	0	45	0,80	3,5	3000

O ajuste da temperatura do ar foi realizado com controlador *on/off*, enquanto que a velocidade do ar foi ajustada por um inversor de frequência. Os diferentes tempos de aplicação da radiação infravermelha (Tabela 5) foram acionados manualmente e de forma intermitente em intervalos de 15 minutos, com auxílio de cronômetro. Esse tempo de 15 minutos entre as aplicações da radiação foi necessário para permitir a transferência de massa dos grãos para o ar e seu transporte pelo fluxo de ar. A intensidade da radiação infravermelha foi fixada com a utilização de 1, 2 ou 3 unidades de emissores de radiação infravermelha, as quais forneciam potência de 1500W, 3000W e 4500W, respectivamente (Figura 7).

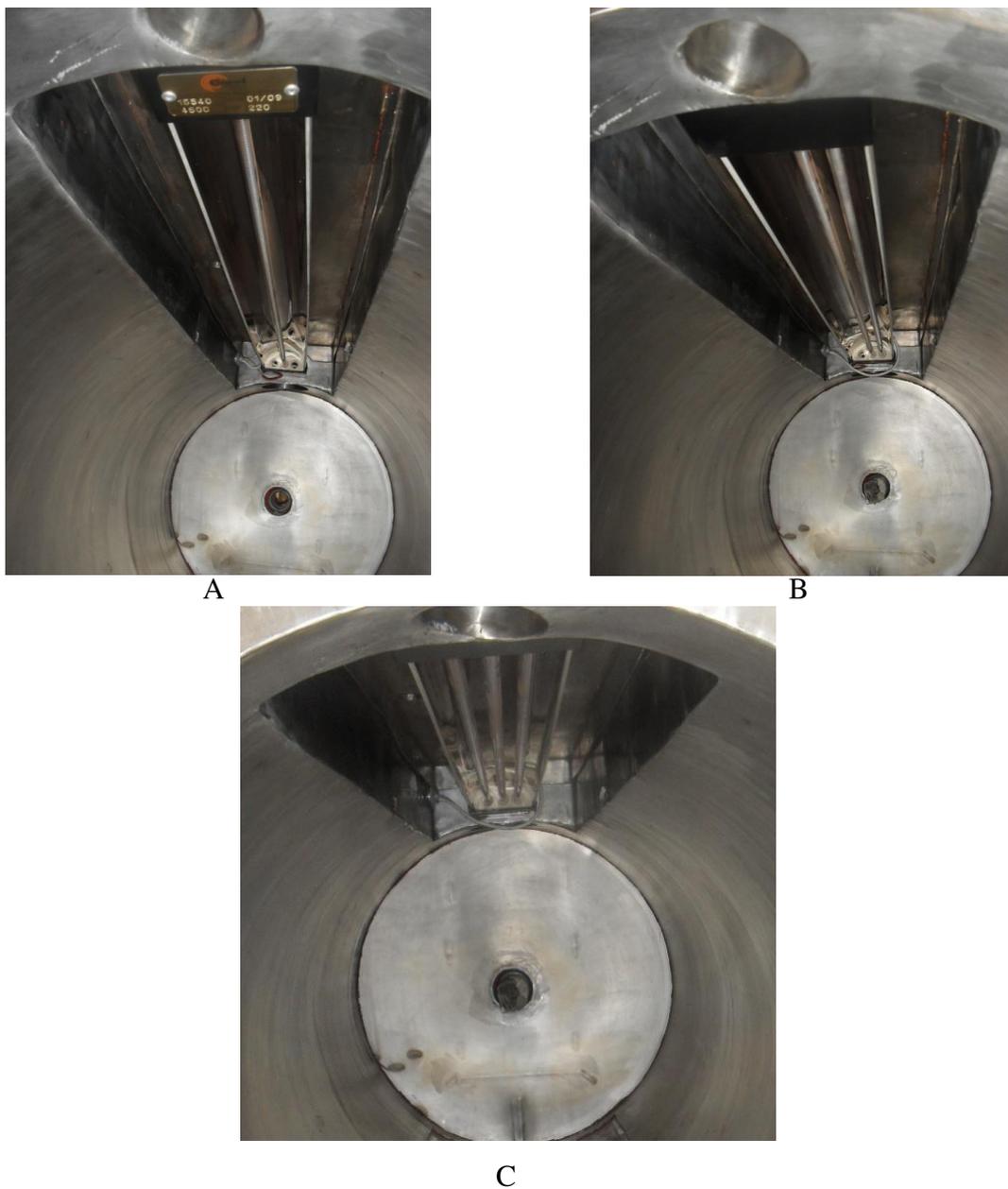


Figura 7. Imagens de uma (A), duas (B) e três (C) resistências de infravermelho no interior do secador.

Em intervalos de 15 minutos foram realizadas pesagens para acompanhamento da redução do teor de água das amostras. A secagem foi encerrada quando alcançado o teor de água de equilíbrio com as condições do ar.

Com auxílio do software Statistica 9.0 foram analisados os efeitos principais e da interação dos fatores sobre as respostas estudadas com nível de significância de 90%.

A difusividade efetiva foi calculada com a equação proposta pela Segunda Lei de Fick, com solução para formato esférico. Os parâmetros dos modelos de Page, Midilli e Newton foram determinados por regressão não linear com auxílio do software Statistica 9.0 (Tabela 6). Avaliou-se o ajuste dos modelos aos dados experimentais pelo coeficiente de determinação (R^2).

Tabela 6. Modelos utilizados na análise da secagem de grãos de *Moringa oleifera* L.

Nome do modelo	Modelo
Page	$Y = \exp(-kt^y)$
Midilli	$Y = a \exp(-kt^c) + bt$
Newton	$Y = \exp(-kt)$
Fick	$Y = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[-n^2\pi^2 D_{ef} \frac{1}{r^2}\right]$

3.7.1.1.2 Secagem conduzida até alcançar teor de água pré-definido

Ensaio de secagem convectiva com aplicação de radiação infravermelha foram realizados de acordo com o planejamento experimental apresentado na Tabela 5. Neste caso, as variáveis dependentes (respostas) estudadas foram: tempo de secagem, taxa de secagem, teor de água, atividade de água e teor de proteína dos grãos, além de turbidez, constante de redução da turbidez (k_c) e pH de água tratada com solução coagulante utilizando esses grãos.

Para homogeneizar o teor de água, devido às diferentes procedências do produto e visando obter maior quantidade de pontos de monitoramento da secagem, os grãos utilizados nesses ensaios foram reidratados até teor de água de 13% b.u. O processo de reidratação se deu colocando o produto em dessecador com solução salina de Cromato de potássio (K_2CrO_4). Essa solução gerou ambiente com umidade relativa de 85% e foi mantida sob temperatura ambiente controlada de 25 °C. Os grãos foram mantidos em dessecador por período de 20 dias, os quais foram suficientes para alcançarem teor de água de 13% b.u.

A condução dos experimentos de secagem se deu de forma semelhante ao descrito no item 3.7.1.1.1. No entanto, o processo de secagem foi finalizado quando alcançado o teor de

água de 7% (b.u.), definido pelas condições de secagem dos ensaios conduzidos até alcançar equilíbrio higroscópico. Isso porque, pretendia-se avaliar o efeito dos tratamentos de secagem sobre a qualidade dos grãos para tratamento de água sem a interferência de diferentes teores de água.

A análise dos dados foi realizada com auxílio do software Statistica 9.0, com o qual foram avaliados os efeitos principais e da interação de primeira ordem dos fatores sobre as respostas estudadas com nível de significância de 90%. Dessa forma, foram definidos os fatores a serem estudados nos ensaios seguintes (item 3.7.1.2).

3.7.1.2 Definição da melhor condição de operação da secagem

Os grãos de *Moringa oleifera* L. utilizados nesses ensaios apresentavam teor de água inicial de 10% (b.u.) e a secagem foi conduzida até teor de água de 4% (b.u.), dessa forma, obteve-se remoção de água semelhante à realizada no ensaio anterior (6% b.u.). Isso porque, preferiu-se não reidratar esses grãos para evitar qualquer possível interferência da solução salina em suas características.

Na realização dos ensaios para definir a melhor condição de operação da secagem de grãos de *Moringa oleifera* L., fixou-se a intensidade da radiação infravermelha em 4500 W e a velocidade do ar em $0,93 \text{ m s}^{-1}$, de acordo com o definido nos ensaios para seleção dos fatores que interferem na secagem (item 4.3.1.1).

Como nesses ensaios de secagem a medição do consumo de energia foi realizada separadamente para cada elemento do secador e no caso do ventilador o medidor de energia não trabalhava com frequência inferior a 30 Hz, o que corresponde à velocidade do ar de $0,93 \text{ m s}^{-1}$, essa foi a velocidade do ar utilizada, não podendo ser o menor nível ($0,55 \text{ m s}^{-1}$) ajustado nos ensaios anteriores.

Planejamento experimental fatorial completo (Delineamento Composto Central Rotacional) com dois fatores (2^2) foi utilizado para definir as condições dos ensaios de secagem. As variáveis independentes estudadas foram (fatores): temperatura do ar de secagem (T) e tempo de aplicação da radiação infravermelha (t). Acrescentaram-se 4 pontos axiais e 3 repetições no ponto central, totalizando 11 ensaios (Tabelas 7 e 8). As variáveis dependentes

estudadas quanto aos aspectos da secagem foram: teor de água, atividade de água, tempo de secagem e taxa de secagem. Em relação à qualidade dos grãos de *Moringa oleifera* L. utilizados para tratamento de água, foram avaliados: turbidez, pH, constante de redução da turbidez (k_c), teor de proteína e índice de peróxidos. Quanto à temperatura do ar no interior da câmara de secagem e dentro dos grãos, foram avaliados: temperatura do ar, temperatura dos grãos e temperatura máxima dos grãos. Finalmente, em relação aos aspectos energéticos, foram avaliados o consumo de energia do ventilador, das resistências elétricas, das resistências de infravermelho e a energia específica.

Tabela 7. Condições dos fatores das operações de secagem convectiva com aplicação de radiação infravermelha - DCCR.

FATORES	-1,41	-1	0	1	1,41
Temperatura do ar (°C)	30	34	44	54	58
Tempo de aplicação da radiação infravermelha (min)	2,0	2,4	3,4	4,4	4,8

Tabela 8. Planejamento dos ensaios de secagem convectiva com aplicação de radiação infravermelha de acordo com os níveis das variáveis codificada e real - DCCR.

Ensaios	Variável codificada		Variável real		
	T	t	T (°C)	t (min)	
Pontos fatoriais	1	-1	-1	34	2,4
	2	1	-1	54	2,4
	3	-1	1	34	4,4
	4	1	1	54	4,4
	5	-1,41	0	30	3,4
	6	1,41	0	58	3,4
	7	0	-1,41	44	2,0
	8	0	1,41	44	4,8
Pontos centrais	9	0	0	44	3,4
	10	0	0	44	3,4
	11	0	0	44	3,4

A ordem de realização dos ensaios foi aleatória. A condução dos mesmos se deu, inicialmente, pelo acionamento e ajuste do ventilador e das resistências elétricas para aquecer o ar até a temperatura do ar desejada. Após verificar a estabilização da temperatura do ar, procedeu-se a adição de camada delgada e de massa conhecida de grãos de *Moringa oleifera*

L., contidos em bandeja perfurada, no interior do secador. Em seguida, fechou-se o secador e acionaram-se manualmente os emissores de radiação infravermelha pelo tempo definido no planejamento experimental, após esse período desligaram-se as resistências radiantes e aguardou-se completar 15 minutos para a realização de pesagem para acompanhamento da redução do teor de água das amostras. O tempo de aplicação da radiação infravermelha foi controlado por intermédio de cronômetro. Esse procedimento foi repetido até ser alcançado teor de água em torno de 4% (b.u.).

A análise estatística dos resultados foi realizada através do software STATISTICA, versão 9.0. Aplicou-se o teste F com nível de significância de 90% e 95% de confiança, dependendo da resposta, Análise de Variância (ANOVA) e avaliou-se o coeficiente de correlação (R^2) dos modelos para verificar se os mesmos foram significativos e preditivos do processo de secagem e das análises de qualidade dos grãos.

3.7.2 Secagem de validação das condições otimizadas

Os ensaios de validação consistem na execução de repetições dos ensaios na condição otimizada, com o objetivo de confirmar os resultados. Dessa forma, quando a condição de máxima resposta trata-se do ponto central não se faz necessário repeti-lo, uma vez que as condições do mesmo já foram realizadas com repetições.

3.8 Temperatura do ar no interior da câmara de secagem e no grão

O monitoramento da temperatura do ar no interior do secador foi realizado por meio de termopares Tipo T, os quais estavam interligados com sistema de aquisição de dados da marca TECNAL, modelo FieldLogger (Figura 8A). Os sensores foram fixados em seis posições dentro do secador, dois em cada lado do secador e dois próximos à entrada de ar (Figura 8B).

A temperatura no interior dos grãos de *Moringa oleifera* L. foi monitorada com termopares Tipo J (marca Omega Engineering, modelo TFIR 005) também interligados ao sistema de aquisição de dados da TECNAL (Figura 8A). Os termopares foram inseridos dentro de duas unidades de grãos através de orifício, com diâmetro de aproximadamente 1 mm, feito

manualmente com agulha de costura. Esses grãos foram fixados logo acima da bandeja de grãos dentro do secador, como pode ser observado na Figura 8B.

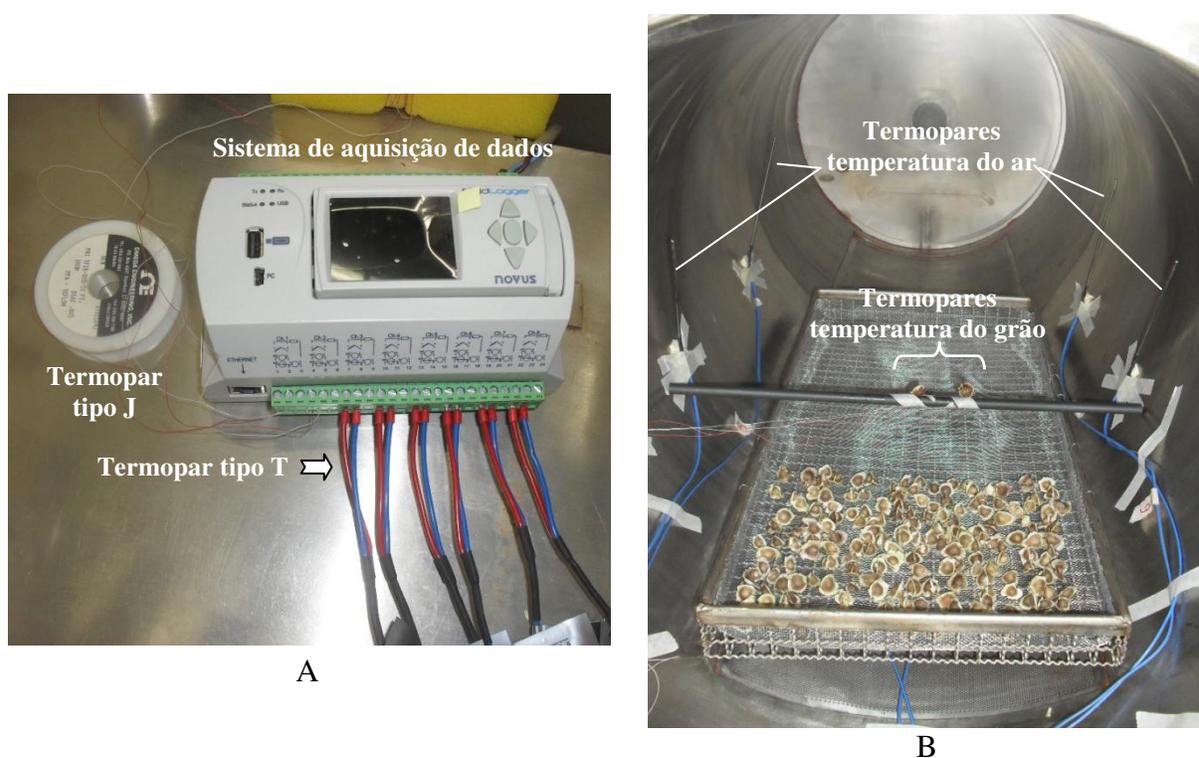


Figura 8. Imagem do sistema de aquisição de dados (A) e dos sensores de temperatura instalados dentro da câmara de secagem (B).

3.9 Consumo energético

O consumo de energia elétrica foi determinado de forma direta através de analisadores de grandezas elétricas com memória de massa, instalados em cada elemento do secador. O registro dos parâmetros elétricos das resistências de infravermelho e das resistências elétricas foi realizado por multimedidor da marca Kron, modelo Mult-K Plus, enquanto o registro dos dados de energia do ventilador foi realizado por medidor da marca ESB / Landis + Gyr, modelo SAGA 4000 (Figura 9).

Esses equipamentos possibilitaram a obtenção de dados de tensão, corrente, demanda, potência momentânea e fator de potência dos motores, dentre outros. Os dados medidos foram armazenados em planilhas de cálculo e sofreram tratamento para filtrar os intervalos do

processo de secagem utilizados. Avaliou-se, então, a quantidade total de energia elétrica consumida durante os períodos estudados.

A energia específica foi determinada pela relação entre a energia elétrica consumida (kWh) e a quantidade de água removida nos ensaios de secagem (Equação 11).

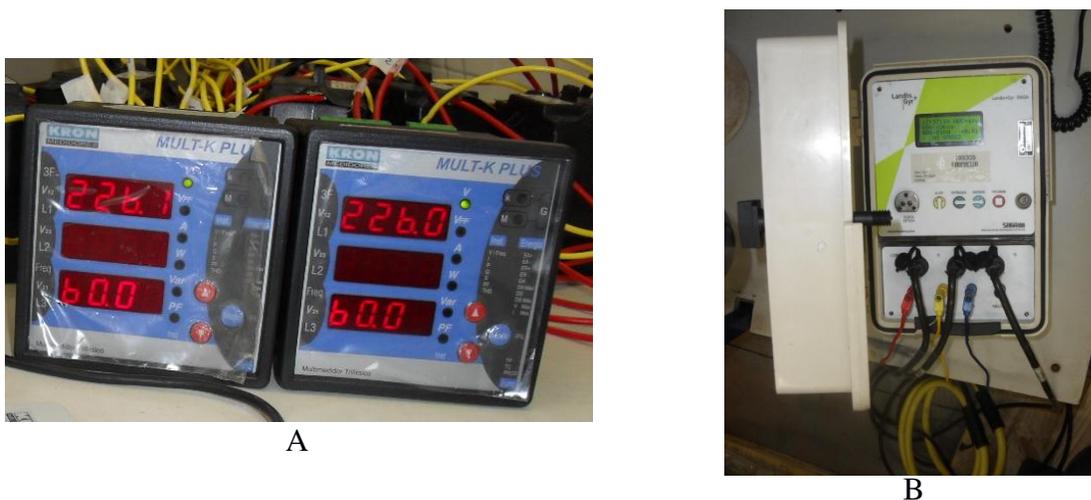


Figura 9. Imagem dos multimedidores de energia da Kron (A) e da ESB / Landis Gyr (B), utilizados na medição do consumo de energia elétrica dos ensaios de secagem.

3.10 Qualidade dos grãos após secagem

3.10.1 Teor de água

O teor de água foi determinado gravimetricamente no início e final dos ensaios de secagem, a partir do método-padrão da estufa a $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$ por 24 horas (BRASIL, 2009), em triplicata de 3 g. Os resultados foram expressos em porcentagem.

3.10.2 Atividade de água

A atividade de água (a_w) foi medida com equipamento específico (marca Decagon, modelo Pawkit), com resolução de 0,01 a $25,1^{\circ}\text{C}$ (Figura 10). As amostras foram colocadas na cápsula do equipamento de leitura e o resultado final foi expresso como a média entre três leituras consecutivas.



Figura 10. Imagem do determinador de atividade de água.

3.10.3 Teor de proteína

O teor de proteína dos grãos de *Moringa oleifera* L. sem o tegumento e na forma pulverizada foi determinado pelo método de Kjeldahl (Método 960.52 – AOAC 1998). Essa análise foi realizada no Laboratório de Cereais, Raízes e Tubérculos da Faculdade de Engenharia de Alimentos da UNICAMP. O procedimento experimental consistiu na digestão, destilação e posterior titulação da amostra.

Na etapa da digestão, adicionaram-se 0,2 g da amostra em tubos apropriados, acrescentaram-se 2 g de mistura catalítica (94g de K_2SO_4 e 5 g de $CuSO_4$) e 5 mL de ácido sulfúrico. Os tubos foram inseridos no bloco digestor (Figura 11A) e aquecidos gradativamente até 400°C. Essa temperatura foi mantida até completa digestão da amostra e obtenção de coloração transparente verde azulada, então, aqueceu-se por mais 30 min. Em seguida, esperaram-se os tubos esfriarem e adicionou-se 10 mL de água destilada.

A destilação da amostra foi realizada colocando os tubos no destilador (Figura 11B), com posterior neutralização da amostra com 25 mL de NaOH 50%. Recolheram-se 100 mL do destilado em erlenmeyer contendo 10 mL de H_3BO_3 2% e duas gotas de indicador misto.

A solução destilada foi titulada usando HCl 0,02 mol/L com viragem da cor azulada para a rosada, o que aconteceu em pH de, aproximadamente, 4,5. Anotou-se também o volume de HCl consumido na titulação do “branco”, evitando erros devido às impurezas dos reagentes.

O resultado foi calculado de acordo com as seguintes equações:

$$\%N = \frac{(V_{HCl} - V_B) \times M_{HCl} \times 1,4}{w} \quad 16$$

$$\%P = \%N \times \text{Fator de conversão (6,25)} \quad 17$$



Figura 11. Imagem do bloco digestor inserido em capela de fluxo laminar (A) e do destilador (B) utilizados na determinação do teor de proteína dos grãos de *Moringa oleifera* L.

3.10.4 Índice de peróxidos

A oxidação dos grãos de *Moringa oleifera* L. foi monitorada pela determinação do índice de peróxidos (compostos primários resultantes da reação de oxidação lipídica), de acordo com a metodologia descrita por Partanen *et al.* (2008) com algumas modificações. Essa análise foi realizada no Laboratório de Tecnologia Pós-Colheita da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP.

Inicialmente, retirou-se o tegumento dos grãos e realizou-se trituração dos mesmos em liquidificador. Para a extração do óleo, uma amostra de 0,5 g de pó foi adicionada em 5 mL de água e mantida sob agitação por 30 minutos. Uma porção de 400 μ L foi retirada e misturada com 1,5 mL de uma mistura de iso-octano/isopropanol (2:1), sendo agitada durante 10 segundos e centrifugada a 2400 rpm. Este processo foi repetido três vezes.

Para a determinação do índice de peróxido, 400 μL do extrato foram adicionados a 9,6 mL de uma mistura de clorofórmio/metanol (7:3) e, em seguida, 50 μL das soluções de cloreto de ferro e tiocianato de amônio foram adicionadas. A mistura foi agitada, incubada por 5 minutos no escuro e a absorbância foi lida a 500 nm em um espectrofotômetro DU-7-B340 (Beckman, Krefeld, Alemanha). O índice de peróxidos foi quantificado com base em uma curva padrão construída a partir de várias diluições de um padrão de peróxido de hidrogênio e expresso como miliequivalentes (meq) de hidroperóxido por kg de óleo (BAE e LEE, 2008).

3.11 Tratamento de água com turbidez sintética

Os procedimentos realizados após as operações de secagem foram: remoção manual do tegumento dos grãos e moagem dos mesmos para obtenção do pó, o qual foi utilizado no preparo da solução coagulante. Água com turbidez sintética (60 NTU) foi preparada e tratada com essas soluções coagulantes em reatores estáticos (Jar-Test) pela realização de operações de coagulação, floculação e sedimentação. Amostras da água tratada foram coletadas durante a sedimentação para avaliação da turbidez e pH.

3.11.1 Preparo da solução coagulante

O preparo da solução coagulante com concentração de 2% (massa/volume) consistiu da homogeneização de 2 g de pó em 100 mL de água destilada. A homogeneização foi realizada durante 3 min em agitador magnético. A solução foi posteriormente passada por peneira com abertura de 125 μm (ARANTES, 2010).

3.11.2 Preparo de água bruta sintética

Água com turbidez de 60 NTU foi preparada de acordo com metodologia proposta por Arantes (2010). O procedimento consistiu da adição de 3,2 g de bentonita em recipiente contendo 16 L de água destilada e deionizada, resultando em uma concentração de 200 mg L^{-1} . Em seguida, promoveu-se agitação com gradiente de velocidade de 400 s^{-1} durante 30 minutos, seguido de repouso durante 24 horas. Passado esse período, removeu-se o sobrenadante cuidadosamente, para evitar ressuspensão da bentonita sedimentada, tendo-se ao final água com turbidez sintética, denominada água bruta.

Preferiu-se a água sintética pela garantia de utilizar uma água com turbidez padrão, e, portanto, ter controle dessa variável envolvida no processo.

3.11.3 Tratamento de água no Jar-Test

Ensaio de coagulação, floculação e sedimentação em reatores estáticos (Jar-Test) (Figura 12) foram realizados no Laboratório de Saneamento da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP para determinar a eficiência das soluções obtidas de grãos das operações de secagem. Utilizou-se dosagem da solução de *Moringa oleifera* L. de 10 mL L⁻¹ com concentração de 2%, recomendada por Arantes (2010) para turbidez inicial de 60 NTU.



Figura 12. Imagem do equipamento Jar-Test.

Fonte: Arantes (2010).

Durante o tratamento da água bruta a etapa de coagulação foi operada sob condição de gradiente médio de velocidade 400 s⁻¹ e tempo de mistura rápida de 60 segundos, enquanto que a floculação ocorreu sob gradiente médio de velocidade 40 s⁻¹ e tempo de mistura lenta de 10 minutos (ARANTES, 2010). A etapa final de sedimentação, por sua vez, consistiu do repouso por período de 60 minutos, sendo que amostras da água foram coletadas nos tempos zero, 10, 20, 30, 45 e 60 min para determinação da turbidez remanescente e pH.

3.11.4 Turbidez e pH

A avaliação da turbidez remanescente das amostras de água coletadas durante a sedimentação se deu por nefelometria, utilizando-se aparelho denominado turbidímetro (marca HACH, modelo 2100 NA). O pH dessas amostras foi determinado por leituras em pHmetro (Digimed DM 20) (Figura 13).



A



B

Figura 13. Imagem do turbidímetro (A) e do pHmetro (B) utilizados na avaliação de águas tratadas com solução de *Moringa oleifera* L.

Considerando que a redução da turbidez apresenta cinética de 1ª ordem, esta foi avaliada pela Equação 19, a qual permite calcular a constante de redução k_c (SILVA e MATOS, 2008).

$$\frac{dC}{dt} = -k_c \cdot C \quad (18)$$

$$C = C_0 \cdot e^{-k_c \cdot t_c} \quad (19)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Determinação do ponto de colheita

No momento da colheita foram encontradas quatro colorações distintas das vagens e grãos de *Moringa oleifera* L., como mostra a Figura 14, as quais foram denominadas como verde, quase verde, quase marrom e marrom.

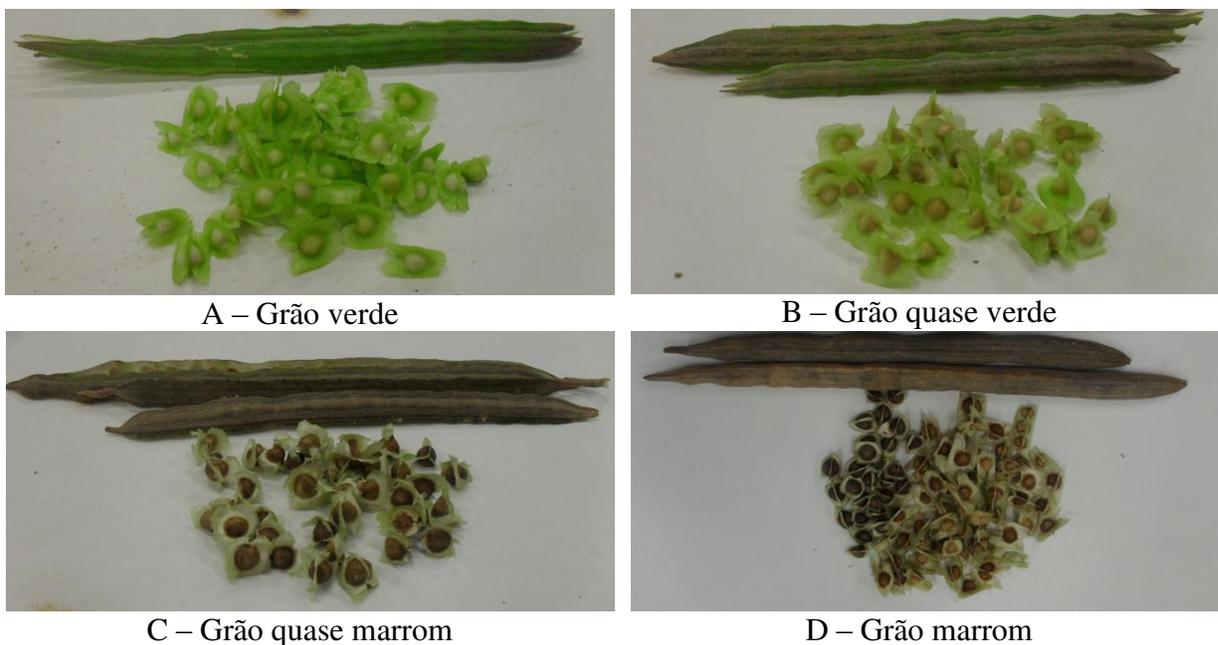


Figura 14. Ilustração da coloração das vagens e dos grãos de *Moringa oleifera* L. em diferentes estádios de maturação.



A - Vagem quase marrom



B - Vagem marrom



C



D

Figura 15. Ilustração da coloração da vagem quase marrom (A) e sua identificação na carta de Munsell (C); coloração da vagem marrom (B) e sua identificação na carta de Munsell (D).

Na carta de Munsell só foi possível identificar a cor das vagens amarronzadas, isso porque essa carta é específica para classificação de solos. Assim, não havia os tons de verde equivalentes à cor das demais vagens. Dessa forma, para a vagem “quase marrom”, os parâmetros de cor foram definidos como matiz 5Y, valor 4 e croma 2, o que corresponde à cor

Cinzeno oliváceo (Olive Gray), enquanto para a “vagem marrom” os parâmetros de cor foram matiz 10YR, valor 4 e croma 4, correspondendo à cor Pardo amarelado escuro (Dark Yellowish Brown) (Figuras 15C e 15D).

O teor de água e o teor de proteína dos grãos de *Moringa oleifera* L. obtidos nas quatro colorações são apresentados na Tabela 9. Percebe-se que o teor de água dos grãos variou entre 5,4 e 77,3% (b.u.). Os grãos “verdes” apresentaram o menor teor de proteína (25,08%), enquanto os grãos “quase verdes” obtiveram a maior porcentagem (38,12%), os grãos “quase marrom” e “marrom”, por sua vez, apresentaram valores semelhantes de teor de proteína, 36,33% e 36,64%, respectivamente.

Tabela 9. Resultados do teor de água e do teor de proteína dos grãos de *Moringa oleifera* L. em diferentes estádios de maturação.

Cor da vagem	Teor de água (% b.u.)	Teor de proteína (%)
A – verde	77,26	25,08
B – quase verde	41,88	38,12
C – quase marrom	31,53	36,33
D - marrom	5,40	36,64

Embora os grãos “quase verdes” tenham apresentado maior teor de proteína, preferiu-se colher os grãos com coloração “quase marrom” e “marrom”. Isso porque esses grãos apresentaram quantidade considerável de teor de proteína e, também, pela maior facilidade da operação de colheita e de retirada desses grãos da casca em relação aos “quase verdes”. Em relação ao teor de água, a utilização dos grãos “quase marrom” seria mais interessante, pois apresentam maior teor de água que os grãos “marrons”, uma vez que os mesmos seriam destinados para a realização de secagens. No entanto, devido à dificuldade de se encontrar quantidade suficiente de grãos no ponto “quase marrom”, também foram colhidas vagens “marrons”. Considerou-se também que Ndabigengesere *et al.* (1995) verificaram que somente grãos obtidos de vagens secas na árvore apresentaram atividade coagulante, o que não foi observado em grãos de vagens verdes. Dessa forma, definiu-se o ponto de colheita das vagens de *Moringa oleifera* L. como sendo com coloração amarronzada (cinzeno oliváceo e pardo amarelado escuro).

Em relação à classificação por tamanho dos grãos sem tegumento, utilizados nos ensaios para “Definição da melhor condição de operação da secagem”, observou-se que os mesmos ficaram retidos nas peneiras com de aberturas de 5,60 mm² (pequenos), 6,30 mm² (médios) e 8,00 mm² (grandes).

A massa média de 10 unidades dos grãos pequenos, médios e grandes foi de 0,132 g, 0,175 g e 0,252 g, respectivamente.

Verificou-se que existe diferença entre o teor de proteína dos grãos pequenos (média: 32,62%; desvio padrão: 0,96), médios (média: 34,54%; desvio padrão: 0,75) e grandes (média: 36,14%; desvio padrão: 0,75).

Quando se utilizaram soluções coagulantes à base desses grãos para o tratamento de água com turbidez sintética de 60,3 NTU, notou-se, após 60 minutos de sedimentação, que os grãos pequenos, médios e grandes removeram 56,05%, 75,18% e 75,29% da turbidez, respectivamente. Com base nesses resultados, decidiu-se trabalhar apenas com grãos médios e grandes nos ensaios para definição da melhor condição de operação da secagem.

4.2 Caracterização inicial da matéria prima

Os resultados médios, desvio padrão e coeficiente de variação das propriedades físicas dos grãos de *Moringa oleifera* L. determinadas experimentalmente estão apresentados na Tabela 10. A partir das dimensões do grão, calculou-se o diâmetro equivalente (10,92 mm), área projetada (93,65 mm²), esfericidade (0,99 mm) e o volume (681,73 mm³). Observa-se que as dimensões, comprimento, largura e espessura desses grãos são próximas, o que significa que o mesmo apresenta formato semelhante ao esférico. Essa observação é confirmada com o valor da esfericidade, próximo à unidade.

Tabela 10. Dados médios, desvio padrão e coeficiente de variação de características físicas de grãos de *Moringa oleifera* L.

Características	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
Teor de água (% bu)	5,699	0,18	3,12
Massa (g)	0,323	0,03	9,80
Dimensões (mm)			
Comprimento (d ₁)	10,97	0,54	4,98
Largura (d ₂)	10,94	0,60	5,44
Espessura (d ₃)	10,85	0,55	5,03
Massa específica (kg m ⁻³)	224,33	1,15	0,51
Coeficiente de atrito			
Inox	0,210	0,01	4,21
Chapa galvanizada	0,249	0,03	11,11
Madeira	1,017	0,03	2,82
Atrito interno	0,436	0,02	4,77
Ângulo de repouso (°)	47,50	3,64	7,67
Velocidade terminal experimental (m s ⁻¹)	4,62	0,27	0,06

Verifica-se que a massa específica dos grãos estudados (224,3 kg m⁻³) é inferior à de outros grãos como milho (721 kg m⁻³), aveia (412 kg m⁻³) e girassol (309 kg m⁻³) (BROOKER *et al.*, 1992).

Em relação ao coeficiente de atrito, a superfície de madeira foi a que apresentou maior valor, devido à maior rugosidade dessa superfície em relação às demais. O coeficiente de atrito entre grãos de *Moringa oleifera* L. (interno) mostrou-se superior ao com superfícies de inox e chapa galvanizada. Benedetti (1987) também observou menor coeficiente de atrito para superfície de chapa galvanizada (0,185) em relação à madeira (0,311) e ao atrito interno (1,021) para amendoim.

Comparando-se o ângulo de repouso dos grãos de *Moringa oleifera* L. (47,5°) com o observado por Brooker *et al.* (1974) para arroz em casca (36°), cevada (29°), milho (34°), soja(30°) e trigo (29,6), verifica-se que a *Moringa oleifera* L. apresenta ângulo de talude significativamente superior à esses grãos.

A velocidade terminal dos grãos de *Moringa oleifera* L. foi menor do que para amendoim (14,47 m s⁻¹), arroz em casca (8,18 m s⁻¹), feijão (13,69 m s⁻¹), milho (11,82 m s⁻¹), soja (14,23 m s⁻¹) e trigo (10,28 m s⁻¹) verificados por Benedetti (1987).

Em relação à composição centesimal dos grãos de *Moringa oleifera* L., os resultados das análises de teor de água, cinzas, proteína, lipídios, fibra bruta e carboidratos obtidos nesta pesquisa e aqueles observados por Ndabigengesere *et al.* (1995), Madrona (2009) e Campaoré (2011) estão apresentados na Tabela 11. Percebe-se que os grãos de *Moringa oleifera* L. apresentam baixos teores de fibra bruta e carboidratos, no entanto são ricos em lipídios e proteínas. Ndabigengesere *et al.* (1995) e Campaoré (2011) encontraram teor de proteína semelhante ao obtido nesta pesquisa, enquanto Madrona (2009) observou uma quantidade, aproximadamente, 8% menor. O teor de lipídios obtido nesta pesquisa e por Campaoré (2011) foi, aproximadamente, 9% maior que o encontrado por Ndabigengesere *et al.* (1995) e Madrona (2009). A variação observada nas características físico-químicas dos grãos de *Moringa oleifera* L. são, provavelmente, devido às diferentes condições de cultivo e clima das regiões onde esse produto foi cultivado.

A alta concentração de lipídios dos grãos motivaram estudos relacionados ao método de extração (MANI *et al.*, 2007) e utilização do óleo como antifúngico (CHUANG *et al.*, 2007) e como possível fonte de biodiesel (RASHID *et al.*, 2008; SILVA *et al.*, 2010), dentre outros. Enquanto que o teor de proteína despertou o interesse de diversos pesquisadores para o estudo da aplicação desses grãos como coagulante natural no tratamento de água (NDABIGENGESERE e NARASIAH, 1998; SILVA e MATOS, 2008; LÉDO *et al.*, 2009; MADRONA, 2009; PATERNIANI *et al.*, 2009; ARANTES, 2010; FRANCO, 2010).

Tabela 11. Composição centesimal de grãos de *Moringa oleifera* L.

Parâmetro (%)	Amostra			
	Pesquisada*	Ndabigengesere <i>et al.</i> (1995)	Madrona (2009)	Campaoré <i>et al.</i> (2011)
Teor de água	5,70 ± 0,18	-	8,49 ± 0,02	2,14 ± 0,01
Cinzas	3,39 ± 0,02	-	2,56 ± 0,03	4,98 ± 0,04
Proteína	33,87 ± 0,72	36,7	26,72 ± 0,01	35,37 ± 0,07
Lipídios	43,52 ± 3,74	34,6	33,98 ± 0,02	43,56 ± 0,03
Fibra bruta	3,51 ± 0,22	-	-	4,70 ± 0,20
Carboidratos	10,01 ± 3,75	5,0	28,25 ± 0,04	9,17 ± 0,25

* Correspondem aos dados de média e desvio padrão.

4.3 Secagem convectiva com aplicação de radiação infravermelha

Os resultados obtidos dos ensaios de secagem convectiva com aplicação da radiação infravermelha estão apresentados nos itens a seguir, de acordo com os planejamentos experimentais adotados para a seleção dos fatores que interferem na secagem e para definição da melhor condição de secagem de grãos de *Moringa oleifera* L.

4.3.1 Seleção dos fatores que interferem na secagem

Em relação aos resultados das secagens realizadas para seleção dos fatores, esses foram obtidos em dois conjuntos de ensaios: conduzidos até alcançar equilíbrio higroscópico e realizados até alcançar teor de água único, pré-definido pelos resultados do ensaio precedente.

4.3.1.1 Secagem conduzida até alcançar equilíbrio higroscópico

Os resultados de difusividade efetiva ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), teor de água (% b.u.), atividade de água e tempo de secagem (h), obtidos dos ensaios de secagem de grãos de *Moringa oleifera* L. relativos ao planejamento fatorial fracionado 2^{4-1} , realizado com as variáveis independentes: temperatura do ar (T em °C), velocidade do ar (V em m s^{-1}), tempo de aplicação da radiação infravermelha (t em min) e intensidade da radiação infravermelha (I em W) (Tabela 12).

Tabela 12. Difusividade efetiva, teor de água, atividade de água e tempo de secagem de grãos de *Moringa oleifera* L.

Ensaio	Variáveis independentes				Variáveis dependentes			
	T (°C)	V (m s^{-1})	t (min)	I (W)	D_{ef} ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	TA (% b.u.)	a_w	t_s (h)
1	30	0,55	2	1500	$6,68 \times 10^{-10}$	6,94	0,54	2,75
2	60	0,55	2	4500	$8,91 \times 10^{-10}$	3,09	0,38	3,00
3	30	1,05	2	4500	$6,44 \times 10^{-10}$	7,40	0,57	3,00
4	60	1,05	2	1500	$9,70 \times 10^{-10}$	3,36	0,35	3,00
5	30	0,55	5	4500	$8,52 \times 10^{-10}$	3,95	0,36	3,42
6	60	0,55	5	1500	$8,74 \times 10^{-10}$	2,50	0,27	3,42
7	30	1,05	5	1500	$8,77 \times 10^{-10}$	6,96	0,54	2,75
8	60	1,05	5	4500	$9,89 \times 10^{-10}$	2,40	0,31	3,75
9	45	0,8	3,5	3000	$7,31 \times 10^{-10}$	3,50	0,37	4,00
10	45	0,8	3,5	3000	$7,92 \times 10^{-10}$	4,25	0,38	3,75
11	45	0,8	3,5	3000	$7,05 \times 10^{-10}$	3,99	0,41	4,00

Verifica-se, na Tabela 12, que o ensaio 8 foi o que apresentou maior difusividade efetiva ($9,89 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$), indicando que o processo de secagem nessas condições ($T = 60^\circ\text{C}$, $V = 1,05 \text{ m s}^{-1}$, $t = 5 \text{ min}$ e $I = 4500 \text{ W}$) foi mais rápido que nos demais. Esse resultado é coerente, uma vez que nesse ensaio os níveis de temperatura, velocidade do ar, tempo e intensidade da radiação infravermelha foram os mais elevados. Ao contrário, os ensaios 1 e 3 foram os que apresentaram os menores valores de difusividade efetiva ($6,68 \times 10^{-10}$ e $6,44 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$). Isso foi obtido devido aos menores níveis dos fatores utilizados. Essa observação é confirmada pela análise estatística apresentada na Tabela 13, uma vez que a temperatura do ar e o tempo de aplicação da radiação infravermelha foram significativos e apresentaram efeito positivo sobre a difusividade efetiva, ou seja, o aumento desses fatores provoca proporcional aumento da resposta. A interação entre temperatura do ar e tempo de aplicação da radiação infravermelha também foi significativa, mas com efeito negativo sobre a difusividade efetiva. Ponkham *et al.* (2011) realizaram secagem de abacaxi em rodela e observaram que a difusividade efetiva aumentou com a elevação da intensidade da radiação infravermelha ($1 - 5 \text{ kW m}^{-2}$) e da temperatura do ar ($40 - 60^\circ\text{C}$).

Tabela 13. Efeitos principais e interação de primeira ordem dos fatores significativos sobre as respostas difusividade efetiva ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$), teor de água (% b.u.) e atividade de água com nível de confiança de 90%.

	Fator	Efeito	Erro padrão	p-valor
D_{ef}	Média	$8,18 \times 10^{-10}$	$2,20 \times 10^{-11}$	0,0000
	T	$1,71 \times 10^{-10}$	$5,17 \times 10^{-11}$	0,0130
	t	$1,05 \times 10^{-10}$	$5,17 \times 10^{-11}$	0,0822
	T x t	$-1,04 \times 10^{-10}$	$5,17 \times 10^{-11}$	0,0849
TA	Média	1,000	0,269	0,0000
	T	-3,475	0,631	0,0006
	t	-1,244	0,631	0,0840
a_w	Média	0,406	0,009	0,0000
	T	-0,176	0,021	0,0004
	V	0,054	0,021	0,0507
	t	-0,085	0,021	0,0104
	T x V	-0,051	0,021	0,0634
	T x I	0,056	0,021	0,0475

O teor de água e a atividade de água dos grãos ao final das secagens foram maiores nos ensaios 1, 3 e 7, os quais também apresentaram secagens mais rápidas. Isso ocorreu devido aos baixos níveis dos fatores estudados. Por outro lado, os menores teores de água e atividade de água foram verificados nos ensaios 6 e 8, nos quais os níveis dos fatores eram maiores, provocando também aumento do tempo de secagem (Tabela 12). Estatisticamente, apenas a temperatura do ar e o tempo de aplicação da radiação infravermelha foram significativos ($p \leq 0,10$) e com efeito negativo sobre o teor de água. Para a atividade de água, entretanto, além do efeito significativo da temperatura do ar e do tempo de aplicação da radiação infravermelha, a velocidade do ar, a interação entre temperatura e velocidade do ar, assim como a interação entre temperatura do ar e intensidade da radiação infravermelha também foram significativos ($p \leq 0,10$) (Tabela 13).

Avaliando-se ainda o teor de água, percebe-se que as condições de secagem do ensaio 3 atingiram equilíbrio higroscópico com teor de água de 7,40% (b.u.), sendo esse o maior valor dentre os ensaios. Dessa forma, esse valor foi o definido como o ponto final dos ensaios de secagem do item 4.3.1.2.

O tempo de secagem dos grãos de *Moringa oleifera* L. variaram entre 2,75h e 4,00h. Considerou-se que os fatores estudados não apresentaram efeito significativo sobre essa resposta, com nível de confiança de 90%, pela análise estatística apresentada na Tabela 13.

As Figuras 16, 17 e 18 apresentam as curvas de secagem experimentais e previstas pelo modelo de Fick com solução para esfera utilizando-se 10 termos. Verifica-se ajuste satisfatório das curvas previstas pelo modelo de Fick aos dados experimentais. Isso pode ser observado tanto graficamente, pelas curvas, quanto pelo coeficiente de determinação (R^2), que apenas no ensaio 1 foi de 98%, para os demais ensaios o R^2 foi de 99%.

Observa-se ainda que o desvio entre os dados experimentais e os previstos pelo modelo de Fick são menores nos ensaios do ponto central e que a repetibilidade dos ensaios está satisfatória, uma vez que as repetições no ponto central foram semelhantes (Figura 18).

O êxito no ajuste obtido pelo modelo de Fick ocorreu devido à secagem de grãos de *Moringa oleifera* L. ter ocorrido no período de taxa decrescente, no qual a maior resistência à

transferência de calor e massa ocorre do interior do produto para a superfície, sendo, portanto, a difusão o principal mecanismo a governar o movimento de água.

O modelo da segunda lei de Fick tem sido utilizado para determinar a difusividade efetiva em processos de secagem com a aplicação da radiação infravermelha de diversos produtos, como: resíduos industriais de tomate (Celma *et al.*, 2009b), fatias de maçã (Togrul, 2005), subprodutos industriais de uva (Celma *et al.*, 2009a), fatias de batata doce (Doymaz, 2011).

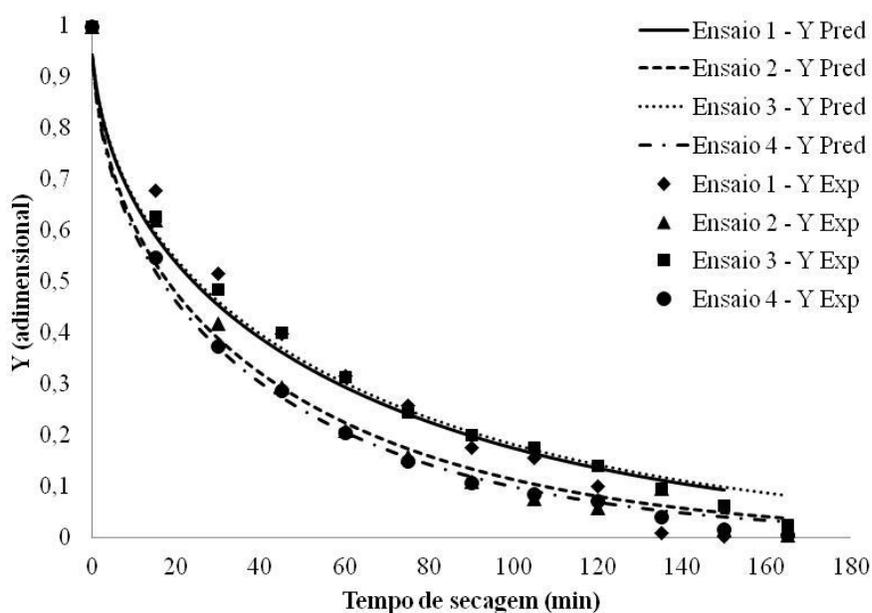


Figura 16. Curvas experimentais (Exp) de secagem e curvas preditas (Pred) pelo modelo de Fick para os pontos fatoriais (ensaios 1 a 4) do planejamento experimental.

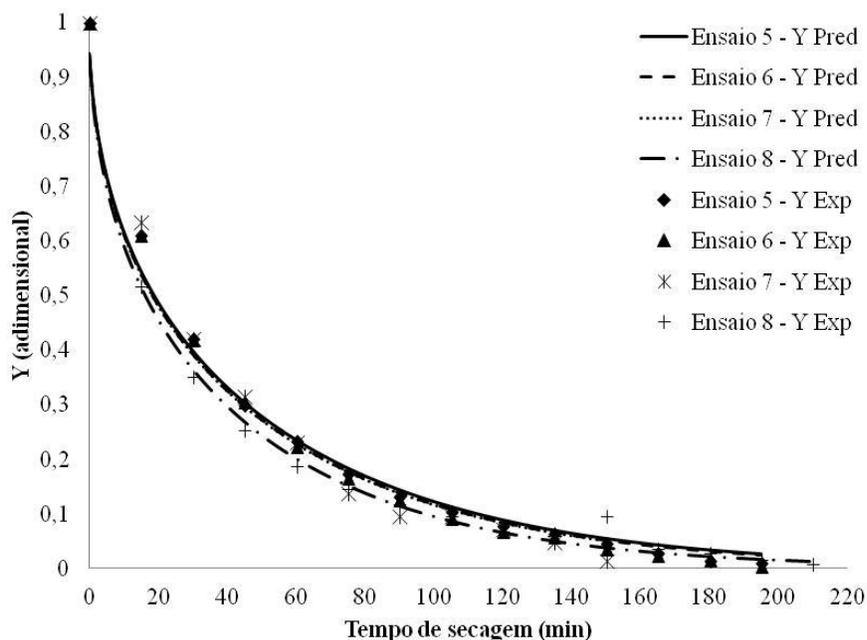


Figura 17. Curvas experimentais (Exp) de secagem e curvas preditas (Pred) pelo modelo de Fick para os pontos fatoriais (ensaios 5 a 8) do planejamento experimental.

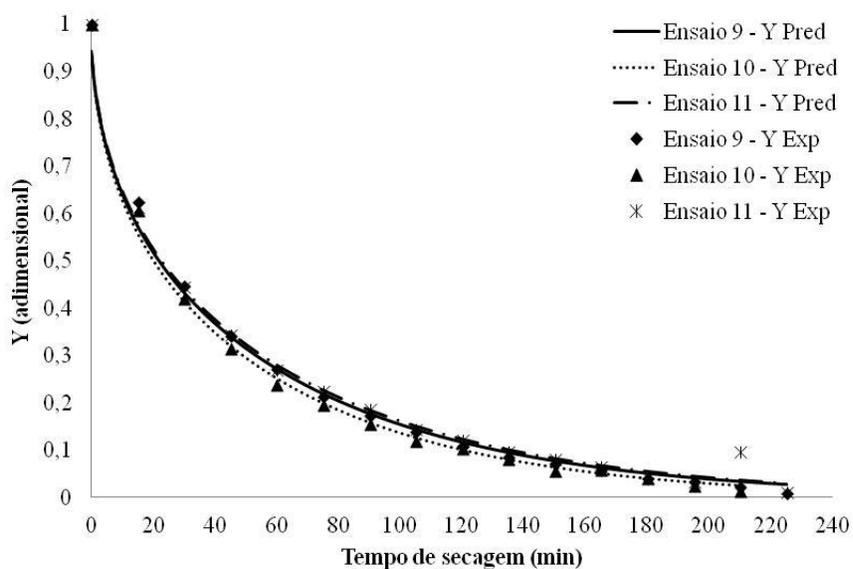


Figura 18. Curvas experimentais (Exp) de secagem e curvas preditas (Pred) pelo modelo de Fick para os pontos centrais (ensaios 9 a 11) do planejamento experimental.

Os modelos de Page, Midilli e Newton também foram utilizados para descrever a secagem de grãos de *Moringa oleifera* L. Na Tabela 14 são apresentados os coeficientes desses modelos obtidos para as condições de secagem de cada ensaio. Verifica-se, pela Tabela 15, que os modelos de Page e Midilli explicaram mais de 99% da variação dos dados

experimentais de todos os ensaios. O modelo de Newton apresentou R² entre 98,03% e 99,68%. Dessa forma, considera-se que os três modelos estudados apresentaram ótimos coeficientes de determinação.

Tabela 14. Coeficientes dos modelos de Page, Midilli e Newton para os ensaios de secagem de grãos de *Moringa oleifera* L.

Ensaio	Page		Midilli				Newton
	k	y	a	k	n	b	k
1	0,0287	0,9158	1,0010	0,0638	0,6526	-1,25 x10 ⁻⁰³	0,0203
2	0,0505	0,8354	1,0011	0,0505	0,8344	-2,42x10 ⁻⁰⁵	0,0268
3	0,0535	0,7610	1,0002	0,0918	0,5854	-7,70x10 ⁻⁰⁴	0,0198
4	0,0761	0,7492	1,0001	0,0986	0,6651	-2,76x10 ⁻⁰⁴	0,0292
5	0,0572	0,7960	1,0010	0,0641	0,7609	-8,93x10 ⁻⁰⁵	0,0257
6	0,0530	0,8193	1,0005	0,0592	0,7855	-8,43x10 ⁻⁰⁵	0,0262
7	0,0432	0,8723	1,0004	0,0454	0,8567	-5,04x10 ⁻⁰⁵	0,0263
8	0,1138	0,6530	1,0007	0,1193	0,6382	-3,40x10 ⁻⁰⁵	0,0308
9	0,0604	0,7545	1,0009	0,0697	0,7118	-1,03x10 ⁻⁰⁴	0,0222
10	0,0694	0,7357	1,0015	0,0746	0,7141	-5,23x10 ⁻⁰⁵	0,0242
11	0,0725	0,7053	1,0002	0,0743	0,6982	-1,73x10 ⁻⁰⁵	0,0217

Tabela 15. Coeficientes de determinação (R² %) dos modelos de Page, Midilli e Newton para os ensaios de secagem de grãos de *Moringa oleifera* L.

Ensaio	Page	Midilli	Newton
1	99,40	99,89	99,29
2	99,84	99,83	99,50
3	99,70	99,96	98,54
4	99,89	99,98	98,95
5	99,97	99,99	99,36
6	99,98	100,00	99,53
7	99,90	99,91	99,68
8	99,86	99,86	98,03
9	99,96	99,99	98,90
10	99,96	99,97	98,77
11	99,79	99,79	98,09

4.3.1.2 Secagem conduzida até alcançar teor de água pré-definido

O teor de água inicial dos grãos de *Moringa oleifera* L. era 13,12% b.u. e o objetivo desses ensaios foi o de realizar secagem até alcançar teor de água final de 7% b.u. Dessa forma, na Tabela 16 estão apresentadas as variáveis independentes utilizadas nos ensaios de secagem e os resultados do teor de água, atividade de água, tempo de secagem e taxa de secagem.

O teor de água ao final dos ensaios de secagem variou entre 6,74 e 8,33% (b.u.), sendo o teor de água médio dos mesmos de $7,47 \pm 0,50\%$ (b.u.) (Tabela 16). O desvio observado em torno de 7% (b.u.) se deu pelo monitoramento da secagem ocorrer em intervalos de 15 minutos. Estatisticamente, não se verificou efeito significativo ($p \geq 0,05$) dos fatores em relação ao teor de água dos grãos dos ensaios de secagem com nível de confiança de 95% (Tabela 17). Dessa forma, considera-se que o objetivo de realizar a secagem até teor de água em torno de 7% foi alcançado.

A atividade de água média dos ensaios de secagem foi de $0,57 \pm 0,05$, podendo ser considerada semelhante entre os ensaios, pois não se observou efeito significativo ($p \geq 0,05$) nem dos fatores, nem da interação entre eles sobre essa resposta, como pode ser visualizado na Tabela 17. A atividade de água é um importante parâmetro para prever a degradação de alimentos e para determinar o ponto final da secagem e, assim, garantir um produto estável (VAN DEN BERG, 1986). De acordo com Celestino (2010), em alimentos com atividade de água próxima a 0,6 tem-se pequeno ou nenhum crescimento de microrganismos. Então, pode-se concluir que os grãos de *Moringa oleifera* L. podem ser armazenados de forma segura com o teor de água obtido nesses ensaios de secagem.

Tabela 16. Variáveis independentes: temperatura (T) e velocidade do ar (V), tempo (t) e intensidade (I) da radiação infravermelha. Variáveis dependentes: teor de água (TA), atividade de água (a_w), tempo (t_s) e taxa de secagem (dX/dt) de grãos de *Moringa oleifera* L.

Ensaio	Variáveis independentes				Variáveis dependentes			
	T (°C)	V (m s ⁻¹)	t (min)	I (W)	TA (% b.u.)	a_w	t_s (h)	dX/dt (kg kg ⁻¹ min ⁻¹)
1	30	0,55	2,0	1500	7,96	0,59	3,75	0,40x10 ⁻⁰³
2	60	0,55	2,0	4500	7,24	0,60	0,50	2,55x10 ⁻⁰³
3	30	1,05	2,0	4500	7,31	0,61	2,25	0,56x10 ⁻⁰³
4	60	1,05	2,0	1500	7,85	0,58	0,75	1,65x10 ⁻⁰³
5	30	0,55	5,0	4500	7,28	0,66	0,50	2,57x10 ⁻⁰³
6	60	0,55	5,0	1500	7,05	0,56	0,75	1,81x10 ⁻⁰³
7	30	1,05	5,0	1500	7,82	0,57	3,25	0,42x10 ⁻⁰³
8	60	1,05	5,0	4500	6,85	0,59	0,50	3,33x10 ⁻⁰³
9	45	0,80	3,5	3000	6,74	0,45	1,00	1,36x10 ⁻⁰³
10	45	0,80	3,5	3000	7,70	0,54	0,75	1,76x10 ⁻⁰³
11	45	0,80	3,5	3000	8,33	0,56	0,75	1,77x10 ⁻⁰³

Em relação ao tempo de secagem, os ensaios que atingiram teor de água em torno de 7% mais rapidamente foram os ensaios 2, 5 e 8, os quais tiveram duração de 0,50 h. Observe-se, pela Tabela 16, que nesses ensaios utilizou-se uma combinação dos maiores níveis dos fatores temperatura do ar e intensidade da radiação infravermelha (ensaio 2) ou tempo e intensidade da radiação infravermelha (ensaio 5) ou ainda todos os fatores com os maiores níveis (ensaio 8). Em contrapartida, os ensaios que demandaram maior tempo de secagem foram realizados com os menores níveis dos fatores, ensaios 1 e 7, os quais apresentaram tempo de secagem de 3,75 h e 3,25 h, respectivamente (Tabela 16).

Tabela 17. Efeitos principais e interações de primeira ordem das variáveis independentes sobre as variáveis dependentes: teor de água (TA) e atividade de água (a_w) (95% de confiança).

Variáveis	TA (% b.u.)			a_w		
	Efeito	Erro padrão	p	Efeito	Erro padrão	p
Média	7,466	0,202	0,000	0,574	0,025	0,0002
T	-0,344	0,474	0,520	-0,025	0,059	0,6987
V	0,074	0,474	0,887	-0,012	0,059	0,8551
t	-0,336	0,474	0,529	0,002	0,059	0,9791
I	-0,500	0,474	0,369	0,038	0,059	0,5601
T x V	0,130	0,474	0,802	0,022	0,059	0,7364
T x t	-0,251	0,474	0,632	-0,015	0,059	0,8147
T x I	0,093	0,474	0,856	-0,015	0,059	0,8147

Tabela 18. Efeitos principais e interações de primeira ordem das variáveis independentes sobre as variáveis dependentes: tempo de secagem (t_s) e taxa de secagem (dX/dt) (90% de confiança).

Variáveis	t_s (h)			dX/dt (kg kg ⁻¹ min ⁻¹)		
	Efeito	Erro padrão	p	Efeito	Erro padrão	p
Média	1,341	0,183	0,005	1,65x10⁻⁰³	5,78x10⁻⁰⁵	0,0001
T	-1,813	0,429	0,024	1,35x10⁻⁰³	1,36x10⁻⁰⁴	0,0022
V	0,313	0,429	0,519	-3,44x10⁻⁰⁴	1,36x10⁻⁰⁴	0,0847
t	-0,563	0,429	0,281	7,42x10⁻⁰⁴	1,36x10⁻⁰⁴	0,0120
I	-1,188	0,429	0,070	1,18x10⁻⁰³	1,36x10⁻⁰⁴	0,0032
T x V	-0,313	0,429	0,519	6,53x10⁻⁰⁴	1,36x10⁻⁰⁴	0,0171
T x t	0,563	0,429	0,281	-2,77x10 ⁻⁰⁴	1,36x10 ⁻⁰⁴	0,1340
T x I	0,938	0,429	0,117	3,00x10 ⁻⁰⁵	1,36x10 ⁻⁰⁴	0,8390

A análise estatística apresentada na Tabela 18 mostra que a temperatura do ar e a intensidade da radiação infravermelha foram os fatores responsáveis pelo comportamento descrito anteriormente. Isso porque, esses fatores apresentaram efeito significativo ($p \leq 0,10$) sobre o tempo de secagem e esse efeito foi negativo, indicando que o aumento dos mesmos provocou redução do tempo de secagem.

O comportamento da taxa de secagem em função do tempo de secagem dos ensaios 1, 2, 3 e 11 pode ser observado pelas curvas da Figura 19. Percebe-se que os ensaios 1 e 3

apresentaram maior tempo de secagem que os ensaios 2 e 11, devido às condições de secagem utilizadas, mas em todas as curvas verifica-se que a taxa de secagem diminui ao longo do tempo.

Na Tabela 16 observa-se que, da mesma forma como ocorreu para o tempo de secagem, os maiores valores de taxa de secagem foram obtidos nos ensaios 2, 5 e 8. Percebe-se ainda, comparando os ensaios 2 e 5, que a taxa de secagem foi praticamente igual nesses ensaios, o que variou no nível dos fatores foi que no ensaio 2 utilizou-se temperatura do ar de 60 °C e 2 min de radiação infravermelha e no ensaio 5, 30 °C e 5 min, ou seja, o efeito da elevação de 30°C da temperatura do ar pode ser substituído pelo aumento de 3 min no tempo de aplicação da radiação infravermelha.

Os menores valores de taxa de secagem foram obtidos nos ensaios 1, 3 e 7. No caso do ensaio 1, isso ocorreu pela utilização dos quatro fatores nos menores níveis, mas nos ensaios 3 e 7 acredita-se que a aplicação do maior nível de velocidade do ar ($1,05 \text{ m s}^{-1}$) agiu reduzindo a taxa de transferência de calor da radiação infravermelha para os grãos, camuflando assim o efeito da maior intensidade da radiação infravermelha (4500 W) utilizada no ensaio 3 e do tempo de aplicação da radiação infravermelha de 5 min utilizado no ensaio 7.

A Tabela 18 mostra que os fatores temperatura do ar, tempo e intensidade da radiação infravermelha e a interação entre temperatura e velocidade do ar foram significativos em relação à resposta taxa de secagem e apresentaram efeito positivo, ou seja, quando da elevação desses fatores observou-se proporcional aumento da taxa de secagem dos grãos. A velocidade do ar de secagem também apresentou efeito significativo sobre a taxa de secagem, porém seu efeito foi negativo, implicando em redução dessa resposta quando a velocidade do ar foi aumentada. Esses resultados da análise estatística comprovam as observações descritas anteriormente.

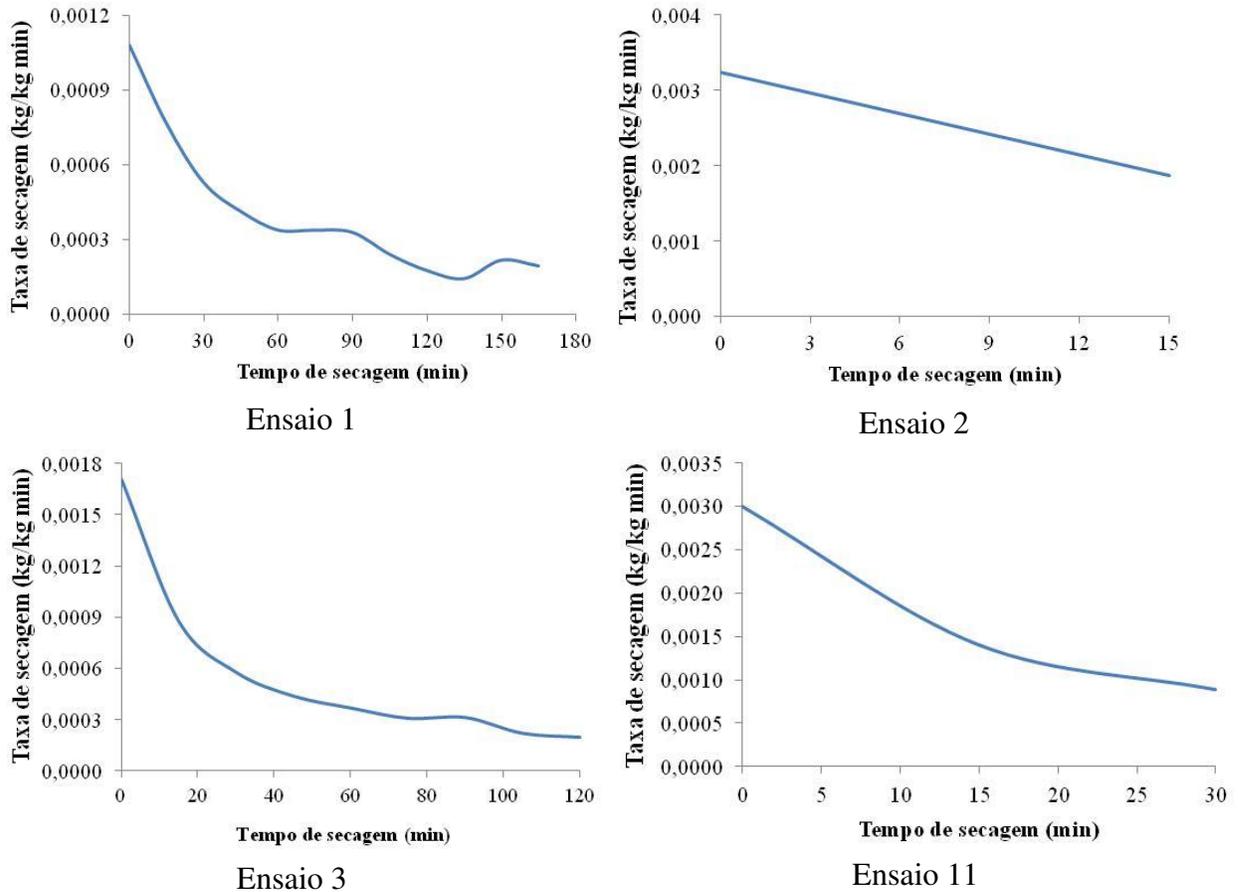


Figura 19. Curvas da taxa de secagem (dX/dt) dos grãos de *Moringa oleifera* L. relativas aos ensaios 1, 2, 3 e 11 – Planejamento fatorial fracionado.

Os resultados de teor de proteína dos grãos secos obtidos dos ensaios de secagem, assim como os valores de turbidez, constante de redução da turbidez e pH de água sintética tratada com solução coagulante a base dos grãos de *Moringa oleifera* L. secos nas condições de cada ensaio são apresentados na Tabela 19. O ensaio 9 (ponto central) foi retirado da análise por ter apresentado dado discrepante de turbidez (4,00 NTU) em relação aos demais pontos centrais, ensaios 10 e 11.

Tabela 19. Variáveis independentes: temperatura (T) e velocidade (V) do ar, tempo (t) e intensidade (I) da radiação infravermelha. Variáveis dependentes: teor de proteína dos grãos, turbidez, constante de redução da turbidez (k_c) e pH de água tratada com os grãos de *Moringa oleifera* L. secos.

Ensaio	Variáveis independentes				Variáveis dependentes			
	T (°C)	V (m s ⁻¹)	t (min)	I (W)	Teor de proteína (%)	Turbidez (NTU)	k_c (1/tempo)	pH
1	30	0,55	2	1500	38,59	14,77	0,059	7,71
2	60	0,55	2	4500	39,11	12,73	0,074	7,94
3	30	1,05	2	4500	38,77	10,83	0,098	7,46
4	60	1,05	2	1500	38,04	5,00	0,185	7,38
5	30	0,55	5	4500	39,13	5,82	0,162	7,69
6	60	0,55	5	1500	37,74	12,73	0,078	7,94
7	30	1,05	5	1500	40,39	11,33	0,094	7,85
8	60	1,05	5	4500	38,30	6,56	0,156	7,83
9	45	0,8	3,5	3000	37,96	4,00	0,195	7,39
10	45	0,8	3,5	3000	37,58	10,37	0,097	7,77
11	45	0,8	3,5	3000	38,66	10,75	0,101	7,65

O teor de proteína inicial dos grãos era de 37,94% e ao final dos ensaios de secagem variou entre 37,58% e 40,39% (Tabela 19). Pela análise estatística apresentada na Tabela 20, observa-se que nenhum dos fatores apresentou efeito significativo sobre o teor de proteína, então, essa variação pode ser devida à própria variabilidade natural desse material biológico. Dessa forma, pode-se afirmar que os tratamentos de secagem aplicados aos grãos de *Moringa oleifera* L. foram adequados, pois mantiveram o teor de proteína dos mesmos.

Tabela 20. Efeitos principais e interações de primeira ordem das variáveis independentes sobre as variáveis dependentes: teor de proteína e turbidez (90% de confiança).

Variáveis	Teor de proteína (%)			Turbidez (NTU)		
	Efeito	Erro padrão	p	Efeito	Erro padrão	p
Média	38,631	0,249	4,15x10⁻⁰⁵	10,09	0,176	0,0003
T	-0,924	0,557	0,239	-1,43	0,395	0,0684
V	0,232	0,557	0,718	-3,08	0,395	0,0160
t	0,266	0,557	0,680	-1,72	0,395	0,0487
I	0,140	0,557	0,825	-1,97	0,395	0,0378
T x V	-0,489	0,557	0,472	-3,87	0,395	0,0102
T x t	-0,814	0,557	0,281	2,50	0,395	0,0239
T x I	0,675	0,557	0,349	2,75	0,395	0,0199

De acordo com metodologia descrita no item 3.11.3, água sintética com turbidez inicial de aproximadamente 60 NTU foi tratada com solução coagulante a base de *Moringa oleifera* L. em testes de coagulação, floculação e sedimentação por período de 60 min. A Tabela 19 apresenta os resultados da turbidez da água tratada com os grãos dos ensaios de secagem após 60 min. de sedimentação. Verifica-se, ainda pela Tabela 19, que a turbidez variou de 5,00 NTU (ensaio 4) a 14,77 NTU (ensaio 1), o que corresponde a uma eficiência na remoção da turbidez de 79,97% e 67,67%, respectivamente.

Essa variação da turbidez obtida entre os ensaios de secagem é considerada significativa, pois como pode ser observado na Tabela 20, tanto os fatores quanto as interações de primeira ordem entre eles apresentaram efeito significativo ($p \leq 0,10$) sobre a turbidez. Os efeitos principais dos fatores e a interação entre temperatura e velocidade do ar foram negativos sobre a turbidez, de forma que um incremento nos níveis dos primeiros promoveu redução da turbidez de água tratada com solução desses grãos, o que é desejado em operações de tratamento de água. No entanto, as interações da temperatura do ar com o tempo de aplicação da radiação infravermelha e da temperatura do ar com a intensidade da radiação infravermelha apresentaram efeito positivo sobre a turbidez.

A partir dos dados de turbidez obtidos durante o período de sedimentação (0, 10, 20, 30 45 e 60 min) calculou-se com a Equação 19 a constante de redução da turbidez (k_c) para cada ensaio de secagem (Tabela 19). Com os valores de k_c também foi possível avaliar a cinética de redução da turbidez dos dados experimentais (Apêndices A e B; Figura 20).

Os valores da constante de redução da turbidez (k_c) variaram entre 0,059 e 0,185 (Tabela 19). Observa-se, pela análise estatística da Tabela 21, que a velocidade do ar e a interação entre temperatura e velocidade do ar foram significativas ($p \leq 0,10$) e apresentaram efeito positivo sobre k_c . Dessa forma, aumentando-se o nível dessas variáveis provocou-se elevação de k_c , ou seja, da velocidade com que ocorreu a redução da turbidez. As interações da temperatura do ar com o tempo de aplicação da radiação infravermelha e da temperatura do ar com a intensidade da radiação infravermelha também foram significativas ($p \leq 0,10$), porém apresentaram efeito negativo sobre k_c , indicando que o aumento simultâneo no nível dessas variáveis gerou menor velocidade na redução da turbidez.

Tabela 21. Efeitos principais e interações de primeira ordem das variáveis independentes sobre as variáveis dependentes: coeficiente de redução da turbidez e pH (90% de confiança).

Variáveis	k_c (1/tempo)			pH		
	Efeito	Erro padrão	p	Efeito	Erro padrão	p
Média	0,110	0,004	0,001	7,7233	0,0199	$6,66 \times 10^{-06}$
T	0,020	0,009	0,156	0,0975	0,0446	0,160
V	0,040	0,009	0,048	-0,1892	0,0446	0,051
t	0,019	0,009	0,178	0,2075	0,0446	0,043
I	0,018	0,009	0,181	0,0108	0,0446	0,831
T x V	0,055	0,009	0,026	-0,1475	0,0446	0,080
T x t	-0,031	0,009	0,078	0,0192	0,0446	0,709
T x I	-0,035	0,009	0,062	0,2158	0,0446	0,040

A Figura 20 mostra a evolução da turbidez durante os tempos 0, 10, 20, 30, 45 e 60 min de sedimentação dos sólidos de água sintética tratada com grãos obtidos do ensaio 8. Com o valor de k_c desse ensaio gerou-se a curva de valores preditos pela equação de 1ª ordem. Observa-se que a curva prevê de forma geral o comportamento da redução da turbidez, porém com desvio considerável em relação aos pontos experimentais (desvio médio relativo de 66%). Nota-se também que nos primeiros 10 min foi quando ocorreu maior remoção da turbidez, nos tempos subsequentes avaliados houve sedimentação em menor proporção. Esse comportamento foi observado em todos os ensaios.

Em relação ao pH de água sintética tratada com os grãos secos dos ensaios, verifica-se que seus valores variaram entre 7,38 e 7,94. Essa variação foi considerada significativa pela análise estatística apresentada na Tabela 21, sendo que as variáveis velocidade do ar de secagem e a interação da temperatura com a velocidade do ar apresentaram efeito negativo sobre o pH, enquanto o tempo de aplicação da radiação infravermelha e a interação da temperatura do ar com a intensidade da radiação infravermelha provocaram efeito positivo. Na prática, a faixa de valores observada nos ensaios está dentro do recomendado pela Portaria 2914/2011 para sistemas de distribuição de água, que é de 6,0 a 9,5. Dessa forma, o efeito das variáveis não interferiu no pH a ponto de necessitar correção do mesmo.

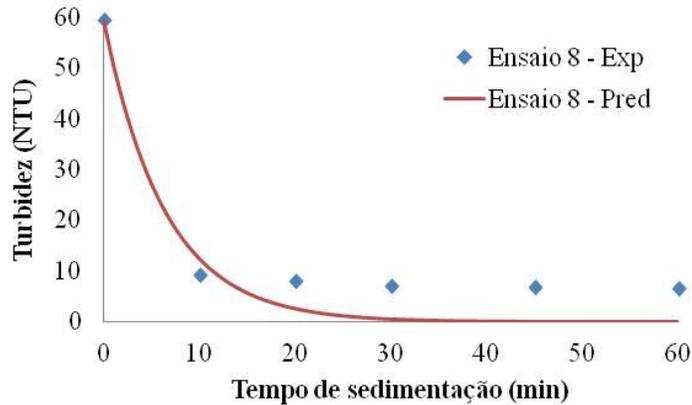


Figura 20. Cinética de redução da turbidez experimental (Exp) e predita (Pred) pela Equação 19, obtida durante o tempo de sedimentação de 60 min – Ensaio 8.

Em relação aos aspectos energéticos dos ensaios de secagem de grãos de *Moringa oleifera* L., a Tabela 22 mostra a energia consumida e a energia específica demandada em cada ensaio. Percebe-se que o maior consumo de energia ocorreu no ensaio 4 (4,35 kWh), provavelmente devido ao alto nível de temperatura e velocidade do ar utilizados, 60 °C e 1,05 m s⁻¹, respectivamente, enquanto no ensaio 5, em que se utilizou os menores níveis de temperatura e velocidade do ar (30 °C e 0,55 m s⁻¹) obteve-se a menor demanda energética. Pela análise estatística apresentada na Tabela 23, a velocidade do ar foi significativa e apresentou efeito positivo sobre a energia consumida, assim, quanto maiores os níveis dessa variável maior também foi o consumo de energia. A intensidade da radiação infravermelha, por sua vez, foi significativa, mas com efeito negativo sobre o consumo energético, indicando que sua elevação proporcionou menor consumo.

Tabela 22. Variáveis independentes: temperatura (T) e velocidade do ar (V), tempo (t) e intensidade (I) da radiação infravermelha. Variáveis dependentes: energia consumida e energia específica dos ensaios de secagem de grãos de *Moringa oleifera* L.

Ensaio	Variáveis independentes				Variáveis dependentes	
	T (°C)	V (m s ⁻¹)	t (min)	I (W)	Energia consumida (kWh)	Energia específica (kWh kg ⁻¹)
1	30	0,55	2	1500	3,181	1000,14
2	60	0,55	2	4500	1,682	470,43
3	30	1,05	2	4500	1,890	535,39
4	60	1,05	2	1500	4,349	1346,89
5	30	0,55	5	4500	0,772	217,48
6	60	0,55	5	1500	2,584	705,05
7	30	1,05	5	1500	3,408	1044,39
8	60	1,05	5	4500	3,442	913,65
9	45	0,8	3,5	3000	3,669	953,76
10	45	0,8	3,5	3000	2,400	721,72
11	45	0,8	3,5	3000	2,352	794,83

Tabela 23. Efeitos principais e interações de primeira ordem das variáveis independentes sobre as variáveis dependentes: energia consumida e energia específica (90% de confiança).

Variáveis	Energia consumida (kWh)			Energia específica (kWh/kg)		
	Efeito	Erro padrão	p	Efeito	Erro padrão	p
Média	2,703	0,188	0,0007	791,25	31,35	0,0001
T	0,701	0,440	0,2089	159,65	73,51	0,1183
V	1,217	0,440	0,0697	361,81	73,51	0,0161
t	-0,224	0,440	0,6458	-118,07	73,51	0,2066
I	-1,434	0,440	0,0471	-489,88	73,51	0,0069
T x V	0,545	0,440	0,3032	180,72	73,51	0,0910
T x t	0,221	0,440	0,6496	18,76	73,51	0,8151
T x I	0,530	0,440	0,3148	155,95	73,51	0,1240

A análise da energia específica demandada em cada ensaio se deu pela relação entre o consumo de energia pela massa de água evaporada durante a realização do ensaio de secagem. Pela Tabela 22 é possível perceber que, da mesma forma como ocorreu com o consumo de energia, os ensaios 4 e 5 demandaram maior e menor quantidade de energia específica, respectivamente. O efeito dos maiores níveis da velocidade do ar de secagem foi estatisticamente significativo ($p \leq 0,10$) no aumento da energia específica, enquanto que a

intensidade da radiação infravermelha promoveu redução significativa ($p \leq 0,10$) da demanda de energia específica dos ensaios de secagem de grãos de *Moringa oleifera* L. A interação entre temperatura e velocidade do ar também foi significativa ($p \leq 0,10$) e seu efeito foi positivo, assim, incrementos simultâneos nos níveis de temperatura e velocidade do ar de secagem provocaram aumento da demanda de energia específica (Tabela 23).

Ao final da análise de resultados dos ensaios de secagem de grãos de *Moringa oleifera* L., observou-se que todos os fatores apresentaram efeito significativo em pelo menos uma das respostas estudadas. Dessa forma, todos os fatores deveriam ser mantidos e estudados no delineamento composto central rotacional para a definição da melhor condição de operação da secagem, no entanto, era inviável a realização de 27 ensaios ($2^4 = 16$ pontos fatoriais; $2 \times 4 = 8$ pontos axiais e 3 pontos centrais) devido à quantidade restrita de matéria prima que se tinha. Avaliou-se, então, separadamente a importância de cada fator a ser selecionado para o próximo delineamento.

No caso da intensidade da radiação infravermelha, não é possível ajustá-la aos níveis dos pontos axiais. Assim, esse fator não foi selecionado para o delineamento seguinte, o mesmo foi fixado na maior intensidade (4500 W), uma vez que o maior nível desse fator promoveu redução do tempo de secagem, da turbidez de água sintética, do consumo de energia e da demanda de energia específica.

A velocidade do ar durante a operação de secagem é importante na transferência do calor convectivo fornecido pelas resistências elétricas para os grãos e na remoção da água evaporada do interior da câmara de secagem. Então, fixar essa variável não impediu que a mesma realizasse sua função. Como já foi constatado maiores níveis da velocidade do ar provocaram redução da taxa de secagem e aumento do consumo de energia e de energia específica, fixou-se essa variável no menor nível possível para utilização nos ensaios do delineamento composto central rotacional.

Observou-se que a elevação dos níveis da temperatura do ar agiu aumentando significativamente a taxa de secagem e reduzindo o tempo de secagem, além disso, interferiu na qualidade dos grãos de *Moringa oleifera* L. utilizados no tratamento de água, pois reduziu a turbidez de água sintética tratada com solução à base desses grãos. Assim, decidiu-se

selecionar a variável independente temperatura do ar de secagem para a realização dos ensaios do delineamento composto central rotacional.

O tempo de aplicação da radiação infravermelha também foi considerado um fator importante nesses ensaios, pois contribuiu com o aumento da taxa de secagem e com a redução da turbidez de água sintética. Selecionar esse fator para utilização no próximo delineamento também foi a única forma de continuar avaliando o efeito da radiação infravermelha na secagem, uma vez que não é possível variar a intensidade dessa radiação nos pontos axiais do delineamento. Dessa forma, o tempo de aplicação da radiação infravermelha foi selecionado como variável independente dos ensaios realizados para definição da melhor condição de operação da secagem de grãos de *Moringa oleifera* L.

4.3.2 Definição da melhor condição de operação da secagem

As respostas obtidas nos ensaios para definição da melhor condição de operação da secagem de grãos de *Moringa oleifera* L. estão apresentados a seguir e foram subdivididos nos itens: Temperatura do ar no interior da câmara de secagem e dentro dos grãos; Consumo de energia; Avaliação da secagem e da qualidade dos grãos de *Moringa oleifera* L. e Efeito dos tratamentos de secagem na qualidade dos grãos de *Moringa oleifera* L. utilizados no tratamento de águas.

4.3.2.1 Temperatura do ar no interior da câmara de secagem e dentro dos grãos

Os comportamentos da temperatura interna do secador e dentro dos grãos estão representados pelos ensaios 1, 2, 8 e 11 na Figura 21. Os picos das curvas coincidem com os períodos de aplicação da radiação infravermelha, os quais ocorreram de forma intermitente em intervalos de 15 minutos e com duração específica para cada ensaio (Tabela 24). Percebe-se, pela Figura 21, que os diferentes tempos de aplicação dessa radiação interferiram elevando a temperatura do ar dentro do secador, mas, principalmente, no interior do grão, uma vez que, de acordo com as leis da óptica, a radiação infravermelha passa através do ar e é absorvida pelo produto (SAKAI e MAO, 2006).

Fazendo-se uma análise da transferência de calor que ocorreu dentro do secador, pode-se afirmar que a energia térmica do ar de secagem aqueceu os grãos de *Moringa oleifera*

L. por convecção durante o período em que as resistências de infravermelho estavam desligadas. Porém, imediatamente após desligar as resistências de infravermelho, o ar insuflado pelo ventilador e aquecido pelas resistências elétricas resfriou o interior da câmara de secagem e os grãos, por ter temperatura inferior àquela proporcionada pelas resistências radiantes. Quando acionadas as resistências de infravermelho, as mesmas forneceram energia radiante, a qual foi absorvida pelos grãos e, então, convertida em calor por interação com as moléculas dos grãos. O calor passou em todo o grão a partir da camada superficial por condução (SAKAI e MAO, 2006). Parte da energia despendida pelas resistências de infravermelho foi absorvida pelas paredes do secador que, por convecção, também aqueceram o ar dentro do secador. A bandeja metálica que continha os grãos também recebeu radiação infravermelha, essa energia foi absorvida pela bandeja, a qual se aqueceu e por convecção aqueceu o ar dentro do secador e por condução aqueceu os grãos em contato com a mesma. Entre os grãos também pode ter ocorrido transferência de calor por condução. Assim, pode-se afirmar, que nos ensaios de secagem realizados nesta pesquisa, a transferência de calor para os grãos ocorreu por convecção, radiação e condução.

Tabela 24. Variáveis independentes: temperatura do ar de secagem (T) e tempo de aplicação da radiação infravermelha (t) e variáveis dependentes: temperatura média do ar, temperatura média dos grãos e temperatura máxima dos grãos, obtidas nos ensaios de secagem de grãos de *Moringa oleifera* L.

Ensaio	Variáveis independentes		Variáveis dependentes		
	T (°C)	t (min)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura dos grãos (°C)	Temperatura máxima dos grãos (°C)
1	-1 (34)	-1 (2,4)	42,65	56,32	93,69
2	1 (54)	-1 (2,4)	56,16	67,88	108,66
3	-1 (34)	1 (4,4)	48,63	68,82	124,60
4	1 (54)	1 (4,4)	60,89	76,19	122,25
5	-1,41 (30)	0 (3,4)	42,24	58,90	110,29
6	1,41 (58)	0 (3,4)	61,82	73,79	120,97
7	0 (44)	-1,41 (2,0)	50,27	62,59	99,537
8	0 (44)	1,41 (4,8)	55,59	73,22	128,15
9	0 (44)	0 (3,4)	51,45	70,45	126,01
10	0 (44)	0 (3,4)	49,84	64,14	111,39
11	0 (44)	0 (3,4)	50,17	67,29	114,22

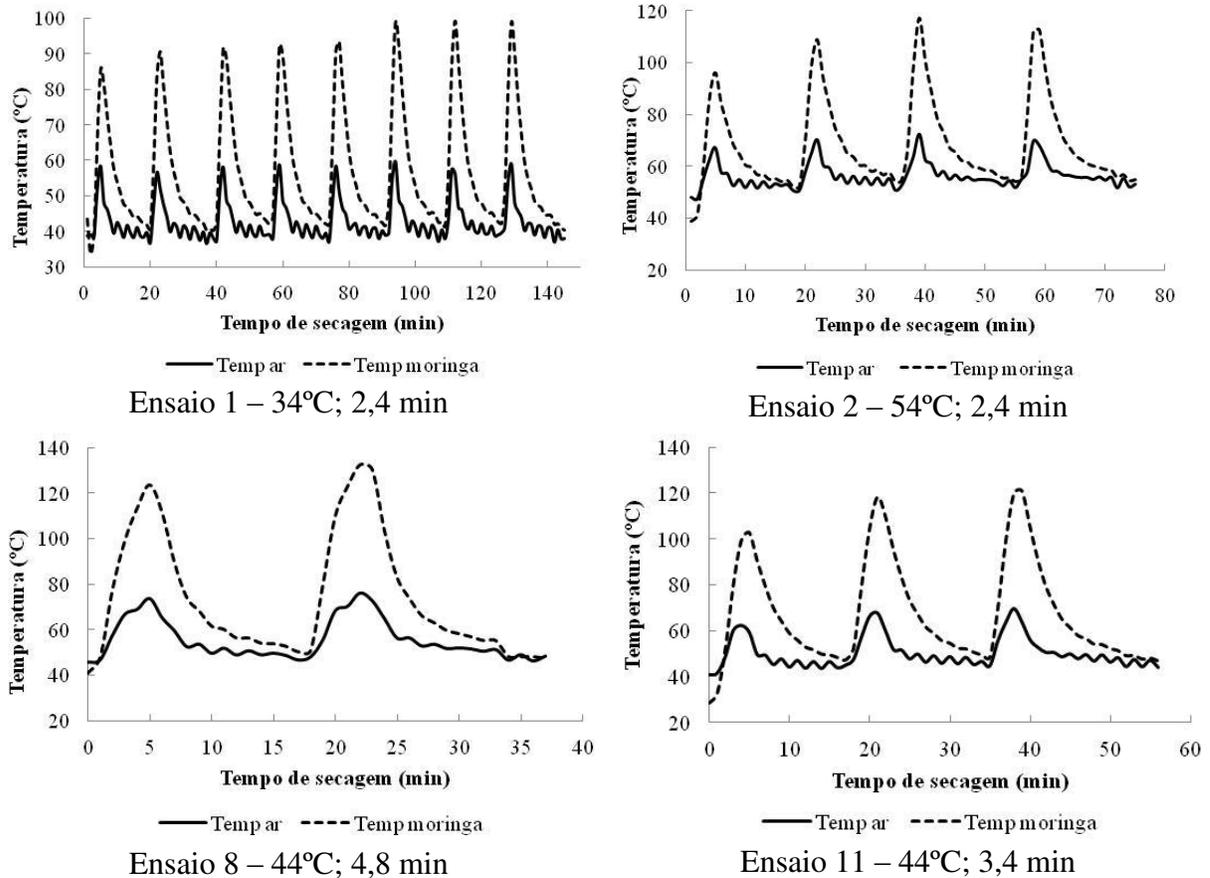


Figura 21. Monitoramento da temperatura interna do secador (Temp ar) e no interior do grão de *Moringa oleifera* L. (Temp moringa) durante os ensaios de secagem 1, 2, 8 e 11.

Observa-se, ainda pela Figura 21, que os picos da temperatura dentro dos grãos apresentam tendência de elevação, isso porque, no início da secagem a energia absorvida é utilizada para secar o produto, mas com o decorrer da secagem a quantidade de água no produto diminui e a energia absorvida pela radiação aquece ainda mais o produto.

As temperaturas médias observadas no ar dentro do secador, no interior dos grãos e a temperatura máxima dentro dos grãos nos ensaios de secagem são apresentadas na Tabela 24. Percebe-se que a temperatura média do ar foi aumentada em relação à temperatura de secagem fornecida pelas resistências elétricas entre 2,16 °C (ensaio 2) e 14,63 °C (ensaio 3). As maiores diferenças entre essas temperaturas foram observadas quando da utilização de maiores tempos de aplicação da radiação infravermelha associadas a uma menor temperatura do ar de secagem (ensaios 3, 5 e 8).

Em relação à temperatura média no interior dos grãos, verifica-se que a aplicação da radiação infravermelha proporcionou aumento da mesma em relação à temperatura do ar de secagem entre 13,88 °C (ensaio 2) e 34,82 °C (ensaio 3). Observou-se que os ensaios conduzidos com os menores níveis de temperatura do ar e com os maiores tempos de aplicação da radiação infravermelha obtiveram as maiores elevações nas temperaturas no interior dos grãos (ensaios 3, 5 e 8). Essa análise pode ser percebida quando se avalia os ensaios com o mesmo tempo de aplicação da radiação infravermelha, como por exemplo, os ensaios 1 e 2, no qual a temperatura do grão se elevou de 34 °C para 56,32 °C, variação de 22,32 °C no ensaio 1, enquanto no ensaio 2, essa variação foi menor (13,88 °C) para o mesmo tempo de aplicação da radiação infravermelha (2,4 min), porém com temperatura do ar de 54°C.

Considerando-se a temperatura máxima dos grãos, ou seja, a média dos picos das curvas pontilhadas da Figura 21 para cada ensaio de secagem, observa-se que a variação entre a temperatura do ar de secagem e a máxima alcançada pelos grãos foi entre 54,66 °C (ensaio 2) e 90,60 °C (ensaio 3). As maiores variações entre essas temperaturas foram observadas quando da utilização de maiores tempos de aplicação da radiação infravermelha associados a uma menor temperatura do ar de secagem (ensaios 3, 5 e 8), como também ocorreu nos casos anteriores.

Os resultados da análise estatística aplicada aos dados experimentais de temperatura do ar dentro do secador, temperatura no interior dos grãos e temperatura máxima dos grãos foram determinados através do erro residual. A Tabela 25 apresenta os efeitos lineares, quadráticos e de interação entre os parâmetros. Os valores em negrito indicam que o fator ou a interação é significativo para um nível de confiança de 95% ($p \leq 0,05$).

Os efeitos lineares das variáveis independentes e o efeito quadrático do tempo de aplicação da radiação infravermelha foram significativos para a resposta temperatura do ar dentro do secador ($p \leq 0,05$). Considerando-se também que os efeitos foram positivos, pode-se afirmar que o aumento da temperatura do ar de secagem e do tempo de aplicação da radiação infravermelha acarretou aumento da temperatura do ar dentro do secador.

Tabela 25. Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) das variáveis dependentes: temperatura do ar no interior da câmara de secagem, temperatura no interior dos grãos e temperatura máxima no interior dos grãos.

Variáveis	Temperatura do ar dentro do secador			Temperatura dos grãos			Temperatura máxima dos grãos		
	Efeito	Erro padrão	p	Efeito	Erro padrão	p	Efeito	Erro padrão	p
Média	50,487	0,483	0,000	67,292	1,284	0,000	117,204	3,001	0,000
T(L)	13,364	0,592	0,000	9,997	1,573	0,001	6,931	3,675	0,118
T(Q)	1,347	0,704	0,114	-0,858	1,872	0,666	-2,795	4,374	0,551
t(L)	4,559	0,592	0,001	8,965	1,573	0,002	21,239	3,675	0,002
t(Q)	2,242	0,704	0,024	0,700	1,872	0,724	-4,580	4,374	0,343
T(L) x t(L)	-0,629	0,837	0,486	-2,095	2,224	0,390	-8,658	5,198	0,157

Em relação à temperatura no interior dos grãos, os termos lineares dos fatores apresentaram efeitos significativos sobre a mesma (95% de confiança). Esses efeitos foram positivos, ou seja, a temperatura no interior dos grãos foi aumentada proporcionalmente à elevação desses fatores.

No caso da resposta temperatura máxima dos grãos, apenas o termo tempo de aplicação da radiação infravermelha linear foi significativo (95% de confiança) e também apresentou efeito positivo. Dessa forma, a temperatura máxima alcançada no interior dos grãos de *Moringa oleifera* L. durante os ensaios de secagem foi influenciada significativamente pelo tempo de aplicação da radiação infravermelha e quanto maior o nível desse fator, maior também foi o valor da resposta.

Após a incorporação dos termos não significativos aos resíduos, realizou-se análise de variância (ANOVA) e aplicou-se o Teste F para verificar a significância da regressão e gerar os modelos preditivos das respostas estudadas (Tabela 26).

Pela Tabela 26 é possível perceber que todas as respostas apresentaram regressão significativa ($F_{cal} > F_{tab}$) e em nenhuma delas houve evidência de falta de ajuste ($F_{cal} < F_{tab}$). Dessa forma, pode-se afirmar que os modelos são válidos. Em relação ao coeficiente de determinação (R^2), observa-se que os modelos das respostas temperatura do ar dentro do secador e temperatura dentro dos grãos explicaram mais de 90% da variação dos dados, sendo assim, preditivos do processo. No entanto, o modelo da temperatura máxima no interior dos

grãos apresentou R^2 de apenas 72,69%, sendo considerado insatisfatório para explicar os dados experimentais.

Tabela 26. Análise de variância (ANOVA) para as respostas temperatura do ar no interior da câmara de secagem, temperatura no interior dos grãos e temperatura máxima no interior dos grãos.

	Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	F_{tab}	R^2 (%)
Temperatura do ar dentro do secador	Regressão	404,03	3	134,68	146,04	4,35	98,43
	Resíduos	6,46	7	0,92			
	Falta de ajuste	5,00	5	1,00	1,38	19,30	
	Erro puro	1,45	2	0,73			
	Total	410,48	10				
Temperatura do grão	Regressão	360,63	2	180,32	45,70	4,46	91,95
	Resíduos	31,56	8	3,95			
	Falta de ajuste	11,64	6	1,94	0,19	19,33	
	Erro puro	19,93	2	9,96			
	Total	392,20	10				
Temperatura máxima grão	Regressão	902,18	1	902,18	23,95	5,12	72,69
	Resíduos	338,98	9	37,66			
	Falta de ajuste	218,58	7	31,23	0,52	19,35	
	Erro puro	120,40	2	60,20			
	Total	1241,16	10				

Os modelos codificados, as superfícies de respostas e as curvas de contorno propostas para representar a temperatura do ar dentro do secador e a temperatura no interior dos grãos durante secagem de *Moringa oleifera* L., para as condições estudadas, são apresentados nas Equações 20 e 21 e Figura 22.

$$\text{Temperatura do ar dentro do secador } (^{\circ}\text{C}) = 51,12 + 6,68T + 2,28t + 0,92t^2 \quad (20)$$

$$\text{Temperatura no interior dos grão } (^{\circ}\text{C}) = 67,23 + 4,50T + 4,48t \quad (21)$$

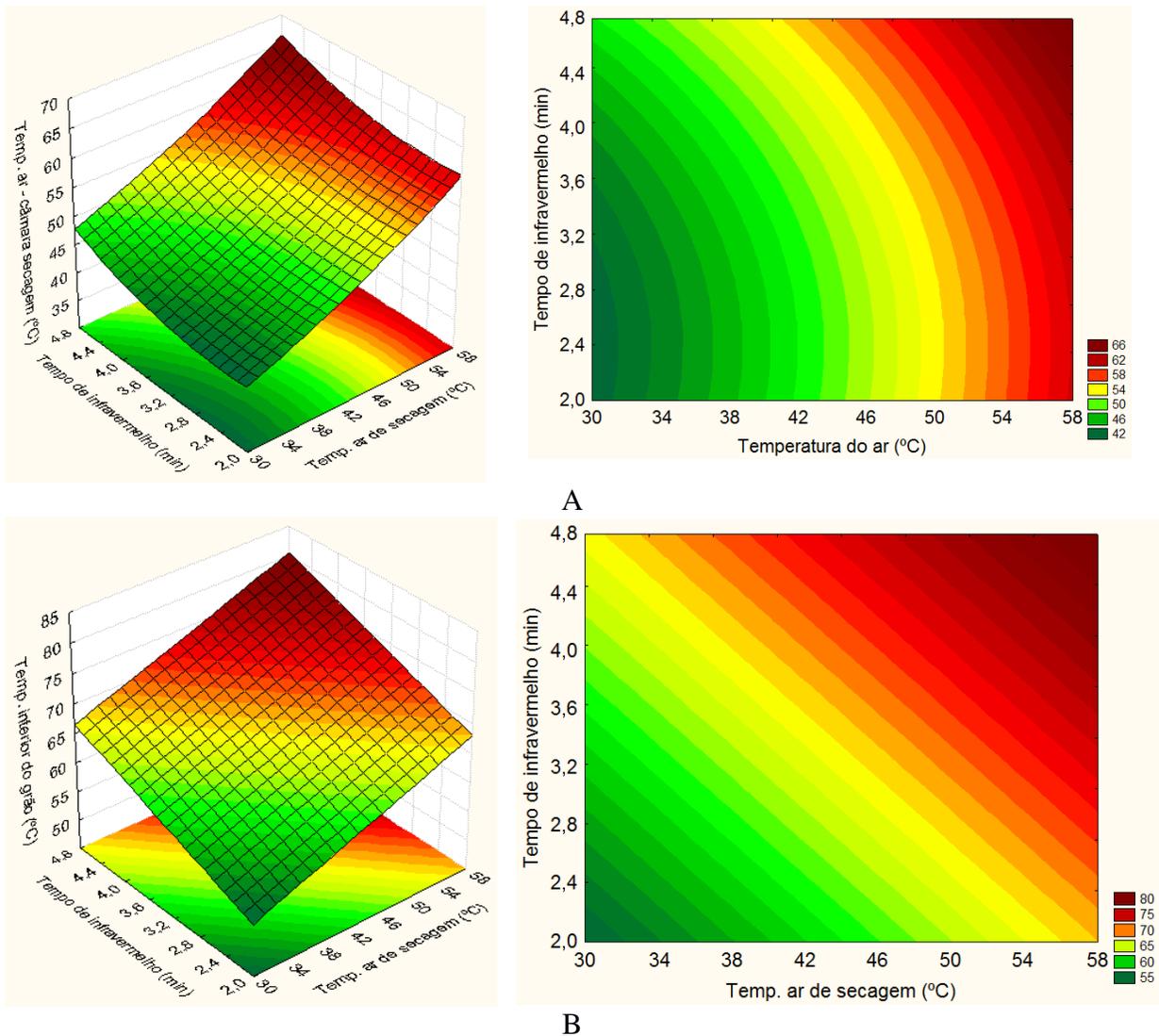


Figura 22. Superfícies de resposta e curvas de contorno das variáveis: temperatura do ar na câmara de secagem (A) e temperatura no interior do grão (B) durante os ensaios de secagem de *Moringa olefeira* L.

4.3.2.2 Consumo de energia

Na Tabela 27 estão apresentados os resultados da medição do consumo de energia de cada componente do secador separadamente, da energia total e da energia específica dos ensaios de secagem. Os componentes do secador que demandaram energia elétrica foram: ventilador, resistências elétricas e resistências radiantes de infravermelho. A energia total foi quantificada pela soma do consumo requerido pelos componentes do secador em cada ensaio de secagem. A energia específica foi calculada considerando o quanto de energia elétrica foi

requerido para a remoção de 1 kg de água nos diferentes tratamentos utilizados nas secagens de grãos de *Moringa oleifera* L.

Tabela 27. Variáveis independentes: temperatura do ar de secagem (T) e tempo de aplicação da radiação infravermelha (t) e variáveis dependentes: consumo de energia do ventilador (E_V), resistências elétricas (E_R), resistências de infravermelho (E_I), energia total (E_T) e energia específica (E_E) dos ensaios de secagem de grãos de *Moringa oleifera* L.

Ensaio	Variáveis independentes		Variáveis dependentes				
	T (°C)	t (min)	E_V (kWh)	E_R (kWh)	E_I (kWh)	E_T (kWh)	E_E (kWh)
1	-1 (34)	-1 (2,4)	0,200	3,24	1,49	4,93	1859
2	1 (54)	-1 (2,4)	0,106	4,49	0,68	5,28	2057
3	-1 (34)	1 (4,4)	0,076	1,41	1,07	2,55	1012
4	1 (54)	1 (4,4)	0,049	2,00	0,65	2,70	1056
5	-1,41 (30)	0 (3,4)	0,143	1,77	1,56	3,48	1323
6	1,41 (58)	0 (3,4)	0,053	2,54	0,48	3,07	1178
7	0 (44)	-1,41 (2,0)	0,124	3,63	0,78	4,54	1855
8	0 (44)	1,41 (4,8)	0,046	1,41	0,74	2,19	861
9	0 (44)	0 (3,4)	0,079	2,30	0,74	3,12	1212
10	0 (44)	0 (3,4)	0,073	2,21	0,74	3,02	1094
11	0 (44)	0 (3,4)	0,074	2,48	0,74	3,30	1286

A Figura 23 representa graficamente o consumo energético do ventilador, das resistências de infravermelho e das resistências elétricas em cada ensaio de secagem.

Percebe-se que os ensaios 2, 1 e 7 foram os que consumiram maior quantidade de energia total, 5,28 kWh, 4,93 kWh e 4,54 kWh, respectivamente. No caso dos ensaios 2 e 7, isso provavelmente ocorreu devido aos níveis elevados da temperatura do ar utilizados. No ensaio 1, o baixo nível da temperatura do ar de secagem e o curto tempo de aplicação da radiação infravermelha provocaram aumento do tempo de secagem (2 horas), o que, por sua vez, aumentou o consumo de energia do processo. Destaca-se que o ensaio 8 apresentou o menor consumo energético total (2,19 kWh) (Tabela 27).

As resistências elétricas tiveram a maior contribuição no consumo energético, sendo responsáveis por, no mínimo 50% (ensaio 5) e no máximo 85% (ensaio 2) do consumo de energia total dos ensaios de secagem. Isso provavelmente ocorreu devido à potência das

resistências elétricas (6 kW) e ao tempo em que elas ficaram acionadas para aquecimento do ar, o qual não pôde ser mensurado, uma vez que foi realizado por controlador *on/off*.

Os emissores da radiação infravermelha, em nível intermediário, apresentaram consumo energético variando entre 0,48 kWh (ensaio 6) e 1,56 kWh (ensaio 5). Considerando a porcentagem do consumo relativa às resistências de infravermelho em cada ensaio, sua contribuição variou de 12,88% (ensaio 2) a 44,83% (ensaio 5). Observa-se, então, mesmo sendo alta a potência dos emissores de radiação infravermelha (4,5 kW), o curto período de acionamento dos mesmos provocou menor consumo de energia que as resistências elétricas. Ressalta-se que no ensaio 5 ocorreram tanto a menor porcentagem de consumo das resistências elétricas quanto o maior gasto de energia com radiação infravermelha, enquanto no ensaio 2 ocorreu o contrário. Isso ocorreu em razão aos níveis dos fatores, temperatura do ar e tempo de aplicação da radiação infravermelha, utilizados nesses ensaios.

O ventilador foi o componente do sistema de secagem que demandou menor consumo de energia em todos os ensaios (Figura 23). Isso porque, utilizou-se baixa intensidade da velocidade do ar ($0,93 \text{ m s}^{-1}$), o que demandou baixa potência do ventilador (aproximadamente 0,086 kW), assim, mesmo permanecendo acionado durante todo o ensaio de secagem, provocou menor consumo de energia. A participação do ventilador em relação ao consumo total de cada ensaio em particular variou entre 1,73% (0,053 kWh) no ensaio 6 e 4,11% no ensaio 5 (0,143 kWh).

O ensaio 8, realizado sob temperatura do ar de 44 °C e 4,8 minutos de aplicação da radiação infravermelha, apresentou o menor consumo de energia e a menor energia específica dentre os tratamentos estudados. Do total energético de 2,19 kWh, 64,38% foi gasto com resistências elétricas, 33,79% com radiação infravermelha e 2,10% com ventilador. Dessa forma, pode-se afirmar que dentre as condições de secagem estudadas, o ensaio 8 foi energeticamente mais eficiente na secagem de grãos de *Moringa oleifera* L, indicando que a combinação dos maiores nível da temperatura do ar e do tempo de aplicação da radiação infravermelha proporcionaram redução do tempo de secagem e, conseqüentemente, do consumo de energia.

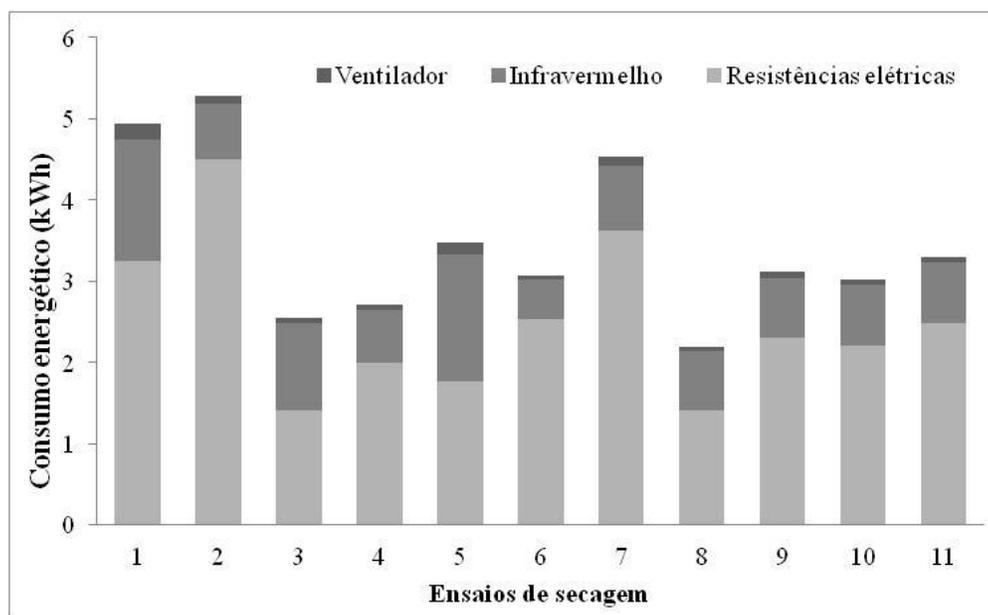


Figura 23. Consumo de energia do ventilador, resistências radiantes de infravermelho e resistências elétricas, relativo aos ensaios de secagem de grãos de *Moringa oleifera* L.

Tabela 28. Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) das variáveis dependentes: consumo de energia total e energia específica.

Variáveis	Energia total (kWh)			Energia específica (kWh/kg)		
	Efeito	Erro padrão	p	Efeito	Erro padrão	p
Média	3,145	0,274	0,000	1197,178	97,154	0,000
T(L)	-0,017	0,335	0,961	9,297	118,989	0,941
T(Q)	0,403	0,399	0,359	149,216	141,625	0,340
t(L)	-2,070	0,335	0,002	-813,378	118,989	0,001
t(Q)	0,493	0,399	0,272	256,779	141,625	0,130
T(L) x t(L)	-0,100	0,474	0,842	-76,596	168,276	0,668

A Tabela 28 apresenta os efeitos lineares, quadráticos e de interação que foram significativos (em negrito) com nível de confiança de 95% ($p \leq 0,05$), obtidos da análise estatística aplicada aos dados experimentais: energia total e energia específica.

O termo linear do tempo de aplicação da radiação infravermelha foi significativo tanto em relação à energia total quanto à energia específica, sendo que o efeito desse fator foi negativo sobre as respostas. Isso indica que existe uma relação em que o aumento do tempo de

aplicação da radiação infravermelha na secagem de grãos de *Moringa oleifera* L. proporciona redução do consumo de energia total e específica.

Depois de incorporar os termos não significativos aos resíduos, realizou-se análise de variância (ANOVA) e aplicou-se o Teste F para avaliar se a regressão é significativa e gerar os modelos (Tabela 29).

Pela Tabela 29, verifica-se que o valor de F calculado foi maior que o tabelado ($F_{cal} > F_{tab}$), tanto para a energia total quanto para a específica. Dessa forma, pode-se inferir que as regressões são significativas. Para as duas respostas não existem evidências de falta de ajuste dos modelos ($F_{cal} < F_{tab}$). Os coeficientes de determinação (R^2) obtidos para os modelos explicaram mais de 84% da variação dos dados experimentais, sendo considerados favoráveis. Assim, os modelos e as superfícies de respostas propostos para representar o consumo de energia total e específica na secagem de grãos de *Moringa oleifera* L. estão apresentados nas equações codificadas 22, 23 e na Figura 24.

Tabela 29. Análise de variância (ANOVA) para as respostas energia total e energia específica.

	Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	F_{tab}	R^2 (%)
Energia total	Regressão	8,57	1	8,57	48,77	5,12	84,42
	Resíduos	1,58	9	0,18			
	Falta de ajuste	1,54	7	0,22	11,30	19,35	
	Erro puro	0,039	2	0,019			
	Total	10,15	10				
Energia específica	Regressão	1323168,50	1	1323168,50	47,81	5,12	84,16
	Resíduos	249101,78	9	27677,98			
	Falta de ajuste	230467	7	32924	3,53	19,35	
	Erro puro	18635	2	9317			
	Total	1572270	10				

$$Energia\ total\ (kWh) = 3,47 - 1,04t \quad (22)$$

$$Energia\ específica\ \left(\frac{kWh}{kg}\right) = 1344,81 - 406,69t \quad (23)$$

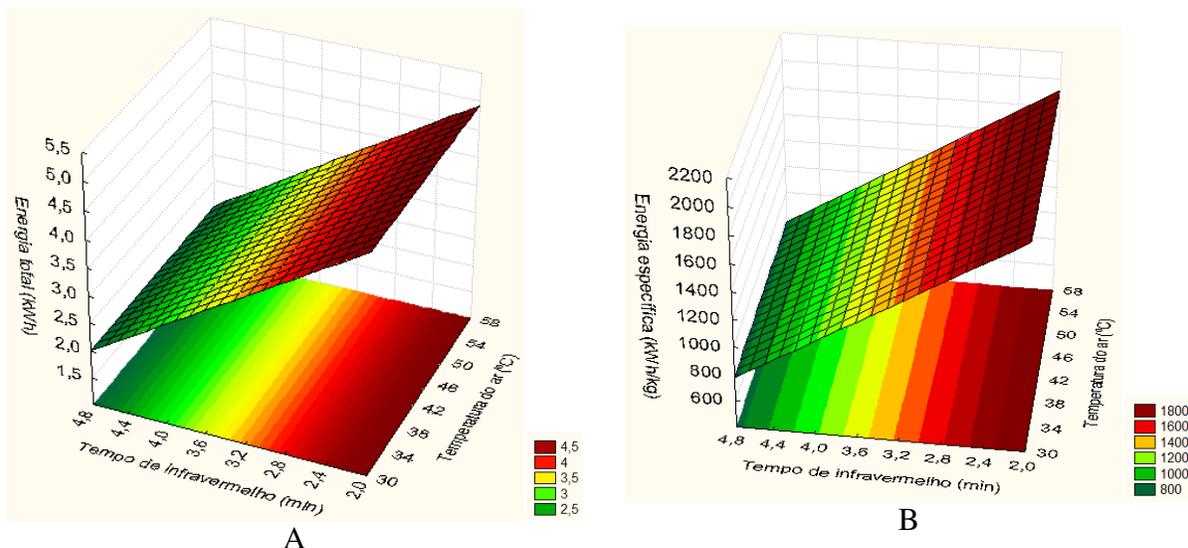


Figura 24. Superfícies de resposta da energia total (A) e da energia específica (B), obtidos da secagem de grãos de *Moringa oleifera* L.

Da mesma forma como observado por Oliveira (2009) em estudo relacionado à secagem de yacon, verificou-se que a aplicação da radiação infravermelha reduziu consideravelmente o consumo total de energia durante as secagens. Percebeu-se também que a elevação do nível de temperatura do ar provocou proporcional aumento do consumo de energia, pois demandou maior período de acionamento das resistências elétricas. Dessa forma, a associação da radiação infravermelha ao método convectivo de secagem permitiu redução do tempo total de secagem e, conseqüentemente, do consumo de energia.

4.3.2.3 Avaliação da secagem e da qualidade dos grãos de *Moringa oleifera* L.

Os dados obtidos para teor de água, atividade de água, tempo de secagem e taxa de secagem para os ensaios realizados estão apresentados na Tabela 30.

O teor de água inicial dos grãos de *Moringa oleifera* L. era de 9,40% (b.u.). Ao final dos ensaios de secagem essa propriedade variou entre 4,39% e 4,76% (b.u.) (Tabela 30). Estatisticamente não houve diferença significativa entre os ensaios (Tabela 31), o que era desejado, uma vez que o objetivo era realizar as operações de secagem até alcançar teor de água de 4,5% (b.u.).

Tabela 30. Planejamento experimental dos ensaios e as respostas obtidas: teor de água, atividade de água, tempo de secagem e taxa de secagem.

Ensaio	Variáveis independentes		Variáveis dependentes			
	T (°C)	t (min)	Teor de água (% b.u.)	Atividade de água (decimal)	Tempo de secagem (h)	Taxa de secagem (kg kg ⁻¹ min ⁻¹)
1	-1 (34)	-1 (2,4)	4,40	0,36	2,00	0,70x10 ⁻⁰³
2	1 (54)	-1 (2,4)	4,55	0,29	1,00	1,14x10 ⁻⁰³
3	-1 (34)	1 (4,4)	4,65	0,37	0,75	1,63x10 ⁻⁰³
4	1 (54)	1 (4,4)	4,54	0,33	0,50	2,05x10 ⁻⁰³
5	-1,41 (30)	0 (3,4)	4,39	0,28	1,50	0,97x10 ⁻⁰³
6	1,41 (58)	0 (3,4)	4,41	0,30	0,50	1,97x10 ⁻⁰³
7	0 (44)	-1,41 (2,0)	4,76	0,30	1,25	1,01x10 ⁻⁰³
8	0 (44)	1,41 (4,8)	4,57	0,32	0,50	1,77x10 ⁻⁰³
9	0 (44)	0 (3,4)	4,53	0,31	0,75	1,54x10 ⁻⁰³
10	0 (44)	0 (3,4)	4,47	0,36	0,75	1,55x10 ⁻⁰³
11	0 (44)	0 (3,4)	4,54	0,31	0,75	1,66x10 ⁻⁰³

A atividade de água dos grãos de *Moringa oleifera* L. ao final dos ensaios de secagem variou entre 0,28 e 0,37 (Tabela 30). Da mesma forma que ocorreu com o teor de água, a atividade de água também não apresentou diferença significativa entre os ensaios (Tabela 31). Isso porque essas duas propriedades dos grãos estão correlacionadas, o teor de água representando a massa de água presente no material em relação à massa total (base úmida), enquanto a atividade de água corresponde ao teor de água de equilíbrio do material para uma dada condição psicrométrica (temperatura, umidade relativa e pressão de vapor do ar) (PARK *et al.*, 2013).

Tabela 31. Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) das variáveis dependentes: teor de água e atividade de água (95% de confiança).

Variáveis	Teor de água (% b.u.)			Atividade de água		
	Efeito	Erro padrão	p	Efeito	Erro padrão	p
Média	4,510	0,048	0,000	0,327	0,021	0,000
T(L)	0,014	0,058	0,820	-0,020	0,025	0,466
T(Q)	-0,108	0,070	0,183	-0,016	0,030	0,621
t(L)	-0,004	0,058	0,947	0,016	0,025	0,565
t(Q)	0,156	0,070	0,075	0,003	0,030	0,937
T(L) x t(L)	-0,124	0,083	0,193	0,018	0,036	0,630

Os menores tempos de secagem (0,5 horas) foram observados nos ensaios 4, 6 e 8, nos quais a temperatura de secagem e o tempo de aplicação da radiação infravermelha foram: 55 °C e 4,4 min; 58 °C e 3,4 min; 44 °C e 4,8 min, respectivamente. Verifica-se que esses ensaios apresentam os níveis mais elevados de temperatura do ar e tempo de aplicação da radiação infravermelha, explicando assim, o porquê dos mesmos terem ocorrido mais rapidamente que os demais. Ao contrário, o ensaio 1, com temperatura do ar de 34° C e tempo de aplicação da radiação infravermelha de 2,4 min corresponde à combinação dos menores níveis desses fatores e que, portanto, demandou maior tempo de secagem (2 horas) para alcançar o teor de água desejado (Tabela 30).

Tabela 32. Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) das variáveis dependentes: tempo de secagem e taxa de secagem.

Variáveis	Tempo de secagem (h)			Taxa de secagem (kg kg ⁻¹ min ⁻¹)		
	Efeito	Erro padrão	p	Efeito	Erro padrão	p
Média	0,750	0,079	0,000	1,58x10⁻⁰³	9,20x10⁻⁰⁵	0,000
T(L)	-0,666	0,097	0,001	5,68x10⁻⁰⁴	1,13x10⁻⁰⁴	0,004
T(Q)	0,313	0,115	0,042	-1,38x10 ⁻⁰⁴	1,34x10 ⁻⁰⁴	0,350
t(L)	-0,703	0,097	0,001	7,27x10⁻⁰⁴	1,13x10⁻⁰⁴	0,001
t(Q)	0,188	0,115	0,165	-2,22x10 ⁻⁰⁴	1,34x10 ⁻⁰⁴	0,159
T(L) x t(L)	0,375	0,137	0,041	-7,57x10 ⁻⁰⁶	1,59x10 ⁻⁰⁴	0,964

A partir da Tabela 32 é possível observar que tanto a temperatura do ar, quanto o tempo de aplicação da radiação infravermelha, apresentaram efeitos significativos (95% de confiança) sobre o tempo de secagem dos grãos de *Moringa oleifera* L. Ainda pela Tabela 32, verifica-se que os efeitos lineares desses fatores exerceram influência negativa sobre o tempo de secagem. Dessa forma, a elevação da temperatura do ar e do tempo de aplicação da radiação infravermelha influenciaram na redução do tempo de secagem. Nowak e Lewicki (2004) compararam a secagem de fatias de maçã utilizando radiação infravermelha com a secagem convectiva, realizadas sob condições equivalentes. Constataram que o tempo de processo pôde ser reduzido até 50% quando o aquecimento foi realizado com a energia da radiação infravermelha.

A interação entre os fatores e o termo quadrático da temperatura do ar também foram significativos sobre a resposta tempo de secagem, mas nesse caso, o efeito foi positivo e com

ordem de grandeza menor que os efeitos lineares. O comportamento desses fatores pode ser visualizado melhor pela superfície de resposta e curva de contorno (Figura 26A). Percebe-se que o aumento da temperatura do ar até a região do ponto central tende a reduzir o tempo de secagem, mas a partir de então provoca elevação dessa resposta. Assim, a combinação que confere menor tempo de secagem corresponde à condição +1,41 (maior nível: 4,8 min) do tempo de aplicação da radiação infravermelha e a condição central (nível zero: 44 °C) da temperatura do ar de secagem. O efeito positivo da interação entre os fatores pode ser observado, por exemplo, devido à condição +1,41 de ambos os fatores não apresentar o menor tempo de secagem.

O comportamento da taxa de secagem em função do tempo de secagem de alguns ensaios pode ser observado pelas curvas da Figura 25, onde se pode verificar que a taxa de secagem decresce ao longo do tempo.

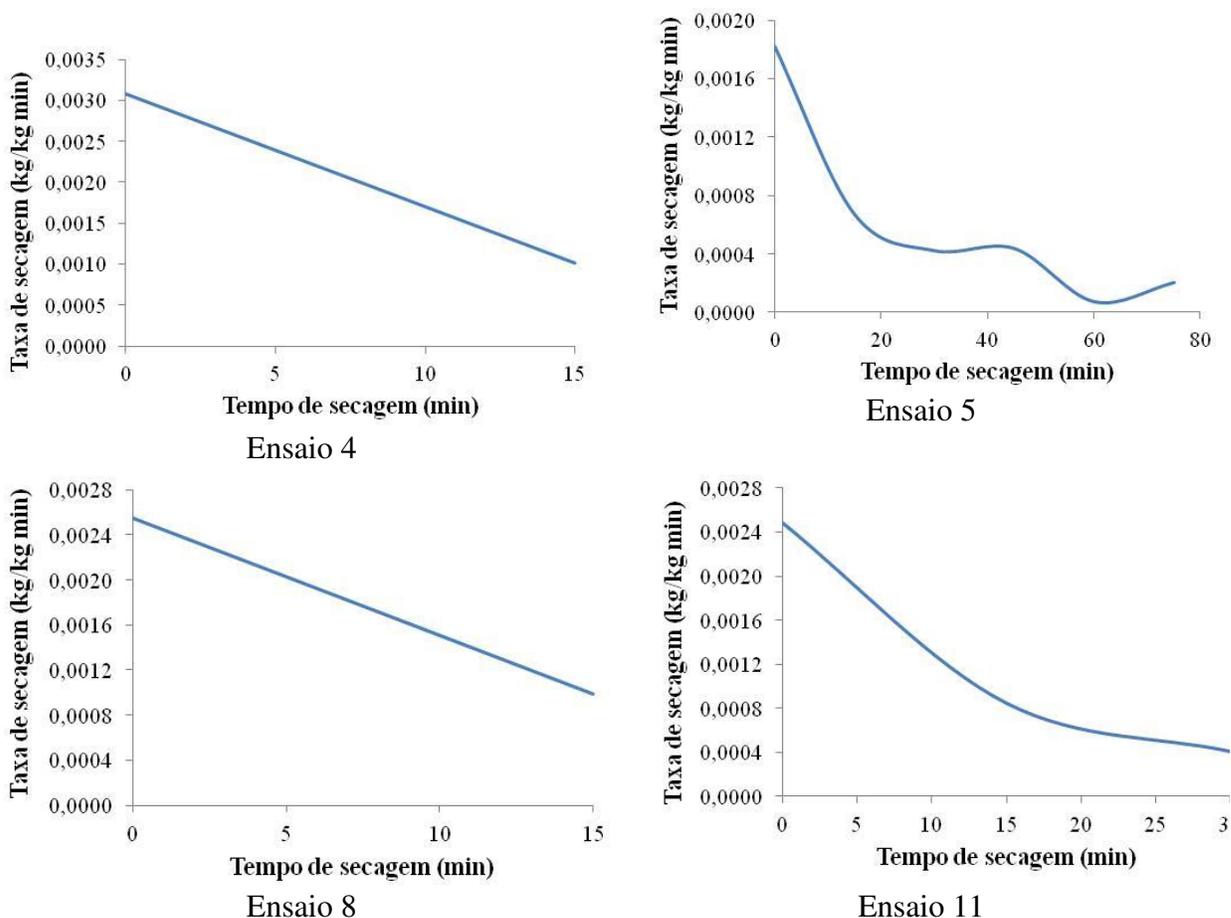


Figura 25. Curvas da taxa de secagem (dX/dt) dos grãos de *Moringa oleifera* L. relativas aos ensaios 4, 5, 8 e 11 – Delineamento composto central rotacional.

A secagem que apresentou maior taxa foi obtida pelo ensaio 4 ($2,05 \times 10^{-03} \text{ kg kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$), o qual foi realizado com níveis elevados dos fatores: temperatura do ar $54 \text{ }^\circ\text{C}$ e tempo de aplicação da radiação infravermelha $4,4 \text{ min}$. Em contrapartida, a menor taxa de secagem foi observada no ensaio 1, realizado sob os menores níveis de temperatura do ar ($30 \text{ }^\circ\text{C}$) e de tempo de aplicação da radiação infravermelha ($2,4 \text{ min}$) (Tabela 30).

A partir da Tabela 32, pode-se observar que os termos lineares dos fatores estudados foram significativos e apresentaram efeito positivo sobre a taxa de secagem, demonstrando que ao elevar os níveis da temperatura do ar e do tempo de aplicação da radiação infravermelha, aumentou-se da taxa de secagem de grãos de *Moringa oleifera* L.

Aplicou-se o teste F (ANOVA) às respostas taxa de secagem e tempo de secagem para checar a significância estatística dos modelos. Observa-se que o F_{cal} da regressão em relação aos resíduos, para ambas as respostas, foi superior ao F_{tab} , indicando que os modelos são válidos. Os coeficientes de determinação (R^2), tanto da taxa, quanto do tempo de secagem, são considerados bons, uma vez que explicaram $89,26\%$ e $93,65\%$ dos dados, respectivamente (Tabela 33).

Tabela 33. Análise de variância (ANOVA) para as respostas taxa de secagem e tempo de secagem.

	Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	F_{tab}	R^2 (%)
Taxa de secagem	Regressão	$1,70 \times 10^{-06}$	2	$8,52 \times 10^{-07}$	33,24	4,46	89,26
	Resíduos	$2,05 \times 10^{-07}$	8	$2,56 \times 10^{-08}$			
	Falta de ajuste	$1,96 \times 10^{-07}$	6	$3,26 \times 10^{-08}$	7,21	19,33	
	Erro puro	$9,06 \times 10^{-09}$	2	$4,53 \times 10^{-09}$			
	Total	$1,91 \times 10^{-06}$	10				
Tempo de secagem	Regressão	2,1177	4	0,5294	22,11	4,53	93,65
	Resíduos	0,1437	6	0,0239			
	Falta de ajuste	0,1437	4	0,0359			
	Erro puro	0,0000	2	0,0000			
	Total	2,2614	10				

Considerando os parâmetros do modelo que são significativos e preditivos do processo, obtiveram-se os modelos codificados, as superfícies de respostas e as curvas de contorno para o tempo de secagem e taxa de secagem (Equação 24 e 25; Figura 26).

$$\text{Tempo de secagem (h)} = 0,838 - 0,333T + 0,129T^2 - 0,351t + 0,188Tt \quad (24)$$

$$\text{Taxa de secagem} \left(\frac{kg_{H_2O}}{kg_{MS} \cdot \text{min}} \right) = 1,45 \times 10^{-3} + 2,84 \times 10^{-4}T + 3,64 \times 10^{-4}t \quad (25)$$

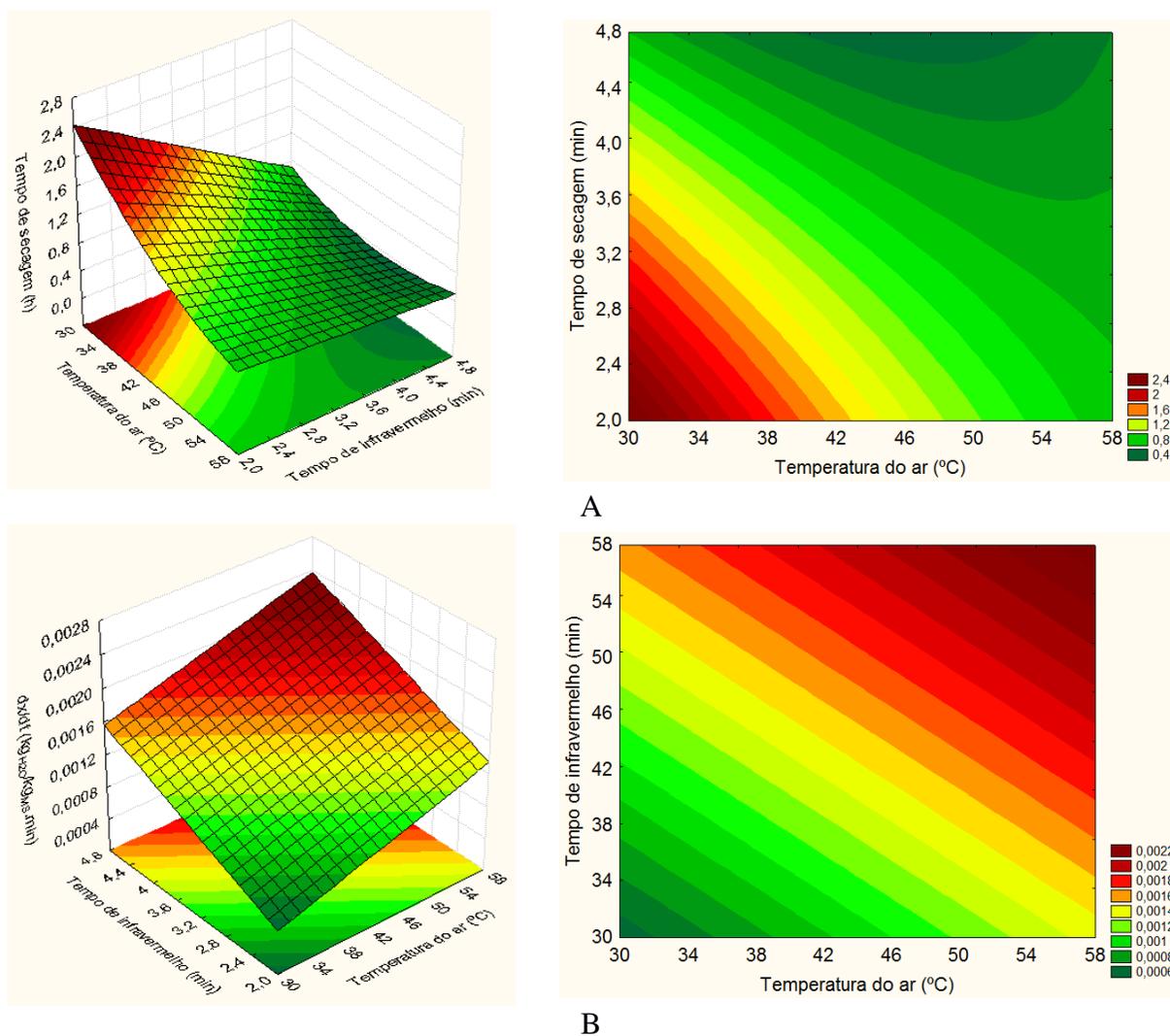


Figura 26. Superfícies de resposta e curvas de contorno das variáveis: tempo de secagem (A) e taxa de secagem (B) de grãos de *Moringa oleifera* L.

4.3.2.4 Efeito dos tratamentos de secagem na qualidade dos grãos de *Moringa oleifera* L. utilizados no tratamento de águas

Depois das operações de secagem, os grãos foram utilizados no preparo de solução coagulante para tratamento de água bruta sintética (turbidez inicial 60 NTU) de acordo com método descrito no item 3.11.3. Avaliou-se a turbidez da água após o período de coagulação/floculação e nos tempos 10, 20, 30, 45 e 60 minutos de sedimentação. Os dados da turbidez após 60 minutos de sedimentação estão apresentados na Tabela 34. Avaliou-se também o pH inicial da água bruta sintética nos tempos 0 e 60 minutos de sedimentação.

Com os dados de turbidez obtidos durante o período de sedimentação foi possível, a partir da Equação 19, calcular a constante de redução da turbidez (k_c) para cada ensaio de secagem (Tabela 34). Avaliou-se também a cinética de redução da turbidez dos dados experimentais e considerando os valores de k_c (Apêndices C e D; Figura 27).

Os grãos obtidos dos tratamentos de secagem foram submetidos às análises do teor de proteína e índice de peróxidos, conforme métodos descritos nos itens 3.10.3 e 3.10.4, respectivamente. Os dados obtidos encontram-se na Tabela 34.

Tabela 34. Planejamento experimental dos ensaios de secagem e respostas das análises de qualidade dos grãos destinados ao tratamento de água: turbidez remanescente, pH, k_c , teor de proteína e índice de peróxidos.

Ensaio	Variáveis independentes		Variáveis dependentes				
	T (°C)	t (min)	Teor de proteína (%)	Turbidez remanescente (NTU)	Índice de peróxidos (meq/kg)	k_c (1/tempo)	pH
1	-1 (34)	-1 (2,4)	34,93	5,76	0,012	0,179	8,47
2	1 (54)	-1 (2,4)	36,33	1,91	0,021	0,248	8,86
3	-1 (34)	1 (4,4)	35,80	1,36	0,015	0,265	8,49
4	1 (54)	1 (4,4)	37,06	1,51	0,024	0,249	8,23
5	-1,41 (30)	0 (3,4)	35,65	5,20	0,009	0,175	8,65
6	1,41 (58)	0 (3,4)	36,62	1,45	0,052	0,244	8,68
7	0 (44)	-1,41 (2,0)	36,85	2,49	0,009	0,243	8,25
8	0 (44)	1,41 (4,8)	36,19	1,49	0,013	0,256	8,48
9	0 (44)	0 (3,4)	37,93	1,55	0,009	0,259	8,22
10	0 (44)	0 (3,4)	37,19	1,50	0,009	0,267	8,48
11	0 (44)	0 (3,4)	37,66	1,54	0,009	0,262	8,79

Os resultados da análise estatística aplicada aos dados experimentais de teor de proteína, turbidez, índice de peróxidos, constante de redução da turbidez (k_c) e pH foram determinados através do erro residual e estão apresentados nas Tabelas 35 e 36. Os efeitos significativos (95% de confiança) dos fatores lineares, quadráticos e da interação estão em negrito ($p \leq 0,05$).

Tabela 35. Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) das variáveis dependentes: teor de proteína, turbidez e índice de peróxidos.

Variáveis	Teor de proteína			Turbidez			Índice de peróxidos		
	Efeito	Erro padrão	p	Efeito	Erro padrão	p	Efeito	Erro padrão	p
Média	37,591	0,314	0,000	1,531	0,341	0,006	0,009	0,004	0,065
T(L)	1,008	0,384	0,047	-2,247	0,418	0,003	0,020	0,005	0,010
T(Q)	-1,603	0,457	0,017	1,780	0,497	0,016	0,020	0,006	0,019
t(L)	0,165	0,384	0,686	-1,554	0,418	0,014	0,003	0,005	0,622
t(Q)	-1,222	0,457	0,044	0,447	0,497	0,410	0,000	0,006	0,964
T(L) x t(L)	-0,075	0,543	0,896	1,998	0,591	0,020	0,000	0,007	0,970

Tabela 36. Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) das variáveis dependentes constante de redução da turbidez (k_c) e pH.

Variáveis	k_c (1/tempo)			pH		
	Efeito	Erro padrão	p	Efeito	Erro padrão	p
Média	0,263	0,008	0,000	8,498	0,133	0,000
T(L)	0,038	0,010	0,012	0,046	0,163	0,790
T(Q)	-0,050	0,012	0,007	0,167	0,195	0,429
t(L)	0,026	0,010	0,042	-0,074	0,163	0,672
t(Q)	-0,010	0,012	0,437	-0,134	0,195	0,520
T(L) x t(L)	-0,043	0,014	0,027	-0,322	0,231	0,223

Pela Tabela 34 observa-se que o teor de proteína dos grãos variou entre 34,93% (ensaio 1) e 37,93% (ensaio 9). Esses valores foram superiores aos encontrados por Madrona (2010), 26,72%, mas coerentes aos obtidos por Campaoré *et al.* (2011), 35,37±0,07%. Os termos linear e quadrático da temperatura do ar foram significativos sobre o teor de proteína de grãos de *Moringa oleifera* L. ($p \leq 0,05$), sendo que o termo linear apresentou efeito positivo e o termo quadrático apresentou efeito negativo. O termo quadrático do tempo de aplicação da

radiação infravermelha também foi significativo ($p \leq 0,05$) sobre o teor de proteína e seu efeito foi negativo (Tabela 35). A partir da superfície de resposta e curva de contorno do teor de proteína (Figura 28A), pode-se compreender graficamente esses efeitos. Observa-se que o aumento da temperatura do ar até certo ponto (aproximadamente 47 °C) propiciou aumento da concentração do teor de proteína, mas a partir desse ponto a elevação da temperatura do ar proporcionou redução dessa resposta. O mesmo comportamento é observado com o tempo de aplicação da radiação infravermelha. Dessa forma, pode-se afirmar que a condição de secagem mais favorável para o teor de proteína está compreendida na região do ponto central do planejamento experimental.

Em relação à turbidez de água tratada com solução de grãos de *Moringa oleifera* L., é possível verificar na Tabela 35, que os efeitos da temperatura do ar, do tempo de aplicação da radiação infravermelha e da interação entre eles foram significativos ($p \leq 0,05$) sobre essa resposta. Os termos lineares desses fatores tiveram efeito negativo sobre a turbidez remanescente, indicando que um aumento nos fatores provoca redução dessa resposta, o que é desejado em sistemas de tratamento de água. Em contrapartida, o termo quadrático da temperatura do ar de secagem e da interação entre os fatores apresentaram efeito positivo sobre a turbidez, ou seja, o aumento isolado da temperatura do ar ou do tempo de aplicação da radiação infravermelha reduz a turbidez, mas se esses dois fatores forem elevados simultaneamente provocarão efeito contrário, de aumento da turbidez.

Esse comportamento é melhor visualizado através da superfície de resposta e da curva de contorno, apresentadas na Figura 28B. Percebe-se que as regiões dessas curvas onde a combinação entre os fatores promoveu redução da turbidez foram: ponto central da temperatura do ar com os maiores níveis do tempo de aplicação da radiação infravermelha e maiores níveis da temperatura do ar com os menores tempos de aplicação da radiação infravermelha.

Ghebremichael *et al.* (2005), Arantes (2010) e Madrona (2010) afirmam que a ação clarificante de extratos de grãos de *Moringa oleifera* L. está relacionada à presença de uma proteína catiônica de alto peso molecular que desestabiliza e agrega microrganismos e partículas coloidais contidas na água, que apresentam carga superficial negativa. Então, vale lembrar que um dos objetivos dessa pesquisa foi definir as condições de secagem que

mantenham a qualidade dos grãos de *Moringa oleifera* L. para tratamento de água, o que inclui o teor de proteína desses grãos. Como foi constatado nos parágrafos anteriores, a região do ponto central do planejamento experimental apresenta a combinação entre os fatores temperatura do ar e tempo de aplicação da radiação infravermelha com maior teor de proteína e que, conseqüentemente, promoveu maior remoção da turbidez de águas.

O índice de peróxidos dos grãos obtidos dos ensaios de secagem variou entre 0,009 meq kg⁻¹ e 0,052 meq kg⁻¹ (Tabela 34). A legislação brasileira (ANVISA, 1999) permite que esse índice seja de, no máximo, 10 meq kg⁻¹ para óleos vegetais comerciais. Embora o óleo de *Moringa oleifera* L. não esteja incluído nessa legislação, se ela for tomada como referência pode-se considerar que todas as condições de secagem utilizadas nos ensaios mantiveram a qualidade do óleo dos grãos.

Avaliando-se estatisticamente os valores de índice de peróxidos obtidos nos ensaios, observa-se, pela Tabela 35, que os termos lineares e quadráticos da temperatura do ar de secagem interferiram significativamente e com efeito positivo sobre o índice de peróxidos, de forma que o aumento do fator provocou aumento da resposta. Isso indica que, mesmo sendo pequena, houve oxidação lipídica nos grãos submetidos aos tratamentos de secagem com maior temperatura do ar (ensaio 6 - 58 °C).

Silva e Matos (2008) avaliaram a remoção da turbidez de água bruta utilizando quatro diferentes dispersões de *Moringa oleifera* L., sendo amostras com ou sem tegumento e com ou sem óleo. Os autores perceberam que as amostras com óleo apresentaram turbidez residual maior em relação àquelas na quais o óleo foi removido. Dessa forma, entenderam que a extração do conteúdo oleico permite melhor sedimentação de sólidos após coagulação-floculação.

No caso desta pesquisa, não se realizou extração do óleo dos grãos de *Moringa oleifera* L., mas foi observada certa oxidação lipídica nos tratamentos de secagem com maior temperatura do ar. Pode-se observar que os ensaios com os maiores valores de índice de peróxidos (ensaios 2, 4 e 6) também apresentaram valores baixos de turbidez (1,91 NTU, 1,51 NTU e 1,45 NTU, respectivamente), indicando que a oxidação lipídica favoreceu melhor sedimentação de sólidos e, conseqüentemente, menor turbidez residual.

Considerando a constante de redução da turbidez (k_c), verifica-se que seus valores variaram entre 0,175 e 0,267 (Tabela 34). Essa variação entre os ensaios de secagem foi significativa (95% de confiança), sendo que os termos lineares da temperatura do ar e do tempo de aplicação da radiação infravermelha provocaram efeito positivo sobre k_c , enquanto que o termo quadrático da temperatura do ar e a interação entre os fatores apresentaram efeito negativo sobre a mesma resposta (Tabela 36). Dessa forma, pode-se visualizar na superfície de resposta e na curva de contorno (Figura 28D) que as condições dos fatores que conferem máxima resposta à constante de redução da turbidez correspondem às seguintes combinações: temperatura do ar de secagem a partir do ponto central com menor tempo de aplicação da radiação infravermelha e temperatura do ar intermediária com maior tempo de aplicação da radiação infravermelha.

Avaliando-se a cinética de redução da turbidez da água tratada com solução dos grãos de *Moringa oleifera* L. obtidos dos ensaios de secagem, verifica-se que houve maior sedimentação dos sólidos nos primeiros 10 min, ocorrendo posteriormente redução da turbidez em proporção cada vez menor. Esse comportamento foi observado em todos os ensaios de secagem. Tomando-se o ensaio 1 como exemplo, nos primeiros 10 min de sedimentação foram reduzidos 87% da turbidez, enquanto nos tempos 20, 30, 45 e 60 min reduziu-se 12,7%, 9,4%, 3,2% e 2,7%, respectivamente (Figura 27). Silva e Matos (2008), avaliando dispersões de *Moringa oleifera* L. para tratamento de água, observaram maior redução da turbidez nos primeiros 20 min do que após 40 min de sedimentação. A partir dessa constatação, os referidos autores afirmam que os grãos de *Moringa oleifera* L. são mais eficientes no tratamento de efluentes que apresentam maior turbidez.

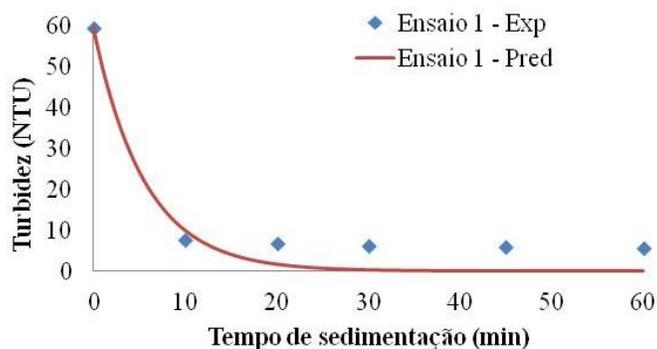


Figura 27. Cinética de redução da turbidez experimental (Exp) e predita (Pred) pela Equação 19, obtida durante o tempo de sedimentação de 60 min – Ensaio 1.

Em relação ao valor do pH da água bruta, este variou entre 7,84 e 9,09, e ao final do tratamento da água permaneceu entre 8,22 e 8,86, como mostra a Tabela 34. Esses valores estão dentro do recomendado para sistemas de distribuição de água, que de acordo com a Portaria 518/2004 deve ser na faixa de 6,0 a 9,5. Dessa forma, a utilização de grãos de *Moringa oleifera* L. para tratamento de água apresenta a vantagem de não necessitar correção do pH, diminuindo custos e simplificando o tratamento (ARANTES, 2010).

Estatisticamente não se verificou efeito significativo dos níveis dos fatores sobre o pH de água sintética tratada com solução coagulante advinda dos tratamentos de secagem (Tabela 36). Ndabigengesere e Narasiah (1998), comparando solução à base de sementes de *Moringa oleifera* L. com sulfato de alumínio, verificaram que o uso de *Moringa oleifera* L. não alterou significativamente o pH da água, sendo que este permaneceu na faixa de 7,6 para as dosagens testadas. Arantes (2010) observou pH de água tratada com solução à base de grãos de *Moringa oleifera* L. na faixa de 7,48 a 8,24.

A significância estatística dos modelos para as variáveis dependentes, turbidez, constante de redução da turbidez (k_c), teor de proteína e índice de peróxidos foi checada com o Teste F (ANOVA) e os resultados são apresentados na Tabela 37. Observa-se que o F_{cal} da regressão em relação aos resíduos, para todas as respostas, é superior ao F_{tab} , indicando que os modelos são válidos.

Os coeficientes de determinação (R^2) das respostas turbidez e constante de redução da turbidez (k_c) são considerados bons, explicando 91,94% e 89,80% dos dados, respectivamente. O teor de proteína e o índice de peróxidos explicaram, respectivamente, 80,96% e 84,64% dos dados. Dessa forma, seus coeficientes de determinação (R^2) podem ser considerados satisfatórios (Tabela 37).

Para avaliação do ajuste dos modelos aos dados experimentais o F_{cal} da falta de ajuste em relação ao erro puro deve ser menor que o F_{tab} , o que não ocorreu para a turbidez e índice de peróxidos. Ressalta-se, entretanto, que isso ocorreu devido ao erro puro tender a zero. Assim, mesmo a falta de ajuste sendo um valor pequeno o F_{cal} foi maior que o F_{tab} . No entanto, considera-se que os modelos são preditivos dos dados experimentais (Tabela 37).

Tabela 37. Análise de variância (ANOVA) para as respostas turbidez, k_c , teor de proteína e índice de peróxidos.

	Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	F _{tab}	R ² (%)
Turbidez	Regressão	23,1285	4	5,7821	17,11	4,53	91,94
	Resíduos	2,0278	6	0,3380			
	Falta de ajuste	2,0262	4	0,5066	657,55	19,25	
	Erro puro	0,0015	2	0,0008			
	Total	25,1562	10				
k_c (1/tempo)	Regressão	9,54x10 ⁻³	4	2,38 x10 ⁻³	13,20	4,53	89,80
	Resíduos	1,08x10 ⁻³	6	1,81x10 ⁻⁴			
	Falta de ajuste	1,05x10 ⁻³	4	2,62x10 ⁻⁴	14,61	19,25	
	Erro puro	3,59x10 ⁻⁵	2	1,79x10 ⁻⁵			
	Total	1,06x10 ⁻²	10				
Teor de proteína	Regressão	6,5307	3	2,1769	9,92	4,35	80,96
	Resíduos	1,5361	7	0,2194			
	Falta de ajuste	1,2561	5	0,2512	1,79	19,3	
	Erro puro	0,2800	2	0,1400			
	Total	8,0668	10				
Índice de peróxidos	Regressão	1,37x10 ⁻³	2	6,83x10 ⁻⁴	22,05	4,46	84,64
	Resíduos	2,4x10 ⁻⁴	8	3,10x10 ⁻⁵			
	Falta de ajuste	2,48x10 ⁻⁴	6	4,13x10 ⁻⁵	1350,57	19,33	
	Erro puro	6,11x10 ⁻⁸	2	3,06x10 ⁻⁸			
	Total	1,61x10 ⁻³	10				

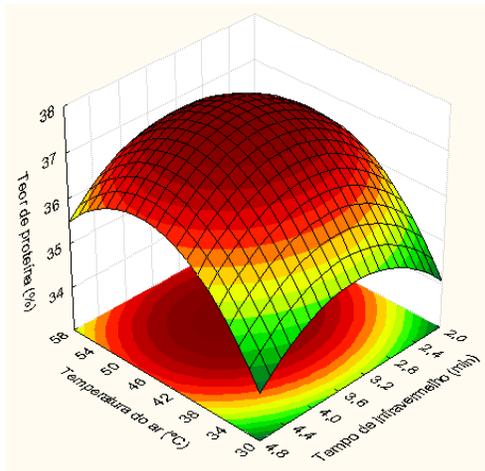
Depois de verificar os parâmetros do modelo que são significativos e preditivos do processo, obtiveram-se os modelos codificados, as superfícies de resposta e as curvas de contorno para as respostas turbidez, constante de redução da turbidez, teor de proteína e índice de peróxidos (Equação 26, 27, 28 e 29; Figura 28).

$$Turbidez = 1,741 - 1,124T + 0,824T^2 - 0,777t + 0,999Tt \quad (26)$$

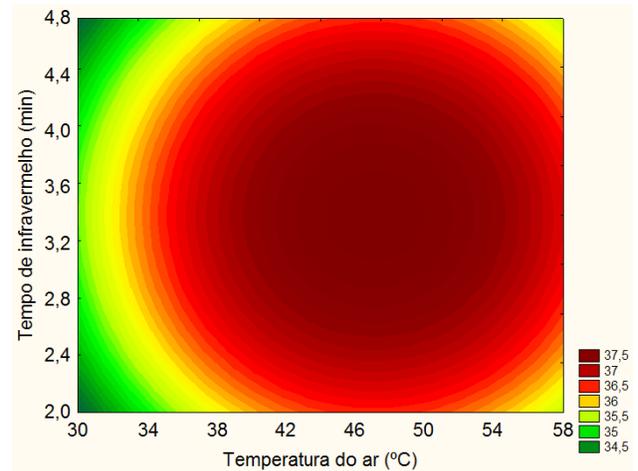
$$k_c = 0,258 + 0,019T - 0,024T^2 + 0,013t - 0,021t^2 \quad (27)$$

$$Teor\ de\ prote\ina = 37,591 + 0,504T - 0,801T^2 - 0,611t^2 \quad (28)$$

$$\acute{I}ndice\ de\ per\oxidos = 0,009 + 0,01T + 0,01T^2 \quad (29)$$

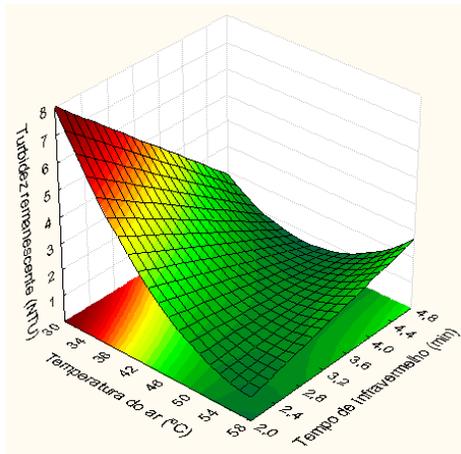


A

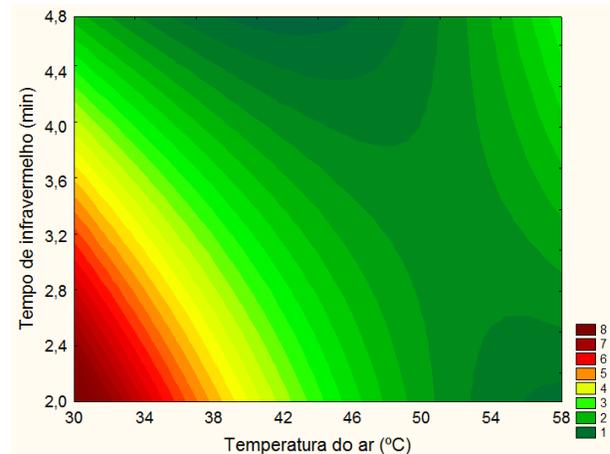


B

Figura 28. Superfície de resposta (A) e curva de contorno (B) do teor de proteína de grãos de *Moringa oleifera* L.

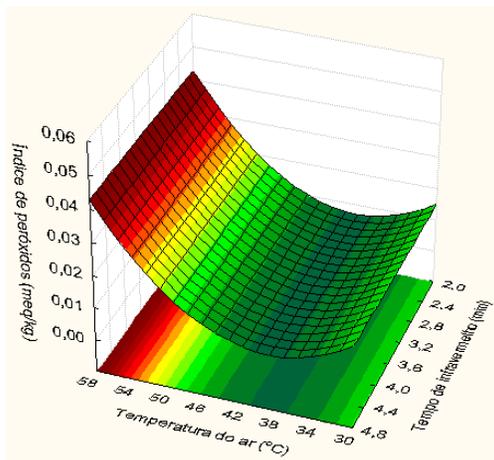


A

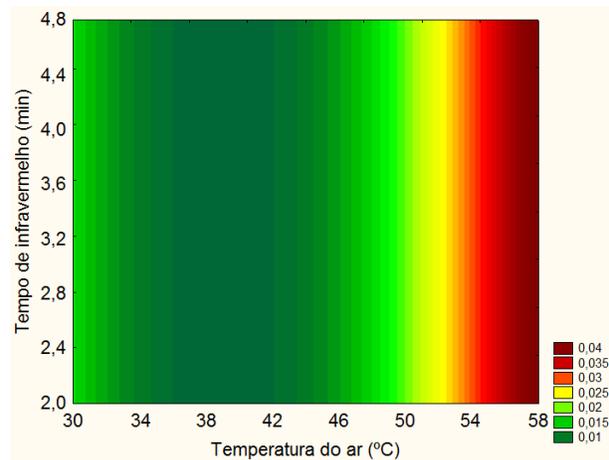


B

Figura 29. Superfície de resposta (A) e curva de contorno (B) da turbidez remanescente de água tratada com solução coagulante de grãos de *Moringa oleifera* L.

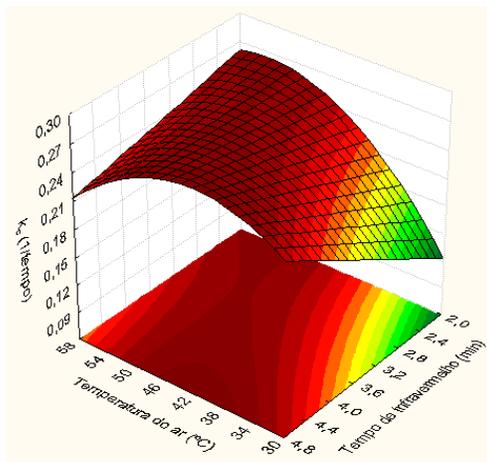


A

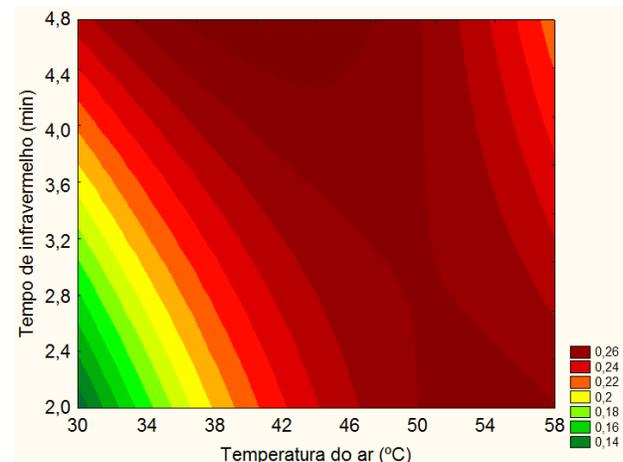


B

Figura 30. Superfície de resposta (A) e curva de contorno (B) do índice de peróxidos de grãos de *Moringa oleifera* L.



A



B

Figura 31. Superfície de resposta (A) e curva de contorno (B) da constante de redução da turbidez (k_c) de grãos de *Moringa oleifera* L.

Avaliando-se simultaneamente todos os resultados obtidos nos ensaios para definição da melhor condição de operação da secagem de grãos de *Moringa oleifera* L., verificou-se que, a utilização dos maiores níveis de temperatura do ar de secagem e tempo de aplicação da radiação infravermelha proporcionou aumento do aquecimento do ar na câmara de secagem e no interior dos grãos, o que conseqüentemente, aumentou a taxa de secagem e reduziu o tempo do processo. Pelo lado da economia de energia a melhor condição de secagem foi utilizar o maior tempo de infravermelho combinado com a menor temperatura do ar de secagem. No

entanto, o nível do ponto central do tempo de aplicação da radiação infravermelha associado com temperaturas do ar de secagem entre 40 e 54°C propiciou maior teor de proteína dos grãos. As condições de maior tempo de aplicação da radiação infravermelha com o nível do ponto central da temperatura do ar ou o menor tempo de aplicação da radiação infravermelha com a maior temperatura do ar reduziram a turbidez remanescente da água e proporcionaram maior velocidade de redução da turbidez (k_c). A maior formação de peróxidos ocorreu com os maiores níveis da temperatura do ar, independente do tempo de aplicação da radiação infravermelha. Dessa forma, podemos afirmar que os maiores níveis dos fatores foram mais eficientes em relação às variáveis dependentes relacionadas aos aspectos da secagem dos grãos (temperatura do ar e dos grãos, tempo e taxa de secagem), entretanto, em relação à qualidade dos mesmos, níveis intermediários de tempo de aplicação da radiação infravermelha e da temperatura do ar de secagem proporcionaram maior teor de proteína dos grãos e melhor solução coagulante para a redução da turbidez de água.

Considerando-se a análise realizada anteriormente, é preferível reduzir a eficiência dos aspectos da secagem em níveis intermediários dos fatores e obter a maior qualidade dos grãos de *Moringa oleifera* L. para serem utilizados no tratamento de água. Assim, recomenda-se a região do ponto central dos fatores tempo de aplicação da radiação infravermelha e temperatura do ar para a secagem dos grãos de *Moringa oleifera* L.

4.3.2.5 Relações matemáticas entre os parâmetros de operação da secagem e as respostas avaliadas

Os modelos codificados que relacionam as condições de secagem de grãos de *Moringa oleifera* L. com a temperatura do ar dentro do secador e no interior dos grãos, energia total e específica, taxa e tempo de secagem, turbidez, constante de redução da turbidez (k_c), teor de proteína e índice de peróxidos, obtidos nesta pesquisa, estão apresentados a seguir.

$$\text{Temp. do ar dentro do secador } (^{\circ}\text{C}) = 51,12 + 6,68T + 2,28t + 0,92t^2 \quad R^2 = 98,43$$

$$\text{Temperatura no interior dos grão } (^{\circ}\text{C}) = 67,23 + 4,50T + 4,48t \quad R^2 = 91,95$$

$$\text{Energia total (kWh)} = 3,47 - 1,04t \quad R^2 = 84,42$$

$$\text{Energia específica} \left(\frac{kWh}{kg} \right) = 1344,81 - 406,69t \quad R^2 = 84,16$$

$$\text{Taxa de secagem} \left(\frac{kg_{H_2O}}{kg_{MS} \cdot \text{min}} \right) = 1,45 \times 10^{-3} + 2,84 \times 10^{-4}T + 3,64 \times 10^{-4}t \quad R^2 = 89,26$$

$$\text{Tempo de secagem (h)} = 0,838 - 0,333T + 0,129T^2 - 0,351t + 0,188Tt \quad R^2 = 93,65$$

$$\text{Turbidez residual (NTU)} = 1,741 - 1,124T + 0,824T^2 - 0,777t + 0,999Tt \quad R^2 = 91,94$$

$$k_c \left(\frac{1}{\text{tempo}} \right) = 0,258 + 0,019T - 0,024T^2 + 0,013t - 0,021t^2 \quad R^2 = 89,80$$

$$\text{Teor de proteína (\%)} = 37,591 + 0,504T - 0,801T^2 - 0,611t^2 \quad R^2 = 80,96$$

$$\text{Índice de peróxidos} \left(\frac{meq}{kg} \right) = 0,009 + 0,01T + 0,01T^2 \quad R^2 = 84,64$$

Nas Tabelas de 38 a 42 estão apresentados os valores experimentais, preditos pelos modelos e os erros relativos entre estes para as respostas estudadas. Observou-se que os maiores desvios entre do modelo da temperatura do ar dentro do secador (Tabela 38) foram relativos aos ensaios 2 e 3, de 23,3% e 25,4%, respectivamente, nos demais ensaios os resultados preditos pelo modelo se mostraram próximos aos experimentais, com erro relativo variando entre 0,2% e 8,0%. Em relação ao modelo da temperatura no interior dos grãos (Tabela 38), também se verificou que nos ensaios 2 e 3 houveram os maiores erros relativos, 14,2% e 10,7%, respectivamente, enquanto nos demais ensaios os desvios foram menores e variaram entre 0,09% e 8,32%.

As respostas para o consumo de energia total e de energia específica (Tabela 39), preditas pelos modelos codificados apresentaram maiores desvios em relação aos valores experimentais nos ensaios dos pontos axiais do planejamento experimental (ensaios de 5 a 8), isso porque os termos quadráticos desses modelos não foram significativos. Para os ensaios dos pontos fatoriais e centrais, no entanto, os erros relativos foram menores, entre 4,7% e 14,8% para o consumo de energia total e entre 4,6% e 22,9% para o consumo de energia específica, demonstrando melhor representação dos modelos nas condições de secagem dos ensaios de 1 a 4 e de 9 a 11.

Tabela 38. Valores experimentais (Exp), preditos (Pred) pelos modelos e o erro relativo entre eles, obtidos para as respostas temperatura do ar dentro do secador e no interior dos grãos de *Moringa oleifera* L. dos ensaios realizados.

Ensaio	Temperatura do ar dentro do secador (°C)			Temperatura no interior dos grãos (°C)		
	Exp	Pred	Erro relativo	Exp	Pred	Erro relativo
1	42,65	43,08	0,010	56,32	58,25	0,0343
2	56,16	43,08	0,233	67,88	58,25	0,1418
3	48,63	61,00	0,254	68,82	76,21	0,1074
4	60,89	61,00	0,002	76,19	76,21	0,0003
5	42,24	40,29	0,046	58,90	54,53	0,0742
6	61,82	65,63	0,062	73,79	79,93	0,0832
7	50,27	51,12	0,017	62,59	67,23	0,0742
8	55,59	51,12	0,080	73,22	67,23	0,0818
9	51,45	51,12	0,006	70,45	67,23	0,0457
10	49,84	51,12	0,026	64,14	67,23	0,0482
11	50,17	51,12	0,019	67,29	67,23	0,0009

Tabela 39. Valores experimentais (Exp), preditos (Pred) pelos modelos e o erro relativo entre eles, obtidos para as respostas consumo de energia total e de energia específica dos ensaios de secagem de grãos de *Moringa oleifera* L.

Ensaio	Energia total (kWh)			Energia específica (kWh kg ⁻¹)		
	Exp	Pred	Erro relativo	Exp	Pred	Erro relativo
1	4,93	4,51	0,086	1859,42	1751,50	0,058
2	5,28	4,51	0,146	2056,74	1751,50	0,148
3	2,55	2,43	0,047	1012,19	938,12	0,073
4	2,70	2,43	0,100	1056,32	938,12	0,112
5	3,48	4,94	0,422	1322,62	1919,96	0,452
6	3,07	2,00	0,349	1178,18	769,66	0,347
7	4,53	3,47	0,235	1855,01	1344,81	0,275
8	2,19	3,47	0,582	860,92	1344,81	0,562
9	3,12	3,47	0,114	1211,88	1344,81	0,110
10	3,02	3,47	0,148	1094,14	1344,81	0,229
11	3,30	3,47	0,052	1285,51	1344,81	0,046

O erro relativo dos resultados da taxa de secagem preditos pelo modelo codificado em relação aos dados experimentais variou entre 2,4% e 29,5%, com exceção dos ensaios 5 e 7, os quais apresentaram os maiores desvios, de 45,1% e 43,6%. Em relação ao tempo de secagem, os maiores erros relativos corresponderam aos ensaios 2, 5 e 8 (83,9%, 62,6% e

67,6%, respectivamente), nos demais ensaios o erro relativo dos resultados preditos pelo modelo em relação aos dados experimentais foram menores e variaram entre 0,9% e 37,2%.

Tabela 40. Valores experimentais (Exp), preditos (Pred) pelos modelos e o erro relativo entre eles, obtidos para as respostas taxa e tempo de secagem de grãos de *Moringa oleifera* L. dos ensaios realizados.

Ensaio	Taxa de secagem ($\text{kg kg}^{-1} \text{min}^{-1}$)			Tempo de secagem (h)		
	Exp	Pred	Erro relativo	Exp	Pred	Erro relativo
1	$0,70 \times 10^{-03}$	$0,80 \times 10^{-03}$	0,146	2,00	1,84	0,080
2	$1,14 \times 10^{-03}$	$0,80 \times 10^{-03}$	0,295	1,00	1,84	0,839
3	$1,63 \times 10^{-03}$	$2,10 \times 10^{-03}$	0,289	0,75	0,47	0,372
4	$2,05 \times 10^{-03}$	$2,10 \times 10^{-03}$	0,024	0,50	0,47	0,058
5	$0,97 \times 10^{-03}$	$0,53 \times 10^{-03}$	0,451	1,50	2,44	0,626
6	$1,97 \times 10^{-03}$	$2,37 \times 10^{-03}$	0,200	0,50	0,50	0,009
7	$1,01 \times 10^{-03}$	$1,45 \times 10^{-03}$	0,436	1,25	0,84	0,330
8	$1,77 \times 10^{-03}$	$1,45 \times 10^{-03}$	0,179	0,50	0,84	0,676
9	$1,54 \times 10^{-03}$	$1,45 \times 10^{-03}$	0,060	0,75	0,84	0,117
10	$1,55 \times 10^{-03}$	$1,45 \times 10^{-03}$	0,064	0,75	0,84	0,117
11	$1,66 \times 10^{-03}$	$1,45 \times 10^{-03}$	0,128	0,75	0,84	0,117

Na Tabela 41, percebe-se que os maiores desvios do modelo para a turbidez remanescente ocorreram nos ensaios 2 e 6 (186,1% e 85,7%), enquanto nos demais ensaios o erro relativo foi expressivamente menor e variou entre 5,2% e 55,7%. O modelo obtido para a resposta constante de redução da turbidez (k_c) apresentou erro relativo baixo, variando entre 0,2% e 29,8%, isso provavelmente ocorreu porque esse modelo apresentou termos lineares e quadráticos dos fatores significativos, representando bem os pontos do planejamento experimental.

Tabela 41. Valores experimentais (Exp), preditos (Pred) pelos modelos e o erro relativo entre eles, obtidos para as respostas turbidez remanescente e constante de redução da turbidez (k_c) de água tratada com solução coagulante dos grãos de *Moringa oleifera* L. dos ensaios de secagem.

Ensaio	Turbidez remanescente (NTU)			k_c (1/tempo)		
	Exp	Pred	Erro relativo	Exp	Pred	Erro relativo
1	5,76	5,47	0,052	0,179	0,181	0,013
2	1,91	5,47	1,861	0,248	0,181	0,270
3	1,36	1,66	0,220	0,265	0,245	0,076
4	1,51	1,66	0,104	0,249	0,245	0,017
5	5,19	8,08	0,557	0,175	0,123	0,298
6	1,45	2,70	0,857	0,244	0,213	0,125
7	2,49	1,74	0,300	0,243	0,258	0,060
8	1,49	1,74	0,171	0,256	0,258	0,007
9	1,55	1,74	0,121	0,259	0,258	0,002
10	1,50	1,74	0,161	0,267	0,258	0,034
11	1,54	1,74	0,131	0,262	0,258	0,015

Para a resposta teor de proteína, Tabela 42, os resultados preditos pelo modelo codificado se mostraram próximos dos experimentais, sendo que o erro relativo foi baixo e variou entre 0,2% e 4,5%. Dessa forma, pode-se afirmar que esse modelo é representativo para o comportamento do teor de proteína nas condições de secagem estudadas.

O modelo codificado obtido para o índice de peróxidos (Tabela 42), por sua vez, apresentou os maiores desvios dos valores preditos em relação aos experimentais nos ensaios 2, 3 e 5 (57,4%, 95,3% e 62,9%, respectivamente), enquanto nos demais ensaios o erro relativo variou entre 1,5% e 28,1%, considerado satisfatório.

Tabela 42. Valores experimentais (Exp), preditos (Pred) pelos modelos e o erro relativo entre eles, obtidos para as respostas teor de proteína e índice de peróxidos dos grãos de *Moringa oleifera* L. dos ensaios de secagem.

Ensaio	Teor de proteína (%)			Índice de peróxidos (meq kg ⁻¹)		
	Exp	Pred	Erro relativo	Exp	Pred	Erro relativo
1	34,93	35,68	0,021	0,012	0,009	0,274
2	36,33	35,68	0,018	0,021	0,009	0,574
3	35,80	36,68	0,025	0,015	0,029	0,953
4	37,06	36,68	0,010	0,024	0,029	0,201
5	35,65	34,05	0,045	0,009	0,015	0,629
6	36,62	35,48	0,031	0,052	0,043	0,165
7	36,85	37,59	0,020	0,009	0,009	0,022
8	36,19	37,59	0,039	0,013	0,009	0,281
9	37,93	37,59	0,009	0,009	0,009	0,048
10	37,19	37,59	0,011	0,009	0,009	0,015
11	37,66	37,59	0,002	0,009	0,009	0,045

4.3.3 Validação das condições otimizadas

A realização de ensaios para validar as condições de secagem que favoreceram as melhores respostas seria necessária caso as mesmas fossem relativas aos pontos fatoriais ou axiais do planejamento experimental. No entanto, como apresentado e discutido nos resultados anteriores, foram as condições de secagem dos pontos centrais (temperatura do ar de 44°C e tempo de aplicação da radiação infravermelha de 3,4 min) que proporcionaram eficiência satisfatória do processo de secagem maior teor de proteína dos grãos de *Moringa oleifera* L. e menor turbidez remanescente de água sintética tratada com solução coagulante obtida a partir desses grãos. Dessa forma, como já foram realizados três ensaios de secagem em dias diferentes nessas condições não se fez necessário repetir os mesmos para validação, considerou-se que esse ponto do planejamento experimental foi validado.

5 CONCLUSÕES

5.1 Seleção dos fatores que interferem na secagem

5.1.1 Secagem conduzida até alcançar equilíbrio higroscópico

Dentre os fatores estudados (temperatura e velocidade do ar, tempo e intensidade da radiação infravermelha) no planejamento para seleção das variáveis que interferem na secagem, conclui-se que a temperatura do ar e o tempo de aplicação da radiação infravermelha apresentaram efeito significativo sobre a difusividade efetiva, teor de água e atividade de água de grãos de *Moringa oleifera* L.

A difusividade efetiva obtida da secagem de grãos de *Moringa oleifera* L. sob as condições de temperatura do ar de 30 a 60 °C, velocidade do ar de 0,55 a 1,05 m s⁻¹, tempo de aplicação da radiação infravermelha de 2 a 5 min e intensidade da radiação infravermelha de 1500 a 4500 W, variou entre 6,44x10⁻¹⁰ e 9,89x10⁻¹⁰ m² s⁻¹.

O modelo da segunda lei de Fick com solução de 10 termos para esfera apresentou ótimo desempenho para descrever o comportamento da secagem de grãos de *Moringa oleifera* L. sob as condições estudadas.

Dentre os modelos empíricos de Page, Midilli e Newton, conclui-se que o modelo de Midilli apresentou melhor ajuste aos dados experimentais, sendo recomendado na representação de processos de secagem de grãos de *Moringa oleifera* L. sob as condições estudadas.

5.1.2 Secagem conduzida até alcançar teor de água pré-definido

O maior nível da intensidade da radiação infravermelha (4500 W) promoveu redução do tempo de secagem, da turbidez de água sintética, do consumo de energia e da demanda de energia específica.

O efeito dos maiores níveis da velocidade do ar provocou redução da taxa de secagem e aumentou o consumo de energia e de energia específica.

A elevação dos níveis da temperatura do ar de secagem aumentou significativamente a taxa de secagem e reduziu o tempo de secagem, além disso, interferiu na qualidade dos grãos de *Moringa oleifera* L. utilizados no tratamento de água, pois reduziu a turbidez de água sintética tratada com solução à base desses grãos.

O tempo de aplicação da radiação infravermelha contribuiu com o aumento da taxa de secagem e com a redução da turbidez de água sintética.

5.2 Definição da melhor condição de operação da secagem

Conclui-se que os fatores temperatura do ar e tempo de aplicação da radiação infravermelha interferiram significativamente na elevação da temperatura do ar dentro do secador e na temperatura dentro dos grãos de *Moringa oleifera* L. durante os ensaios de secagem.

A aplicação da radiação infravermelha reduziu consideravelmente o consumo total de energia durante as secagens. A elevação do nível de temperatura do ar provocou proporcional aumento do consumo de energia, pois demandou maior período de acionamento das resistências elétricas. Dessa forma, a associação da radiação infravermelha ao método convectivo de secagem favoreceu a redução do tempo total de secagem e, conseqüentemente, do consumo de energia elétrica.

O aumento dos níveis da temperatura do ar e do tempo de aplicação da radiação infravermelha promoveu a redução do tempo de secagem e o aumento da taxa de secagem dos grãos de *Moringa oleifera* L.

Os ensaios com os maiores valores de índice de peróxidos apresentaram valores baixos de turbidez remanescente, conclui-se então, que a oxidação lipídica propiciou melhor sedimentação de sólidos e, conseqüentemente, menor turbidez remanescente.

Estatisticamente não se verificou efeito significativo dos níveis dos fatores sobre o pH de água sintética tratada com solução coagulante advinda dos tratamentos de secagem.

Constatou-se que a região do ponto central do planejamento experimental, temperatura do ar 44°C e tempo de aplicação da radiação infravermelha 3,4 min, apresentou a

combinação entre os fatores com maior teor de proteína e que promoveu maior remoção da turbidez de águas.

Finalmente, conclui-se que a aplicação da radiação infravermelha como complementação do aquecimento da secagem convectiva foi eficiente na elevação da temperatura do ar e dos grãos, favorecendo assim, a redução do tempo de secagem e do consumo de energia e elevação da taxa de secagem. Em relação à qualidade dos grãos de *Moringa oleifera* L., a secagem aumentou a concentração do teor de proteína, favoreceu a sedimentação dos sólidos devido à oxidação de lipídios e promoveu maior redução da turbidez de água sintética tratada com solução a base desses grãos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABE, T.; AFZAL, T.M. Thin-Layer Infrared Radiation Drying of Rough Rice. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.67, p.289 – 297, 1997.
- AFZAL, T.M.; ABE, T. Diffusion in potato during far infrared radiation drying. **Journal of Food Engineering**, v.37, p.353-365, 1998.
- AFZAL, T.M.; ABE, T., HIKIDA, Y. Energy and quality aspects during combined FIR-convection drying of barley. **Journal of Food Engineering**, v.42, p.177-182, 1999.
- ANVISA. Resolução nº 482, de 23 de setembro de 1999. **Regulamento técnico para fixação de identidade e qualidade de óleos e gorduras vegetais**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, p.82-87, 1999.
- ANWAR, S.I.; TIWARI, G.N. Convective heat transfer coefficient of crops in forced convection drying – an experimental study. **Energy Conversion and Management**, v.42, p. 1687-1698, 2001.
- ARANTES, C.C. **Utilização de coagulantes naturais à base de sementes de *Moringa oleifera* e tanino como auxiliares da filtração em mantas não tecidas**. 109p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.
- ARMSTRONG, N.A. Response-Surface Methodology. In: __. **Pharmaceutical Experimental Design and Interpretation**. 2ª Ed. New York: CRC Press, Cap. 7, p.135 – 156, 2006.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS - A.O.A.C. **Official methods of analysis**. 16 ed. Washington, 1998. 1018 p.
- BAE, E. K.; LEE, S. J. Microencapsulation of avocado oil by spray drying using whey protein and maltodextrina. **Journal of Microencapsulation**, v. 25, n.8, p. 549-560, 2008.
- BENEDETTI, B. C. **Influência do teor de umidade sobre propriedades físicas de vários grãos**. 125p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1987.
- BEZERRA, A.M.E.; MEDEIROS FILHO, S.; FREITAS, J.B.S.; TEÓFILO, E.M. Avaliação da qualidade das sementes de *Moringa oleifera* Lam. durante o armazenamento. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 6, p. 1240-1246, 2004a.
- BEZERRA, A.M.E.; MOMENTÉ, V.G.; MEDEIROS FILHO, S. Germinação de sementes e desenvolvimento de plântulas de moringa (*Moringa oleifera* Lam.) em função do peso da semente e do tipo de substrato. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.22, n.2, p.295-299, 2004b.

BORBA, L.R. **Viabilidade do uso da *Moringa oleifera* Lam no tratamento simplificado de água para pequenas comunidades.** 92p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2001.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes.** Secretaria de Defesa Agropecuária, Brasília: Mapa/ACS, 2009.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria n° 2,914**, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.. Brasília: MS, 2011. Disponível em: <http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html>. Acesso em: 03/05/2014.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, E.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds.** New York, The AVI Publishing Company, 450 p. 1992.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, E.W.; HALL, C.W. **Drying cereal grains and their products.** Westport, Connecticut, The AVI Publishing Company, 265 p. 1974.

CARRÍN, M.E.; CRAPISTE, G.H. Convective Drying of Foods. In: RATTI, C. **Advances in food dehydration.** CRC Press, Cap. 5, p.123-151, 2009.

CECCHI, H.M. **Fundamentos teóricos e práticos em análise de alimentos.** 2 ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2003. p.96-97.

CELESTINO, S.M.C. **Princípios de secagem de alimentos.** Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 51p. 2010. ISSN online 2176-5081.

CELMA, A.R.; CUADROS, F.; LÓPEZ-RODRÍGUEZ, F. Characterization of industrial tomato by-products from infrared drying process. **Food and Bioproducts Processing**, v.87, p.282–291, 2009b.

CELMA, A.R.; LÓPEZ-RODRÍGUEZ, F.; BLÁZQUEZ, F.C. Experimental modeling of infrared drying of industrial grape by-products. **Food and bioproducts processing**, v.8 7, p.247–253, 2009a.

CHUANG, P.H.; LEE, C.W.; CHOU, J.Y.; MURUGAN, M.; SHIEH, B.J.; CHEN, H.M. Anti-fungal activity of crude extracts and essential oil of *Moringa oleifera* Lam. **Bioresource Technology**, v.98, p.232–236, 2007.

COELHO, J.S.; SANTOS, N.D.L.; NAPOLEÃO, T.H.; GOMES, F.S.; FERREIRA, R.S.; ZINGALI, R.B.; COELHO, L.C.B.B.; LEITE, S.P.; NAVARRO, D.M.A.F.; PAIVA, P.M.G. Effect of *Moringa oleifera* lectin on development and mortality of *Aedes aegypti* larvae. **Chemosphere**, v.77, p.934–938, 2009.

COMPAORÉ, W.R.; NIKIÈMA, P.A.; BASSOLÉ, H.I.N.; SAVADOGO, A.; MOUECOUCOU, J.; HOUNHOUGAN, D.J.; TRAORÉ, S.A. Chemical composition and antioxidative properties of seeds of *Moringa oleifera* and pulps of *Parkia biglobosa* and *Adansonia digitata* commonly used in food fortification in Burkina Faso. **Current Research Journal of Biological Sciences**, v. 3, n. 1, p. 64-72, 2011. ISSN: 2041-0778.

CYSNE, J.R.B. **Propagação in vitro de *Moringa oleifera* L.** 81p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

DOYMAZ, I. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. **Journal of Food Engineering**, v.61, p.359–364, 2004.

DOYMAZ, I. Thin-layer drying characteristics of sweet potato slices and mathematical modelling. **Heat Mass Transfer**, v.47, p.277–285, 2011.

FERREIRA, P.M.P.; FARIAS, D.F.; OLIVEIRA, J.T.A.; CARVALHO, A.F.U. *Moringa oleifera*: bioactive compounds and nutritional potential. **Revista de Nutrição**, Campinas, v.21, n.4, p.431-437, jul./ago., 2008.

FOLKARD, G.; SUTHERLAND, J. *Moringa oleifera* un árbol con enormes potencialidades. Disponível em: <ftp://ftp.fao.org/docrep/nonfao/LEAD/X6324S/X6324S00.pdf>. Acesso em: 10/11/2011.

FRANCO, M. **Uso de coagulante extraído de sementes de *Moringa oleifera* como auxiliar no tratamento de água por filtração em múltiplas etapas.** 90p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2010.

GABEL, M.M.; PAN, Z.; AMARATUNGA, K.S.P.; HARRIS, L.J.; THOMPSON, J.F. Catalytic Infrared Dehydration of Onions. **Journal of Food Science**, v.71, n.9, p.351-357. 2006.

GASSENSCHMIDT, U.; JANY, K.D.; TAUSCHER, B.; NIEBERGALL, H. Isolation and characterization of a flocculating protein from *Moringa oleifera* Lam. **Biochimica et Biophysics Acta**, v.1243, p.477-481, 1995.

GHEBREMICHAEL, K.A.; GUNARATNA, K.R.; HENRIKSSON, H.; BRUMER, H.; DALHAMMAR, G. A simple purification and activity assay of the coagulant protein from *Moringa oleifera* seed. **Water Research**, v.39, p.2338–2344, 2005.

GIFONI, J.M.; OLIVEIRA, J.T.A.; OLIVEIRA, H.D.; BATISTA, A.B.; PEREIRA, M.L.; GOMES, A.S.; OLIVEIRA, H.P.; GRANGEIRO, T.B.; VASCONCELOS, I.M. A novel chitin-binding protein from *Moringa oleifera* seed with potential for plant disease control. **Peptide Science**, v.98, n.4, 2012.

GUEVARA, A.P.; VARGAS, C.; SAKURAI, H.; FUJIWARA, Y.; HASHIMOTO, K.; MAOKA, T.; KOZUKA, M.; ITO, Y.; TOKUDA, H.; NISHINO, H. An antitumor promoter from *Moringa oleifera* Lam. **Mutation Research**, v.440, p.181–188, 1999.

HASSINI, L.; AZZOUZ, S.; PECZALSKI, R.; BELGHITH, A. Estimation of potato moisture diffusivity from convective drying kinetics with correction for shrinkage. **Journal of Food Engineering**, v.79, p.47–56, 2007.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz: métodos químicos e físicos para análise de alimentos**. 2. ed. São Paulo, v. 1, 1976. 371 p.

KATAYON S.; NOOR, M.J.M.M.; ASMA, M.; GHANI, L.A.A.; THAMER, A.M.; AZNI, I.; AHMAD, J.; KHOR, B.C.; SULEYMAN, A.M. Effects of storage conditions of *Moringa oleifera* seeds on its performance in coagulation. **Bioresource Technology**, v. 97, p.1455–1460, 2006.

KAYA, A.; AYDIN, O.; DINCER, I. Experimental and numerical investigation of heat and mass transfer during drying of Hayward kiwi fruits (*Actinidia Deliciosa* Planch). **Journal of Food Engineering**, v. 88, p. 323–330, 2008.

KEEY, R.B. **Drying: Principles and Practice**. Oxford: Pergamon Press, 1972, p. 353.

KEEY, R.B. Process of Drying. In: _____. **Introduction to Industrial Drying Operations**. Pergamon Press, Cap. 5, p.147-181, 1978.

KOCABIYIK, H. Combined infrared and hot air drying. In: PAN, Z.; ATUNGULU, G. G. **Infrared Heating for Food and Agricultural Processing**. New York: CRC Press, Cap. 6, p. 101 – 116, 2011.

LÉDO, A.S.; RANGEL, M.S.A.; FREIRE, K.C.S.; MACHADO, C.A.; OLIVEIRA, L.F.M. **Propagação sexuada in vitro de moringa (*Moringa oleifera* Lam.)**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2008. 17 p. - Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, ISSN1678-1961.

LÉDO, P.G.S.; LIMA, R.F.S.; PAULO, J.B.A.; DUARTE, M.A.C. Estudio comparativo de sulfato de aluminio y semillas de *Moringa oleifera* para la depuración de aguas con baja turbiedad. **Información tecnológica**, v. 20, n.5, p.3-12, 2009.

LIN, Y.; TSEN, J.; KING, V.A. Effects of far-infrared radiation on the freeze-drying of sweet potato. **Journal of Food Engineering**, v.68, p.249–255, 2005.

MADRONA, G.S. **Extração/purificação do composto ativo da semente da *Moringa oleifera* Lam e sua utilização no tratamento de Água para consumo humano**. 176p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010.

- MANI, S.; JAYA, S.; VADIVAMBAL, R. Optimization of solvent extraction of moringa (*Moringa oleifera*) seed kernel oil using response surface methodology. **Food and Bioproducts Processing**, v.85, p.328–335, 2007.
- MCMINN, W.A.M.; MAGEE, T.R.A. Principles, methods and applications of the convective drying of foodstuffs. **Trans IChemE**, v. 77, parte C, 1999.
- MENDIETA-ARAICA, B.; SPÖRNDLY, R.; REYES-SÁNCHEZ, N.; SPÖRNDLY, E. Moringa (*Moringa oleifera*) leaf meal as a source of protein in locally produced concentrates for dairy cows fed low protein diets in tropical areas. **Livestock Science**, v.137, p.10–17, 2011.
- MONGPRANEET, S.; ABE, T.; TSURUSAKI, T. Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions. **Journal of Food Engineering**, v. 55, n. 2, p. 147-156, 2002.
- MOTEVALI, A.; MINAEI, S.; KHOSHTAGAZA M.H. Evaluation of energy consumption in different drying methods. **Energy Conversion and Management**, v.52, p.1192–1199, 2011.
- MUYIBI, S.A.; EVISON, L.M. *Moringa oleifera* seeds for softening hardwater. **Water Research**, v.29, n.4, p.1099-1105, 1995.
- NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, K. S. Quality of water treated by coagulation using *Moringa oleifera* seeds. **Water Research**, v.32, n.3, p.781-791, 1998.
- NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, K.S.; TALBOT, B.G. Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*. **Water Research**, v.29, n.2, p.703-710, 1995.
- NIMMOL, C.; DEVAHASTIN, S. Evaluation of performance and energy consumption of an impinging stream dryer for paddy. **Applied Thermal Engineering**, v.30, p.2204-2212, 2010.
- NIMMOL, C.; DEVAHASTIN, S.; SWASDISEVI, T.; SOPONRONNARIT, S. Drying of banana slices using combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation. **Journal of Food Engineering**, v.81, p.624–633, 2007.
- NINDO C.; MWITHIGA G., Infrared Drying. In: PAN, Z.; ATUNGULU, G. G. **Infrared Heating for Food and Agricultural Processing**. New York: CRC Press, Cap. 5, p. 89 – 97, 2011.
- NOWAK, D.; LEWICKI, P.P. Infrared drying of apple slices. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, p. 353– 360, 2004.
- OKOS, M.R.; CAMPANELLA, O.; NARSIMHAN, G.; SINGH, R.K.; WEITNAUER, A.C. Food Dehydration. In: HELDMAN, D.R.; LUND, D.B. **Handbook of Food Engineering, Second Edition**. CRC Press, Cap. 10, p.471–493, 2007.

OLIVEIRA, C.F.R.; LUZ, L.A.; PAIVA, P.M.G.; COELHO, L.C.B.B.; MARANGONI, S.; MACEDO, M.L.R. Evaluation of seed coagulant *Moringa oleifera* lectin (cMoL) as a bioinsecticidal tool with potential for the control of insects. **Process Biochemistry**, v.46, p.498–504, 2011.

OLIVEIRA, R.A. **Estudo da secagem em dois tipos de secadores: Avaliação dos parâmetros operacionais e comportamento do material seco**. 218p. Campinas: Universidade Estadual de Campinas/Faculdade de Engenharia Agrícola, Tese (Doutorado), 2009.

PAN, Z.; ATUNGULU, G.G. Infrared Dry Blanching. In: PAN, Z.; ATUNGULU, G.G. **Infrared heating for food and agricultural processing**. New York: CRC Press, Cap. 9, p.169 – 199, 2011.

PAN, Z.; KHIR, R.; GODFREY, L.D.; LEWIS, R.; THOMPSON, J.F.; SALIM, A. Feasibility of simultaneous rough rice drying and disinfestations by infrared radiation heating and rice milling quality. **Journal of Food Engineering**, v.84, p.469–479, 2008.

PARK, K.J.; ANTONIO, G.C.; OLIVEIRA, R.A.; PARK, K.J.B. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. Disponível em: <<http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html>>. Acesso em: 25/01/2013.

PARTANEN, R.; RAULA, J.; SEPPANEN, R.; BUCHERT, J.; KAUPPINEN, E.; FORSELL, P. Effect of Relative Humidity on Oxidation of Flaxseed Oil in Spray Dried Whey Protein Emulsions. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 56, n. 14, p. 5717-5722, 2008.

PASSOS, R.M.; SANTOS, D.M.C.; SANTOS, B.S.; SOUZA, D.C.L.; SANTOS, J.A.B.; SILVA, G.F. Qualidade pós-colheita da moringa (*Moringa oleifera* lam) utilizada na forma in natura e seca. **Revista GEINTEC**, v.3, n.1, p.113-120, 2012.

PATERNIANI, J.E.S.; MANTOVANI, M.C.; SANT'ANNA, M.R. Uso de sementes de *Moringa oleifera* para tratamento de águas superficiais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.6, p.765–771, 2009.

PONKHAM, K.; MEESO, N.; SOPONRONNARIT, S.; SIRIAMORNUN, S. Modeling of combined far-infrared radiation and air drying of a ring shaped-pineapple with/without shrinkage. **Food and Bioproducts Processing**, doi:10.1016/j.fbp.2011.02.008, 2011.

PRITCHARD, M.; CRAVEN, T.; MKANDAWIRE, T.; EDMONDSON, A.S.; O'NEILL, J.G. A study of the parameters affecting the effectiveness of *Moringa oleifera* in drinking water purification. **Physics and Chemistry of the Earth**, v.35, p.791–797, 2010.

RAMOS, R.O. **Clarificação de água com turbidez baixa e cor moderada utilizando sementes de *Moringa oleifera***. 248p. Campinas: Universidade Estadual de Campinas/Faculdade de Engenharia Agrícola, Tese (Doutorado), 2005.

RANGEL, M.S.A. *Moringa oleifera*; **Uma planta de uso múltiplo**. Aracajú: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 1999. 41p. (EMBRAPA-CPATC. Circular Técnica, 9).

RASHID, U.; ANWAR, F.; ASHRAF, M.; SALEEM, M.; YUSUP, S. Application of response surface methodology for optimizing transesterification of *Moringa oleifera* oil: Biodiesel production. **Energy Conversion and Management**, v.52, p.3034–3042, 2011.

RASHID, U.; ANWAR, F.; MOSER, B.R.; KNOTHE, G. *Moringa oleifera* oil: A possible source of biodiesel. **Bioresource Technology**, v.99, p.8175–8179, 2008.

RATTI, C.; MUJUMDAR, A.S. Infrared Drying. In: MUJUNDAR, A.R. **Handbook of Industrial Drying**. New York: CRC Press, 3ed, Cap. 18, p.423 – 437, 2006.

RICHTER, N.; SIDDHURAJU, P.; BECKER, K. Evaluation of nutritional quality of moringa (*Moringa oleifera* Lam.) leaves as an alternative protein source for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.). **Aquaculture**, v. 217, p.599– 611, 2003.

RODRIGUES, A.L. **Utilização de sementes de moringa (*Moringa oleifera*) no tratamento de efluentes de viveiros de criação de tilápia nilótica (*Oreochromis niloticus*) variedade Chitralada**. 74p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências Agrárias, Areia, 2005.

RODRIGUES, M.I.; IEMMA, A.F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. 2^a. Ed. – Campinas, SP: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, 2009, 358p.

SAKAI, N; MAO W. Infrared Heating. In: SUN, D. **Thermal Food Processing: New Technologies and Quality Issues**. New York: CRC Press, Cap. 16, p.493 – 522, 2006.

SANDU, C. Infrared Radiative Drying in Food Engineering: A Process Analysis. **Blotechnology Progress**, v. 2, n.3, p.109 – 119, 1986.

SHARMA, G.P.; VERMA, R.C.; PATHARE, P.B. Thin-layer infrared radiation drying of onion slices. **Journal of Food Engineering**, v.67, p.361–366, 2005.

SILVA, F.J.A.; MATOS, J.E.X. Sobre dispersões de *Moringa oleifera* para tratamento de água. **Revista Tecnologia**. Fortaleza, v. 29, n. 2, p.157-163, 2008.

SILVA, J.P.V.; SERRA, T.M.; GOSSMANN, M.; WOLF, C.R.; MENEGHETTI, M.R.; MENEGHETTI, S.M.P. *Moringa oleifera* oil: Studies of characterization and biodiesel production. **Biomass and Bioenergy**, v.34, p.1527-1530, 2010.

SRIKIATDEN, J.; ROBERTS, J.S. Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying. **Journal of Food Engineering**, v.74, p.143–152, 2006.

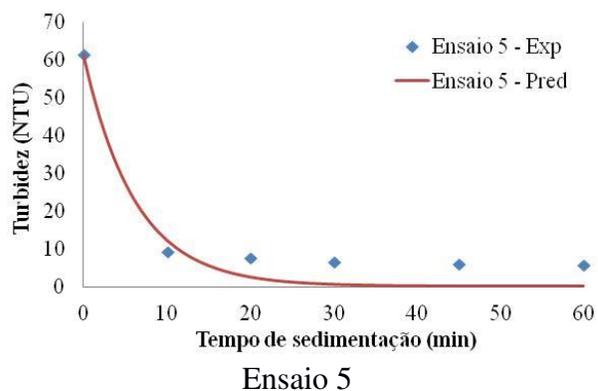
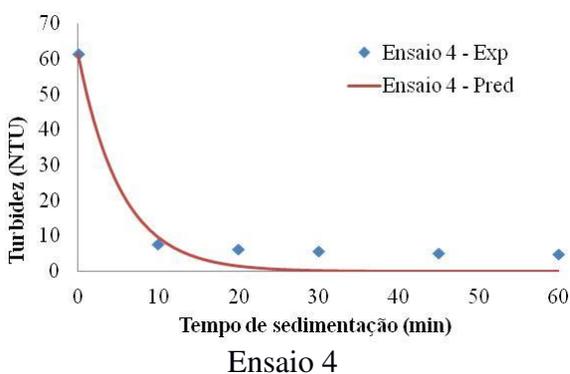
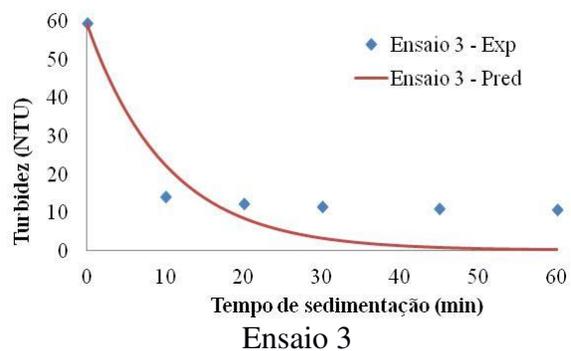
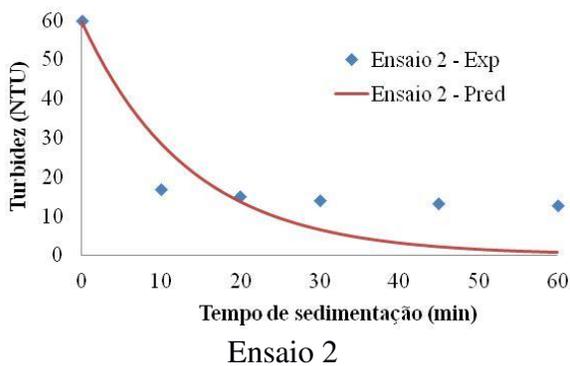
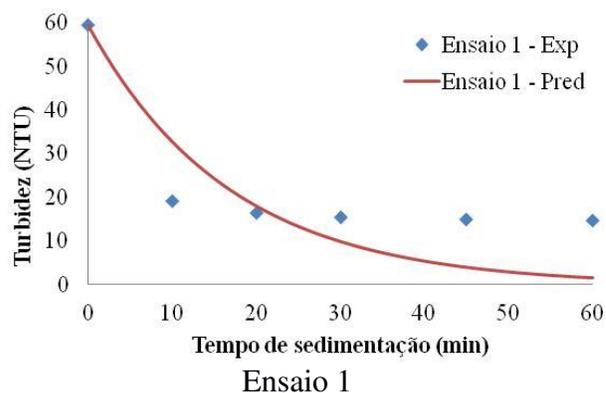
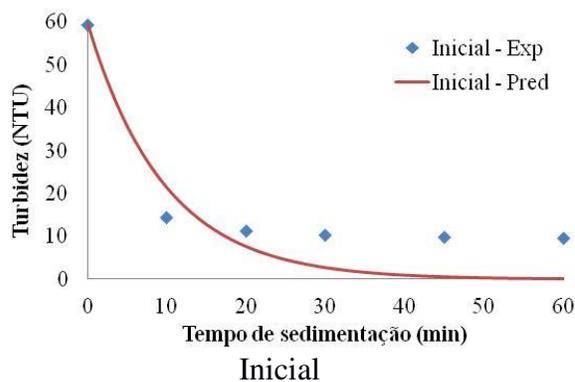
- SWASDISEVI T.; DEVAHASTIN, S.; NGAMCHUM, R.; SOPONRONNARIT, S. Optimization of a drying process using infrared vacuum drying of Cavendish banana slices. **Songklanakarin Journal Science Technology**, v.29, n.3, p.809-816, 2007.
- SWASDISEVI, T.; DEVAHASTIN, S.; SA-ADCHOM, P.; SOPONRONNARIT, S. Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice. **Journal of Food Engineering**, v.92, p.100–106, 2009.
- TAN, M.; CHUA, K.J.; MUJUMDAR, A.S.; CHOU, S.K. Effect of osmotic pre-treatment and infrared radiation on drying rate and color changes during drying of potato and pineapple. **Drying Technology**, v.19, n.9, p.2193–2207. 2001
- TEÓFILO, E.M.; FREITAS, J.B.S.; BEZERRA, A.M.E.; RAFAEL, M.S.S. Tipos de embalagens, ambiente, tempo de armazenamento e qualidade fisiológica das sementes de moringa (*Moringa oleifera* LAM.)-Moringaceae. **Revista Científica Rural**, Bagé, v.8, n.1, p.115-122, 2003.
- TOGRUL, H. Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices. **Journal of Food Engineering**, v.71, p.311–323, 2005.
- TOGRUL, H. Suitable drying model for infrared drying of carrot. **Journal of Food Engineering**, v.77, p.610–619, 2006.
- VAN DEN BERG, C. Water activity. In: MCCARTHY, D. Concentration and drying of foods. **Elsevier Applied Science Publishers**, London, p. 11-36, 1986.
- VERMA, A.R.; VIJAYAKUMAR, M.; MATHELA, C.S.; RAO, C.V. In vitro and in vivo antioxidant properties of different fractions of *Moringa oleifera* leaves. **Food and Chemical Toxicology**, v.47, p.2196–2201, 2009.
- VIEIRA, H.; CHAVES, L.H.G.; VIÉGAS, R.A. Crescimento inicial de moringa (*Moringa oleifera* Lam) sob omissão de nutrientes. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.21, n.4, p.51-56, 2008.
- VILLA-CORRALES, L.; FLORES-PRIETO, J.J.; XAMÁN-VILLASEÑOR, J.P.; GARCÍA-HERNÁNDEZ, E. Numerical and experimental analysis if heat and moisture transfer during drying of Ataulfo mango. **Journal of Food Engineering**, v. 98, p. 198–206, 2010.
- WILHEM, L.R.; SUTER, D.A.; BRUSEWITZ, G.H. Heat Transfer. In: _____. **Food & Process Engineering Technology**. St. Joseph, Michigan: ASAE, Chapter 5, p. 111-141, 2005.
- WILLIGES, R.C. Response Surface Methodology and Sequential Experimentation. In: KARWOWSKI, W. **International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors**. 2^a ed., vol. 3, New York: CRC Press, Cap. 643, 2006.

ZHU, Y.; PAN, Z. Processing and quality characteristics of apple slices under simultaneous infrared dry-blanching and dehydration with continuous heating. **Journal of Food Engineering**, v.90, p.441–452, 2009.

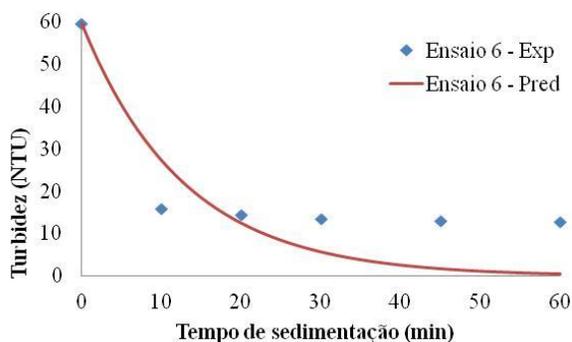
ZHU, Y.; PAN, Z.; MCHUGH, T.H.; BARRETT, D.M. Processing and quality characteristics of apple slices processed under simultaneous infrared dry-blanching and dehydration with intermittent heating. **Journal of Food Engineering**, v.97, p.8–16, 2010.

APÊNDICE

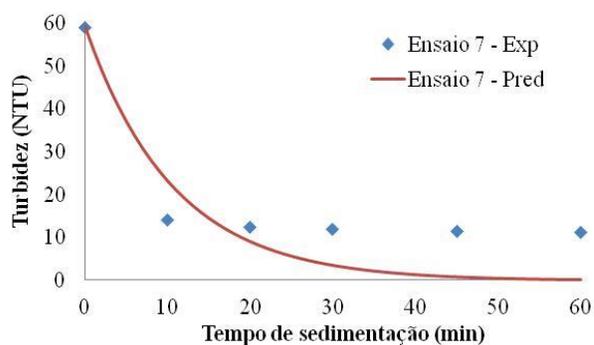
Apêndice A. Cinéticas da redução da turbidez experimental (Exp) e previstas pela Equação 19, obtidas durante tempo de sedimentação de 60 min – Inicial e ensaios de 1 a 5 da secagem até teor de água de 7% (b.u.).



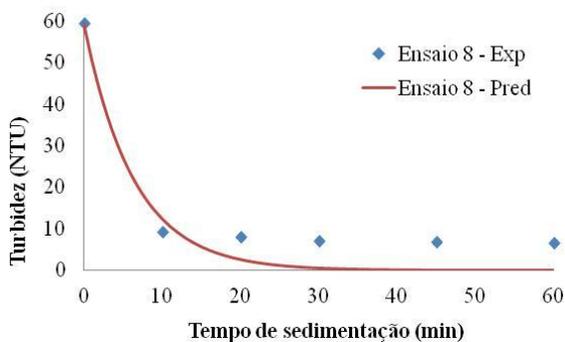
Apêndice B. Cinéticas da redução da turbidez experimental (Exp) e previstas pela Equação 19, obtidas durante tempo de sedimentação de 60 min – Ensaios de 6 a 11 da secagem até teor de água de 7% (b.u.).



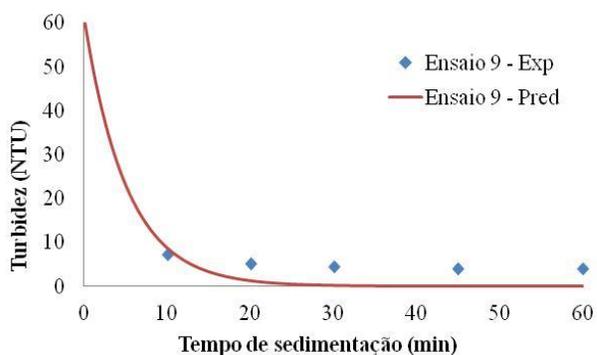
Ensaio 6



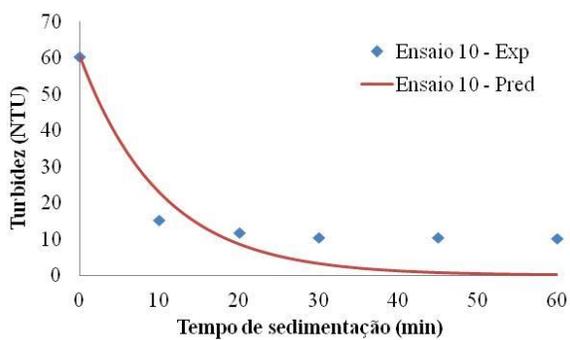
Ensaio 7



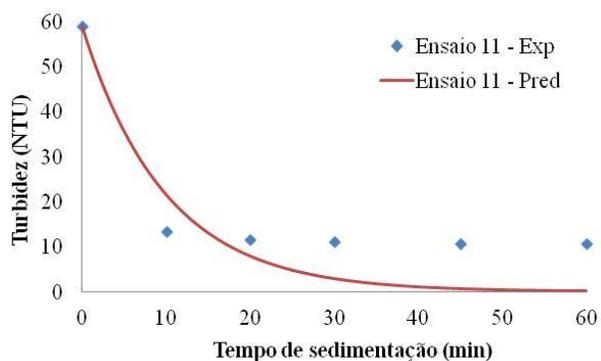
Ensaio 8



Ensaio 9

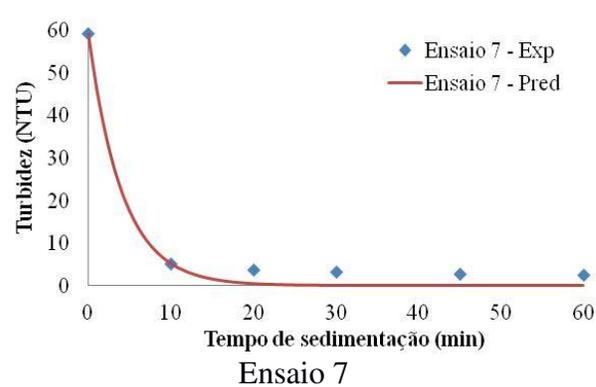
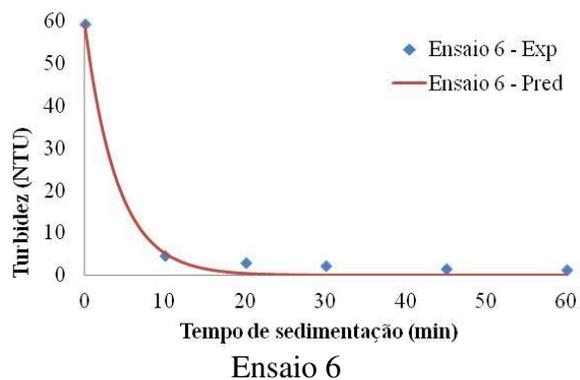
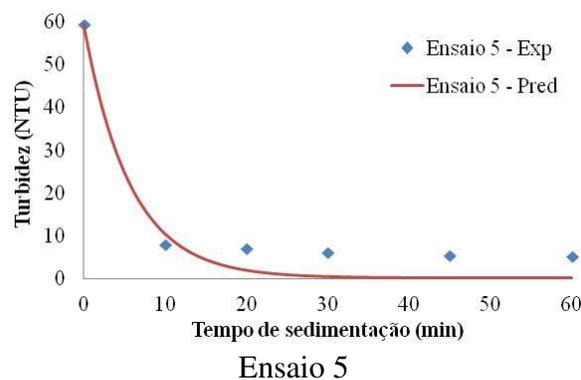
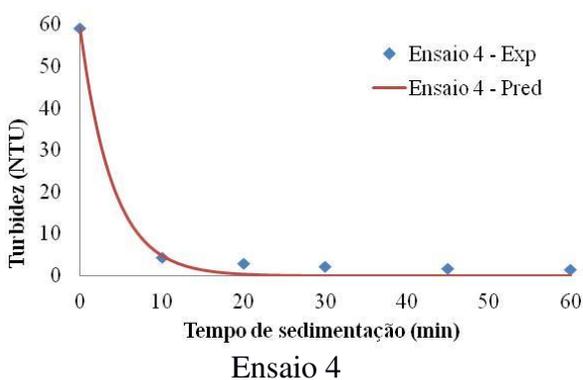
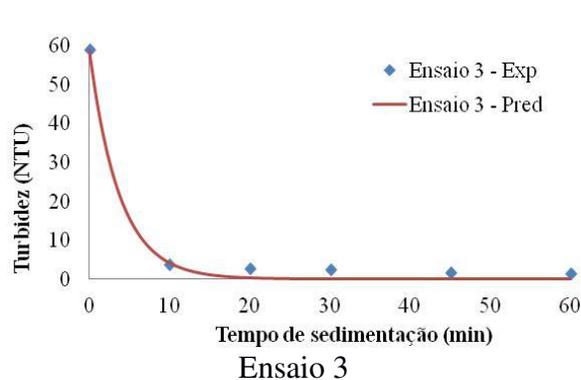
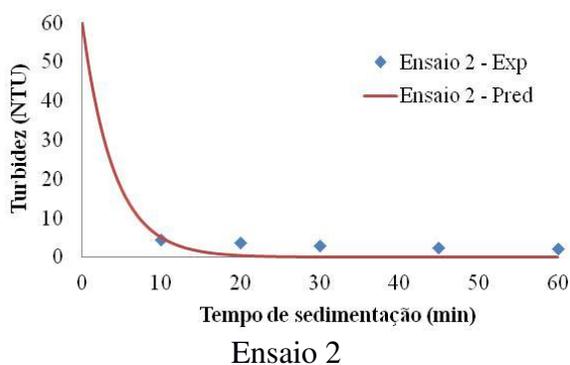
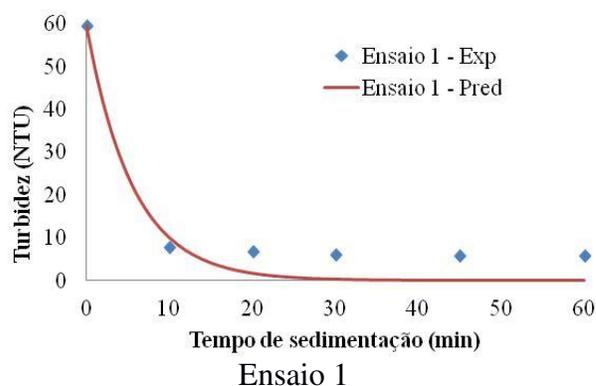
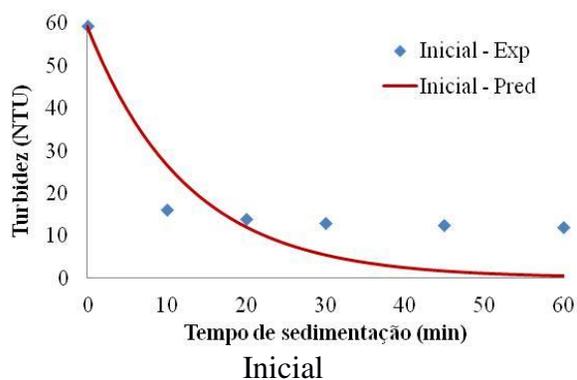


Ensaio 10



Ensaio 11

Apêndice C. Cinéticas da redução da turbidez experimental (Exp) e previstas pela Equação 19, obtidas durante tempo de sedimentação de 60 min – Inicial e ensaios de 1 a 7 da secagem até teor de água de 4% (b.u.).



Apêndice D. Cinéticas da redução da turbidez experimental (Exp) e previstas pela Equação 19, obtidas durante tempo de sedimentação de 60 min – Ensaios de 8 a 11 da secagem até teor de água de 4% (b.u.).

