



**Fundação Universidade Federal do Rio Grande  
Departamento de Química  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e  
Ciência de Alimentos**

**Secagem de *Spirulina platensis*: análise das técnicas  
de leito de jorro e camada delgada**

**Eng<sup>a</sup>. Química Elizangela Gonçalves de Oliveira**

**Orientador: Prof. Dr. Luiz Antonio de Almeida Pinto**

Rio Grande, RS.

2006

**Fundação Universidade Federal do Rio Grande  
Departamento de Química  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência  
de Alimentos**

**Secagem de *Spirulina platensis*: análise das técnicas de  
leito de jorro e camada delgada**

**Eng<sup>a</sup>. Química Elizangela Gonçalves de Oliveira**

Dissertação apresentada para a  
obtenção do título de Mestre em  
Engenharia e Ciência de Alimentos.

**Orientador: Prof. Dr. Luiz Antonio de Almeida Pinto**

Rio Grande, RS.

2006

“As dificuldades devem ser usadas para crescer,  
não para desencorajar.  
O espírito humano cresce forte no conflito.”

William Channing

Dedico este trabalho ao meu avô  
Candido José (in memoriam).

## **AGRADECIMENTOS**

### **A meus pais João e Vera e meu irmão Joel**

Agradeço a tudo, principalmente a paciência, carinho e atenção durante todos esses anos de estudos e ausências.

### **Ao meu Orientador Luiz Antônio de Almeida Pinto**

Agradeço por tudo que me ensinou e continua ensinando, pelo exemplo de profissional e de pessoa.

### **As bolsistas Gabriela Silveira da Rosa e Mariana Agostini de Moraes**

Um agradecimento especial, além da amizade e agradável companhia, são responsáveis pelo desenvolvimento deste trabalho.

### **Aos Colegas do Laboratório de Operações Unitárias**

Agradeço pela ajuda, amizade e convivência que torna cada dia de trabalho mais agradável, em especial a Jaques Rizzi, Jaqueline Moura e Lucia Batista.

### **Aos Professores do programa de pós-graduação**

Pelos conhecimentos e aprendizado adquirido, em especial aos professores Eliana Badiale Furlong e Jorge Alberto Vieira da Costa.

### **Aos colegas do programa de pós-graduação**

Pela amizade e agradável convívio ao longo desses dois anos.

### **A secretária Islanda Passos**

Pela atenção, carinho e amizade ao longo deste período.

### **A Fundação Universidade Federal do Rio Grande**

Pela formação profissional.

### **Ao Governo Federal representado pela CAPES**

Pela bolsa de estudos.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS	VI
NOMENCLATURA	VIII
RESUMO	IX
ABSTRACT	X

### CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO<sup>1</sup>

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Justificativa	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo geral	4
1.3.2. Objetivos específicos	4

### CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Cianobactérias	5
2.2. <i>Spirulina platensis</i>	5
2.2.1. Composição da <i>Spirulina platensis</i>	7
2.2.2. Utilização da <i>Spirulina</i>	7
2.3. Secagem	9
2.3.1. Definições e considerações gerais	9
2.3.1.1. Umidade de Equilíbrio	10
2.3.1.2. Cinética de secagem: correlação empírica	12
2.3.2. Secagem em leito de jorro	13
2.3.3. Secagem em camada delgada	17
2.3.4. Secagem de cianobactérias	17

### CAPÍTULO 3: DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

ARTIGO 1 - Caracterização da secagem de <i>Spirulina platensis</i> em camada delgada utilizando escoamento perpendicular do ar	19
RESUMO	19
1. INTRODUÇÃO	19
2. MATERIAL E MÉTODOS	21
2.1. Matéria-prima	21
2.2. Equipamento de secagem	22
2.3. Procedimento experimental de secagem	22

2.4. Metodologia analítica	23
2.5. Procedimento de cálculo	24
2.6. Metodologia estatística	24
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
3.1. Composição química	25
3.2. Umidade de equilíbrio e caracterização da secagem	25
3.3. Análise estatística	29
4. CONCLUSÃO	31
5. NOMENCLATURA	32
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32
ARTIGO 2 - Secagem de <i>Spirulina platensis</i> em leite de jorro: avaliação das características funcionais do produto final	35
RESUMO	35
1. INTRODUÇÃO	35
2. MATERIAL E MÉTODOS	37
2.1. Matéria-prima	37
2.2. Equipamentos para a secagem de <i>Spirulina platensis</i>	38
2.3. Metodologia analítica	39
2.4. Metodologia experimental	39
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
3.1. Composição química	41
3.2. Curvas fluidodinâmicas	41
3.3. Secagem em leite de jorro	43
4. CONCLUSÃO	45
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
ARTIGO 3 - Determinação do conteúdo de ficocianina de <i>Spirulina platensis</i> seca em leite de jorro e em camada delgada	48
RESUMO	48
1. INTRODUÇÃO	48
2. MATERIAL E MÉTODOS	50
2.1. Matéria-prima	50
2.2. Secagem de <i>Spirulina platensis</i>	50
2.2.1. Leite de jorro	50
2.2.2. Camada delgada	51
2.3. Metodologia analítica	52
2.4. Procedimento experimental	53
2.4.1. Leite de jorro	53

2.4.2. Camada delgada	53
2.5. Procedimento de cálculo	54
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
3.1. Caracterização da secagem	54
3.2. Solubilidade e ficocianina	56
3.2.1. Solubilidade	56
3.2.2. Ficocianina	56
4. CONCLUSÃO	57
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
<b>CAPÍTULO 4: CONCLUSÃO GERAL</b>	
4. CONCLUSÃO GERAL	60
4.1. Sugestões para trabalhos futuros	61
<b>CAPÍTULO 5: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
<b>CAPÍTULO 6: ANEXOS</b>	69

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Figura 1: Microalga <i>Spirulina platensis</i> ao microscópio	5
Figura 2: Fotobiorreatores abertos	6
Figura 3: Curva da taxa de secagem em função da umidade	9
Figura 4: Diagrama esquemático de um leito de jorro tronco cone-cilíndrico	14
Figura 5: Curva fluidodinâmica genérica: Perda de Carga x Velocidade	15

### CAPÍTULO 3: DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

ARTIGO 1 – Caracterização da secagem de *Spirulina platensis* em camada delgada utilizando escoamento perpendicular do ar

Figura 1: Esquema do secador descontínuo de bandejas	22
Figura 2: Isoterma de sorção para <i>Spirulina</i> nas temperaturas de 50 e 60°C	25
Figura 3: Curva de secagem de <i>Spirulina platensis</i> nas temperaturas de 50 e 60°C, nas cargas de 4 e 6kg/m <sup>2</sup>	26
Figura 4: Curva de secagem de <i>Spirulina platensis</i> nas temperaturas de 50 e 60°C, nas cargas de 4 e 6kg/m <sup>2</sup> , em escala semi-log	27
Figura 5: Taxa de secagem em função da umidade de <i>Spirulina platensis</i> , a 50 e 60°C, 4 kg/m <sup>2</sup>	27
Figura 6: Adimensional de água livre em função do tempo para a temperatura de 50°C e carga de 4 kg/m <sup>2</sup>	28
Figura 7: Gráfico de Pareto para a resposta do planejamento	30
Figura 8: Gráfico dos efeitos principais para resposta solubilidade protéica em meio ácido	30
Figura 9: Quadrado de resposta do planejamento experimental	31

ARTIGO 2 - Secagem de *Spirulina platensis* em leito de jorro: avaliação das características funcionais do produto final

Figura 1: Esquema do equipamento para secagem em leito de jorro	38
Figura 2: Curva fluidodinâmica para CSB	42
Figura 3: Curva fluidodinâmica para JSB	42

ARTIGO 3 – Determinação do conteúdo de ficocianina de *Spirulina platensis* seca em leito de jorro e em camada delgada

Figura 1: Esquema do equipamento para secagem em leito de jorro	51
Figura 2: Esquema do secador descontínuo de bandejas com escoamento perpendicular do ar	52
Figura 3: Curva da taxa de secagem em função da umidade de <i>Spirulina</i> , 60°C	55

Figura 4: Adimensional de água livre em função do tempo para a temperatura de 60°C e carga de 4kg/m<sup>2</sup>\_\_\_\_\_55

## **CAPÍTULO 6: ANEXOS**

Figura A1: Adimensional de água livre em função do tempo para a temperatura de 50°C e carga de 4 kg/m<sup>2</sup>\_\_\_\_\_73

Figura A2: Adimensional de água livre em função do tempo para a temperatura de 50°C e carga de 6 kg/m<sup>2</sup>\_\_\_\_\_74

Figura A3: Adimensional de água livre em função do tempo para a temperatura de 60°C e carga de 4 kg/m<sup>2</sup>\_\_\_\_\_74

Figura A4: Adimensional de água livre em função do tempo para a temperatura de 60°C e carga de 6 kg/m<sup>2</sup>\_\_\_\_\_75

Figura A5: Curva da taxa de secagem de *Spirulina platensis* em função da umidade para todos os ensaios de secagem\_\_\_\_\_75

Figura A6: Secador descontínuo de bandejas com escoamento perpendicular do ar\_76

Figura A7: Secador de leite jorro, geometria cone-cilíndrica\_\_\_\_\_76

Figura A8: Secador de leite jorro, geometria cônica\_\_\_\_\_77

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tabela 1: Composição centesimal de *Spirulina* seca \_\_\_\_\_ 7

Tabela 2: Teores de proteínas, lipídios, carboidratos e cinzas de três espécies de microorganismos e de quatro alimentos convencionais (b.s.) \_\_\_\_\_ 8

### CAPÍTULO 3: DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

ARTIGO 1 – Caracterização da secagem de *Spirulina platensis* em camada delgada utilizando escoamento perpendicular do ar

Tabela 1: Matriz do planejamento experimental dos ensaios de secagem de *Spirulina* forma codificada e não codificada \_\_\_\_\_ 24

Tabela 2: Composição proximal da *Spirulina* “in natura” prensada em base úmida \_\_\_\_\_ 25

Tabela 3: Ajuste dos modelos GAB e BET para as isotermas de *Spirulina* a 50 e 60°C \_\_\_\_\_ 26

Tabela 4: Caracterização da secagem de *Spirulina* em camada delgada \_\_\_\_\_ 28

Tabela 5: Valores da difusividade efetiva média de umidade das etapas de secagem de *Spirulina* \_\_\_\_\_ 29

Tabela 6: Valores matriz do planejamento experimental para a resposta solubilidade protéica em meio ácido \_\_\_\_\_ 29

Tabela 7: Quadro de ANOVA para a resposta solubilidade protéica em meio Ácido \_\_\_\_\_ 29

ARTIGO 2 - Secagem de *Spirulina platensis* em leite de jorro: avaliação das características funcionais do produto final

Tabela 1: Composição proximal da *Spirulina platensis* “in natura”, em base úmida \_\_\_\_\_ 41

Tabela 2: Parâmetros fluidodinâmicos teóricos e experimentais das células cone-cilíndrico CSB e JSB \_\_\_\_\_ 42

Tabela 3: Resultados de umidade e produção de *Spirulina* seca nos dois tipos de secador de leite de jorro \_\_\_\_\_ 43

Tabela 4: Resultados da solubilidade protéica e da digestibilidade de *Spirulina* “in natura” e seca nos dois tipos de secador de leite de jorro \_\_\_\_\_ 44

ARTIGO 3 – Determinação do conteúdo de ficocianina de *Spirulina platensis* seca em leite de jorro e em camada delgada

Tabela 1: Composição proximal da *Spirulina* “in natura” em base úmida \_\_\_\_\_ 50

Tabela 2: Valores médios para a solubilidade protéica da *Spirulina* por diferentes métodos de secagem \_\_\_\_\_ 56

Tabela 3: Conteúdo de ficocianina em *Spirulina* seca em diferentes métodos de secagem \_\_\_\_\_ 56

## **CAPÍTULO 6: ANEXOS**

Tabela A1: Dados experimentais da secagem de *Spirulina platensis* em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 50°C e carga na bandeja de 4 kg/m<sup>2</sup> (Ensaio 1) \_\_\_\_\_ 69

Tabela A2: Dados experimentais da secagem de *Spirulina platensis* em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 60°C e carga na bandeja de 4 kg/m<sup>2</sup> (Ensaio 2) \_\_\_\_\_ 70

Tabela A3: Dados experimentais da secagem de *Spirulina platensis* em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 50°C e carga na bandeja de 6 kg/m<sup>2</sup> (Ensaio 3) \_\_\_\_\_ 71

Tabela A4: Dados experimentais da secagem de *Spirulina platensis* em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 60°C e carga na bandeja de 6 kg/m<sup>2</sup> (Ensaio 4) \_\_\_\_\_ 72

Tabela A5: Relação da concentração de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> com umidade relativa a 50 e 60°C \_\_\_\_\_ 73

## NOMENCLATURA

$C_B$	Constante (Equação 1)	Adimensional
$C_G$	Constante (Equação 2)	Adimensional
$D_c$	Diâmetro da célula	m
$D_{EF}$	Difusividade efetiva de umidade	$m^2s^{-1}$
$d_i$	Diâmetro interno	m
$\frac{dX}{dt}$	Taxa de secagem	Adimensional
$F_o$	Número de Fourier, $F_o = \frac{D_{EF}t}{L_0^2}$	Adimensional
$H$	Altura do leito	M
$K$	Constante de secagem	$min^{-1}$
$L_0$	Comprimento inicial	m
$N$	Taxa de secagem por unidade de massa	$Kg.kg^{-1}$
$R$	Raio	m
$t$	Tempo	min
$v_{jmin}$	Velocidade de jorro mínimo	m/s
$v/v_{jmin}$	Relação entre as velocidades	Adimensional
$X$	Umidade (base seca)	$kg.kg^{-1}$
$\bar{X}$	Umidade média (base seca)	$kg.kg^{-1}$
$X_E$	Umidade de equilíbrio (base seca)	$kg.kg^{-1}$
$X_m$	Umidade da monocamada	$kg.kg^{-1}$
$X_0$	Umidade inicial (base seca)	$kg.kg^{-1}$
$\frac{\bar{X} - X_E}{X_0 - X_E}$	Adimensional de água livre	Adimensional
$z$	Coordenada espacial	m
Símbolos Gregos		
$\varepsilon$	Porosidade, $\varepsilon = 1 - \left( \frac{\rho_{AP}}{\rho_S} \right)$	Adimensional
$\phi$	Esfericidade	Adimensional

## RESUMO

A microalga *Spirulina platensis* tem sido comercializada e estudada pelo seu potencial nutricional devido ao seu elevado conteúdo de proteínas, pró-vitaminas e ácidos graxos insaturados; e também, por apresentar potencial terapêutico no tratamento de algumas doenças. Para preservar a *Spirulina* após a colheita e para sua incorporação no alimento, a mesma precisa ser submetida a uma operação de secagem. O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a secagem da microalga *Spirulina platensis* em camada delgada e em leito de jorro. Tendo como objetivos específicos avaliar a influência da temperatura, carga de amostra, tipo de geometria de leito de jorro e concentração de suspensão nas propriedades funcionais e conteúdo de ficocianina na biomassa seca em camada delgada e em leito de jorro. A matéria-prima utilizada foi cedida pelo Laboratório de Engenharia Bioquímica/DQ/FURG, extraída da Lagoa Mangueira localizada na região sul do Rio Grande do Sul. A biomassa foi filtrada e prensada até a umidade de 76% para a camada delgada, já para o leito de jorro a *Spirulina* foi diluída a diferentes concentrações. A microalga foi seca em um secador descontínuo de bandeja com escoamento perpendicular do ar, nas temperaturas de 50 e 60°C e carga na bandeja de 4 e 6 kg/m<sup>2</sup>. Foi utilizado o leito de jorro cone-cilíndrica tipo CSB e JSB, com taxa de alimentação de suspensão de 0,4 kg/h.kg de inerte, taxa de circulação de 1,8 e temperatura de saída de  $\pm 70^{\circ}\text{C}$ . Foram avaliadas a solubilidade protéica em meio aquoso e ácido, digestibilidade “*in vitro*” e o conteúdo de ficocianina da *Spirulina* in natura e após a secagem. Os resultados demonstram que a secagem de *Spirulina platensis* em camada delgada com escoamento perpendicular do ar ocorreu durante o período de taxa decrescente, não apresentando taxa constante. Para a solubilidade em meio ácido a temperatura e a carga de amostra foram significativas, sendo que a melhor região de trabalho foi de 60°C e 4kg/m<sup>2</sup>. O secador de leito de jorro teve um comportamento estável, não apresentando colapso nas condições operacionais. A concentração de suspensão de *Spirulina* 5% apresentou melhores resultados em relação a solubilidade protéica em meio aquoso e a digestibilidade “*in vitro*”. As duas técnicas de secagem apresentaram um aumento similar na solubilidade em meio aquoso. O secador de leito de jorro (CSB) apresentou maior recuperação de ficocianina quando comparado ao produto seco em camada delgada.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Spirulina platensis*, secagem, leito de jorro, camada delgada.

## ABSTRACT

Microalgae *Spirulina platensis* have been commercialized and studied by its nutritional potential because of its elevated content of proteins, pro-vitamins and fatty acids unsaturated; and also for present therapeutic potential in some diseases treatment. In order to preserve *Spirulina* after harvest and to vary its incorporation in food, it has to be submitted of a drying operation. The general aim of this study was to analyze the drying of the microalgae *Spirulina platensis* in thin layer and spouted bed. Having as specific aims to evaluate the temperature influence, sample load, spouted bed geometric and concentrations of suspension in functional properties and c-phycoyanin content at dry biomass in thin layer and spouted bed. Raw material used was given by Biochemical Engineering Laboratory/FURG, obtained from "Lagoa Mangueira" situated in the south of "Rio Grande do Sul". The biomass was filtered and pressed until moisture of 76% for thin layer experiment, for spouted bed *Spirulina* was diluted at different concentrations. The microalgae was dry in a discontinuous drier of trays with perpendicular air flow at temperatures of 50-60°C and load in tray of 4-6kg/m<sup>2</sup>. It was used the conical spouted bed (CSB) and jet spouted bed (JSB), with suspension feed rate of 0,4 kg/h.kg of inert, circulation rate of 1,8 and out temperature of ± 70°C. It were evaluated the protein solubility in water and acid, "in vitro" digestibility and c-phycoyanin content of *Spirulina in natura* and after drying. Results show that thin layer drying of *Spirulina platensis* with perpendicular air flow occurred during the falling-rate period, not showing constant-rate period. For the solubility in acid the temperature and sample load were significant, being that the best work region was 60°C and 4kg/m<sup>2</sup>. The spouted bed dryer had a stable behavior, not showing collapse at operational conditions. The suspension concentration of *Spirulina* 5% shows better results than the protein solubility in water and the in vitro digestibility. Both techniques of drying show a similar increasing at the water solubility. The spouted bed dryer (CSB) show a highest recuperation of c-phycoyanin when compared to the dry product in thin layer.

**Key-words:** *Spirulina platensis*, drying, spouted bed, thin layer.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. GENERALIDADES

Atualmente, dentro de um grande campo da biotecnologia, as microalgas tem sido objeto de inúmeros estudos em centros de pesquisa de diferentes países (Estados Unidos, Itália, Japão, França, Israel, Canadá, México e Austrália). O cultivo comercial de cianobactérias é realizado com várias finalidades, principalmente para aplicação em alimentos, devido ao alto teor de proteínas, em torno de 60-70%, ácidos graxos essenciais e de substâncias como vitaminas, sais minerais e pigmentos presentes em certas espécies (COZZA, 1999).

Segundo Henrikson, 1994, a composição química das cianobactérias é um indicativo de que estas são capazes de suprir as necessidades nutritivas, energéticas e até curativa de ser humano, com custo abaixo daqueles praticados nas culturas tradicionais.

A *Spirulina platensis* é uma cianobactéria muito conhecida e usada no planeta, já empregada na alimentação dos astecas que habitavam o México na região do Lago Texcoco, e dos sul-africanos na região do Lago Chad. Esses lagos são naturalmente alcalinos, propiciando o desenvolvimento dessa cianobactéria. A Lagoa Mangueira, que se localiza na região sul do estado do Rio Grande do Sul, apresenta altos níveis de carbonato e um pH alcalino, com características físico-químicas adequadas para o crescimento da *Spirulina*, por essa razão no município de Santa Vitória do Palmar foi construída uma planta-piloto para produção dessa cianobactéria. Os estudos relacionados ao cultivo da *Spirulina* aumentaram nos últimos anos, sendo uma boa fonte protéica, apresenta alta digestibilidade, sendo fonte inclusive de antioxidantes naturais e de ácido  $\gamma$ -linolênico (COZZA, 1999). A *Spirulina* é um complemento dietético, protéico e vitamínico com notáveis propriedades farmacológicas, atualmente, como alimento nutracêutico, é utilizada principalmente pelos consumidores de alimentos naturais, onde ela aparece como película seca ou em pó. O Laboratório de Engenharia Bioquímica/FURG esta realizando estudos com essa cianobactéria extraída da Lagoa Mangueira, no projeto de enriquecimento de alimentos.

A secagem é uma importante operação unitária na conservação de alimentos, pois tem a finalidade de reduzir a atividade de água e conseqüentemente a ação microbiana, reações enzimáticas do produto e aumentar o tempo de prateleira. A secagem de pastas é uma operação complexa devido a grande diversidade de tipo de pasta, com características distintas. Neste sentido, diversos trabalhos vêm sendo publicados, principalmente relacionados a industrialização de alimentos (FLORO, 2004).

A escolha de secadores simples, adequados ao material e de fácil controle é uma opção para minimizar custos de produção. Não existe um único equipamento que possa ser recomendado para a secagem de todos os tipos de materiais pastosos. A escolha da técnica a ser utilizada, para a secagem, esta diretamente relacionada as características do material a ser seco; cada pasta requer um estudo específico para destinação do método mais adequado para a sua secagem.

O estudo da secagem de materiais sólidos em camada delgada é utilizado para a determinação experimental dos parâmetros que caracterizam a operação, obtendo-se assim um melhor domínio do processo, como também um maior conhecimento dos fundamentos e mecanismos envolvidos. O conhecimento da umidade de equilíbrio, uma característica termodinâmica do sistema, é de grande importância para os processos de transformação, preservação e acondicionamento de produtos alimentícios, sendo necessário determinar o seu valor para a avaliação da cinética de secagem (BATISTA, 2004).

A técnica de leito de jorro desenvolvida inicialmente para a secagem de produtos granulares vem sendo aplicada entre outros na secagem de pastas (FREIRE, 1992; MEDEIROS, 2004; CORONEL, 2004) e no recobrimento de comprimidos (OLIVEIRA, 2004). Este secador tem-se mostrado uma boa alternativa ao secador spray, por fornecer produtos de qualidade similar, a custos significativamente inferiores (MEDEIROS *et al.*, 2004).

A área de Secagem do Laboratório de Operações Unitárias, do Departamento de Química/FURG, vem desenvolvendo há alguns anos pesquisas na área de secagem de alimentos de importância para a região utilizando como equipamento o leito de jorro. Em consequência disso, foi feita a secagem em leito de jorro e em camada delgada para a caracterização da secagem de *Spirulina*, e o estudo da influência das condições de secagem na qualidade do produto final.

## 1.2. JUSTIFICATIVAS

A desnutrição e a má nutrição são problemas preocupantes em países pobres e se espalham pelo mundo atingindo também países em desenvolvimento. A má nutrição se deve ao consumo de alimentos que não atendem as necessidades básicas do ser humano. Além disso, existe uma demanda crescente por alimentos funcionais a partir dos quais doenças são evitadas e tratadas.

Entre as cianobactérias a *Spirulina platensis* se destaca, devido principalmente a sua composição. O alto valor de proteínas, a presença de ácidos graxos poliinsaturados, como o  $\gamma$ -linolênico, pigmentos como  $\beta$ -caroteno e ficocianina, minerais e vitaminas, além de outros compostos fazem desta microalga a mais cultivada e estudada ao redor do mundo.

A *Spirulina* é um complemento alimentício de grande valor nutritivo, esta cianobactéria comestível que pode ser cultivada em regiões quentes, vem sendo utilizada como fonte de proteínas no enriquecimento de alimentos e também está sendo utilizada em pesquisas no exterior para combater a desnutrição de crianças e adultos em países pobres com sucesso.

O Laboratório de Engenharia Bioquímica da FURG está realizando estudos com essa cianobactéria no projeto de enriquecimento inúmeros alimentos. Este enriquecimento é feito com a cianobactéria seca e esta secagem atualmente é feita em camada delgada a uma temperatura de 60°C e 5 horas. Visando a melhoria da operação de secagem da *Spirulina*, em parceria com o Laboratório de Operações Unitárias, foi feito o estudo de duas técnicas de secagem (em leito de jorro e em camada delgada) para avaliar a operação verificando as características do produto final desidratado.

Como a *Spirulina* apresenta alto valor protéico, a utilização de altas temperaturas na secagem, poderia causar a desnaturação dessas proteínas além de degradar um importante pigmento, a ficocianina. Por se tratar de um produto com alto valor agregado e com pequena escala de produção, a secagem utilizando o leito de jorro se torna vantajosa por ser um equipamento de baixo custo operacional, pela produção em pequena escala e por trabalhar com maiores temperaturas obtendo um produto final com características semelhantes aos secadores tipo spray.

Existem poucos estudos referentes a secagem de cianobactérias, o que indica a necessidade de uma melhor avaliação deste método de preservação deste tipo de matéria-prima.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo Geral**

Analisar as condições operacionais de secagem de *Spirulina platensis* em camada delgada e em leito de jorro avaliando a solubilidade em meio ácido e em meio aquoso, digestibilidade “*in vitro*” e o conteúdo de ficocianina.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

Caracterizar a secagem em camada delgada da *Spirulina platensis* através de curvas características experimentais;

Definir as melhores condições para a secagem em camada delgada de *Spirulina platensis* utilizando planejamento experimental buscando como resposta a solubilidade protéica em meio ácido;

Avaliar as condições da operação de secagem de *Spirulina* em leito de jorro, definindo melhor geometria e concentração de suspensão em relação a solubilidade protéica em meio aquoso e a digestibilidade “*in vitro*”;

Comparar as duas técnicas de secagem em relação ao conteúdo de ficocianina e a solubilidade em meio aquoso.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Cianobactérias

As algas representam a terceira parte da biomassa terrestre, e hoje estão sendo identificadas como fonte de alimentos, produtos farmacêuticos, bioquímicos e fertilizantes. Possuem uma vasta quantidade de pigmentos, incluindo carotenóides, clorofila e ficobiliproteínas (HENRIKSON, 1994). As principais ficobiliproteínas são a ficocianina, a aloficocianina e a ficoeritrina (SARADA *et al.*, 1999).

As microalgas procarióticas recebem o nome de cianobactérias, antigamente chamadas algas. As estruturas celulares e o mecanismo para a fotossíntese nestes organismos são semelhantes aqueles dos vegetais (LEHNINGER *et al.*, 1995).

### 2.2. *Spirulina platensis*

A *Spirulina* é uma cianobactéria, chamada de *Arthrospira platensis* ou mais comumente chamada de alga azul-verde, apareceram na terra há 3500 anos atrás (DESMORIEUX, 2005).

A *Spirulina platensis* é uma cianobactéria que se destaca das demais devido seu conteúdo protéico que alcança em torno de 70% e por ser fonte de compostos biologicamente ativos como o ácido  $\gamma$ -linolênico, vitaminas e pigmentos. A *Spirulina* é formada por células dispostas ao longo de um filamento em espiral com até 1,0 mm de comprimento. Assim como as plantas verdes superiores, seu metabolismo principal é a fotossíntese, onde a fonte principal de energia é a luz solar (VONSHAK, 1997).



**Figura 1:** Microalga *Spirulina platensis* ao microscópio.

**Fonte:** COUGO, 2001.

A relação entre as algas e o homem vem de origem longínqua quando as mesmas eram usadas em sopas, temperos e molhos, constituindo-se de importante fonte de nutrientes e vitaminas (COZZA, 1999).

*Spirulina* é um alimento tradicional nas populações mexicanas e africanas e é encontrada em águas alcalinas de lagos vulcânicos. Esta cianobactéria possui um conteúdo de aminoácidos de cerca de 62% e é a maior fonte mundial de vitamina B<sub>12</sub>. Atualmente tem merecido maior atenção em função de suas várias propriedades nutricionais e medicinais (ESTRADA *et al.*, 2001). O fato da *Spirulina* crescer em lagos alcalinos, onde outros microrganismos tem pouca ou nenhuma chance de sobrevivência, torna seu uso seguro pelas escassas possibilidades de contaminação (COZZA, 1999).

O alto conteúdo em vitaminas, sais minerais, lipídios, e em especial proteína, associados à diversidade de meio ambiente onde cresce faz com que a *Spirulina platensis* seja a cianobactéria mais estudada no mundo.

O meio padrão para cultivo de *Spirulina* foi desenvolvido por Zarrouk (1996) e fornece entre outros nutrientes, carbono inorgânico na forma de CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> e HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, que se convertem em CO<sub>2</sub> utilizado na fotossíntese. Sabe-se que a fonte de carbono constitui um dos maiores componentes de custo para a produção de *Spirulina* e estudos concluíram estar o meio Zarrouk exclusivamente concentrado em nutrientes, de modo que se abre uma possibilidade de redução de custos de produção de cianobactérias. A *Spirulina*, ao contrario de outras cianobactérias, apresenta baixa susceptibilidade a contaminação de seus cultivos por outros microrganismos devido ao seu alto pH, em que se desenvolve, de modo que os fotobiorreatores (FBRs) para cultivo podem ser abertos, sendo geralmente na forma retangular com cantos arredondados. A temperatura ótima de crescimento da *Spirulina* oscila em torno de 35°C (VONSHAK, 1997).

A Figura 2 mostra os fotobiorreatores construídos para a produção da *Spirulina platensis* pelo Laboratório de Engenharia Bioquímica da FURG.



**Figura 2:** Fotobiorreatores abertos onde é realizado o cultivo de *Spirulina platensis* localizados no Laboratório de Engenharia Bioquímica da FURG.

### 2.2.1. Composição da *Spirulina platensis*

Quanto a seus constituintes, *Spirulina* é altamente protéica, e seu conteúdo seco, esta apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1:** Composição centesimal de *Spirulina* seca.

Componente	Quantidade (%)
Proteínas e aminoácidos	65
Carboidratos	20
Minerais	7
Lipídios	5
Umidade	3

FONTE: HENRIKSON (1994).

A composição de pigmentos de *Spirulina* é típica de uma cianobactéria, a única clorofila presente é a clorofila-a, que tem seu peso variando entre 0,8 e 1,5% do peso seco. As proteínas que possuem maior potencial econômico são as biliproteínas. *Spirulina* possui duas biliproteínas: c-ficocianina e aloficocianina. A fração protéica pode conter mais de 20% de ficocianina, um pigmento azul solúvel em água (VONSHAK, 1997).

### 2.2.2. Utilização da *Spirulina*

O cultivo comercial de cianobactérias é realizado para diversas finalidades, principalmente aplicação em alimentos ou rações animais, devido ao seu alto teor de proteínas, vitaminas, sais minerais, lipídios e pigmentos. A *Spirulina* está legalmente autorizada como alimento ou complemento alimentar na Europa, Japão e costa asiática do Pacífico. Nos Estados Unidos, a FDA (Food and Drug Administration) determinou, em 1981, que a *Spirulina* constitui-se fonte de proteínas e contém várias vitaminas e minerais, podendo ser comercializada legalmente como complemento alimentício (HENRIKSON, 1994).

As principais exigências para que microrganismos possam ser usados em alimentação humana são: composição adequada, em relação a concentração e qualidade dos nutrientes; ausência de substâncias tóxicas e/ou alérgicas; palatabilidade (SGARBIERI, 1996).

A Tabela 2 apresenta os teores de nutrientes de três microrganismos de espécies diferentes comparados com carne, milho, trigo e soja.

**Tabela 2:** Teores de proteínas, lipídios, carboidratos e cinzas de três espécies de microrganismos e de quatro alimentos convencionais (em base seca).

Fonte protéica	Proteína (%)	Lipídios (%)	Carboidrato (%)	Cinzas (%)
Carne bovina	57,1	37,1	2,0	3,1
Milho	11,2	3,9	85,2	1,3
Trigo	13,6	1,5	84,1	1,4
Soja	46,7	7,1	40,9	5,3
<i>Bacillus subtilis</i>	63,1	4,4	2,1	9,9
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	37,1	2,1	39,4	8,2
<i>Spirulina máxima</i>	65,0	2,0	20,0	5,1

FONTES: SGARBIERI, 1996.

Do ponto de vista da composição o que caracteriza os organismos unicelulares é o seu elevado teor de proteína, 40-70%, elevado conteúdo de ácidos nucleicos e elevada concentração de algumas vitaminas do complexo B. Um dos fatores que limitam a utilização de microrganismos é a baixa digestibilidade das células em muitas linhagens (SGARBIERI, 1996).

As cianobactérias são uma alternativa potencialmente capaz de contribuir com a resolução da demanda de nutrientes, elas são fontes de compostos como corantes naturais, farmacêuticos, podem ser utilizados na aquicultura, no sequestro de CO<sub>2</sub> da atmosfera e alguns estudos já tem aplicado estes microrganismos na produção de biodiesel, entre outras aplicações.

Atualmente, a *Spirulina*, como alimento nutracêutico, é utilizada principalmente pelos consumidores de alimentos naturais, onde ela aparece como uma película grossa seca ou em pó, sendo muitas vezes o único ingrediente no preparo dos pratos. Alguns produtos inovam ao produzir gomas de mascar flavorizadas com laranja e coloridas com *Spirulina*; proteínas em pó que recebem adição de 10% de *Spirulina* uma a base de soja e outra a base ovos e leite; e a “Pastaliana” macarrão de soja com trigo integral corado com *Spirulina* (RICHMOND, 1990 *apud* COZZA, 1999).

No Brasil, a *Spirulina* tem sido empregada, basicamente, na produção de cápsulas de destinadas a dieta de emagrecimento. De acordo com os fabricantes, o efeito de controlar o apetite ocorre se ingerida uma ou duas horas antes da refeição, devido a presença dos aminoácidos essenciais em quantidades balanceadas, bem como sua composição rica em proteínas (HENRIKSON, 1994).

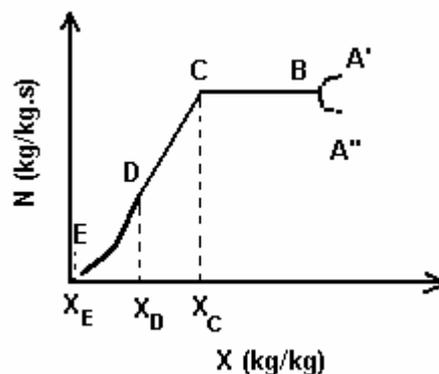
A *Spirulina* tem sido utilizada para o enriquecimento protéico de alimentos e a elaboração de novos produtos. Em um estudo neste sentido, Morist *et al.*, 2001, elaboraram um produto líquido e um seco a base de *Spirulina platensis*, com o propósito de servir de alimento para homens em viagens espaciais, levando em consideração seu potencial nutricional, visto que é rica em proteínas e não possui substância tóxicas.

## 2.3. SECAGEM

### 2.3.1. Definições e Considerações gerais

A secagem é definida, geralmente, como a remoção de líquido de um sólido por evaporação. Nos processos de secagem, o material úmido está em contato com o ar insaturado e se obtém como resultado a diminuição de o conteúdo de umidade deste material e a umidificação do ar. Tendo-se assim, dois estágios que definem o processo total de secagem: o aquecimento do material e a evaporação de umidade deste. Então a secagem tem por finalidade a redução da umidade de um produto a um nível desejado (STRUMILLO & KUDRA, 1986).

De acordo com o apresentado na literatura por McCormick (1983), a secagem pode ser dividida em período de taxa constante de secagem e período de taxa decrescente de secagem, de acordo com a Figura 3.



**Figura 3:** Curva da taxa de secagem em função da umidade.

FONTE: Strumilo & Kudra, 1986.

Os segmentos A''-B e A'-B, apresentados na Figura 3, representam os intervalos de aquecimento ou resfriamento do material (estabilização entre a temperatura do sólido e a de bulbo úmido do ar de secagem).

No ponto A'' da Figura 3, o sólido encontra-se a uma temperatura inferior ao do ar de secagem. Tal situação apresenta comportamento inverso para o ponto A', no qual o sólido apresenta temperatura superior.

Observando a Figura 3, verificam-se os dois períodos de secagem:

**a) Período de taxa constante de secagem:** é o representado pelo segmento B-C na Figura 3. No período de taxa constante, a superfície do material é mantida num nível de umidade tal que a secagem ocorre como se fosse água pura evaporando. Se o sólido for poroso, a maioria da água evaporada no período de taxa constante é proveniente do interior do sólido. Este período só continua desde que a água seja provida à superfície tão rápido quanto é evaporada (GEANKOPLIS, 1983).

Na secagem de alimentos, o período de taxa constante só tem relativa importância quando o teor de umidade inicial do sólido é muito alto ou quando o potencial de secagem do ar é muito baixo. Neste período o material está a temperatura de bulbo úmido do ar (CHIRIFE, 1983). As resistências à transferência de calor e massa são ocasionadas somente na corrente de ar, assim a taxa de evaporação de água não muda com o tempo. O fim da taxa constante ocorre quando a migração interna de água para superfície não consegue mais suprir a taxa de evaporação da água livre de superfície. O valor da umidade deste ponto é denominado umidade crítica ( $X_c$ ). Os valores de umidade crítica não são somente característicos de cada material alimentício, mas também depende de outros fatores que controlam a migração (interna/externa) tais como espessura do material e condições do ar ( $v_{ar}$ ,  $T_{BS}$ , %UR) (CHIRIFE, 1983).

**b) Período de Taxa Decrescente de Secagem:** este período compreende o intervalo C-E, sendo geralmente dividido em duas fases.

O período de taxa decrescente de secagem se caracteriza por apresentar ou não duas fases bem diferenciadas num determinado tempo. Surgindo uma ou mais quebras, ou mudanças na inclinação, chamadas de transição. Esta transição normalmente não ocorre em muitos processos industriais, os quais se limitam ao período de taxa constante e a primeira fase do período de taxa decrescente (PERRY, 1980).

Este período ocorre quando a migração interna de água começa a controlar o processo de secagem, e pode ser constituído de duas etapas. Na primeira fase (intervalo C-D) do período de taxa decrescente da secagem de alimentos sólidos, os principais mecanismos de transporte sugeridos são: escoamento capilar, difusão de líquido e difusão de vapor, podendo acontecer transporte por diversos mecanismos simultaneamente. Na segunda fase deste período (intervalo D-E), a difusão de vapor é, provavelmente, o mecanismo predominante de transporte de umidade (PINTO e TOBINAGA, 1992).

No ponto E da Figura 3, é alcançada a condição de equilíbrio entre a umidade do material e a umidade relativa do ar de secagem.

### 2.3.1.1. Umidade de Equilíbrio

Em muitos materiais úmidos existe uma relação entre a umidade do material,  $X_E$ , base seca, e a umidade relativa do ar, UR (ROTSTEIN & CORNISH, 1978). As isotermas de equilíbrio (ou sorção) representam a relação entre umidade relativa do meio e a umidade do alimento, a certa temperatura. As isotermas podem representar a perda (dessorção) ou o acréscimo (adsorção) de umidade do material em função da umidade relativa do meio em que se encontra (PEZZUTI & CRAPISTE, 1997; FENNEMA, 1993).

A determinação das isotermas de sorção de um material pode ser efetuada quanto à variação de umidade do material ou meio em que este se encontra, através do método gravimétrico (variação de massa do material) e do método higrométrico (variação da umidade do ar ambiente). Tais métodos podem ainda apresentar uma variante em relação à movimentação do ar ambiente, podendo ser: o estático, no qual o ar que circunda o material está sob condições estáticas; ou dinâmico, no qual o fluido gasoso está sendo movimentado mecanicamente.

A literatura apresenta diversas correlações para a previsão da umidade de equilíbrio dos alimentos, baseados nos resultados das curvas experimentais, cujo comportamento apresenta a forma sigmoideal (MIR & NATH, 1995).

A mais conhecida isoterma de sorção Brunauer, Emmett e Teller (BET) era o modelo que tinha a melhor aplicação em sorção de água em alimentos e produtos alimentícios (LABUZA, 1968), entretanto era sabido que considerava apenas uma faixa limitante de umidade relativa, apenas 30 a 40%. A Equação do modelo de BET está representada na Equação 1.

A equação de isotermas de Guggenheim, Anderson e de Boer (GAB), Equação 2, tem sido largamente usada para descrever a maneira de sorção de alimentos (IGLESIAS & CHIRIFE, 1995).

$$X_E = \frac{X_m * C_B * UR}{(1-UR)(1-UR + C_B * UR)} \quad (1)$$

$$X_E = \frac{X_m * C_G * k UR}{(1-k*UR)(1-k*UR + C_G * k*UR)} \quad (2)$$

### 2.3.1.2. Cinética de secagem: Correlação Empírica

Uma importante correlação na secagem, principalmente de alimentos, é a lei exponencial (BALA & WOODS, 1992), que estabelece a taxa de secagem sendo proporcional ao teor de água livre do gênero alimentício na forma:

$$\frac{dx}{dt} = K(X - X_E) \quad (3)$$

Onde o fator de proporcionalidade é denominado constante de secagem (K). Esta equação é uma expressão análoga à lei de resfriamento de Newton. Esta Equação (3) é normalmente utilizada na forma integrada, a dois parâmetros e a partir dela calculamos a constante de secagem (K), conforme a Equação 4.

$$\frac{\bar{X} - X_E}{X_0 - X_E} = a \cdot \exp(-Kt) \quad (4)$$

Os modelos onde existe solução analítica no que se refere à formulação difusiva ocorrem quando a difusividade efetiva de massa é constante e tornando desprezíveis os efeitos da resistência externa, impondo  $v_{ar}$  superior a 1,0m/s sobre a superfície do material e processo quase isotérmico, pelo fato da distribuição interna de temperatura nos alimentos ser considerada uniforme ( $Biot \leq 0,1$ ) eliminando assim do modelo a equação de calor.

$$\frac{dX}{dt} = Def \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad 0 < z < L_0, t > 0 \quad (5)$$

Com as seguintes condições:

$$\text{Condição Inicial:} \quad t = 0; 0 < z < L_0 \Rightarrow X = X_0 \quad (3-a)$$

$$\text{Condição de Contorno 1:} \quad z = 0; t > 0 \Rightarrow (\partial X / \partial z) = 0 \quad (3-b)$$

$$\text{Condição de Contorno 2:} \quad z = L_0; t > 0 \Rightarrow X = X_E \quad (3-c)$$

Assumindo distribuição da umidade inicial uniforme através do cálculo das médias de volume, temos:

$$\frac{\bar{X} - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_0^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\left(n + \frac{1}{2}\right)^2 \cdot \pi^2 \frac{Def \cdot t}{L_0^2}\right] \quad (6)$$

Para tempos longos de secagem ( $Fo > 0,2$ ) a equação anterior reduz-se a:

$$\frac{\bar{X} - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{-\pi^2 \cdot Def \cdot t}{4L_0^2}\right) \quad (7)$$

Esta equação é similar a da correlação exponencial a dois parâmetros, substituindo a Equação 7 na Equação 4, pode-se calcular a difusividade efetiva de umidade, através da Equação 8.

Lamina (considerando secagem por um lado):

$$Def = \frac{K \cdot (4 \cdot L_0^2)}{\pi^2} \quad (8-a)$$

Esfera:

$$Def = \frac{K \cdot (R_0^2)}{\pi^2} \quad (8-b)$$

A Equação 8 relaciona a constante de secagem (K) com a difusividade efetiva de umidade (Def), por analogia com a solução da 2ª Lei de Fick para tempo de secagem longo.

### 2.3.2. Secagem em Leito de Jorro

A técnica do leito de jorro conforme foi apresentado por Freire (1992) foi estabelecida inicialmente por Gishler e Mathur em 1955, visando a secagem de trigo. Atualmente ocupa um lugar relevante nas operações envolvendo contato entre partículas sólidas e fluidos.

Aplica-se eficientemente à secagem de cereais, granulação, recobrimento de partículas, cristalização, reações químicas e ultimamente, a secagem de pastas e suspensões. Segundo MASSARANI (1997) o sistema de secagem de leito de jorro é mais eficientemente aplicável a grãos.

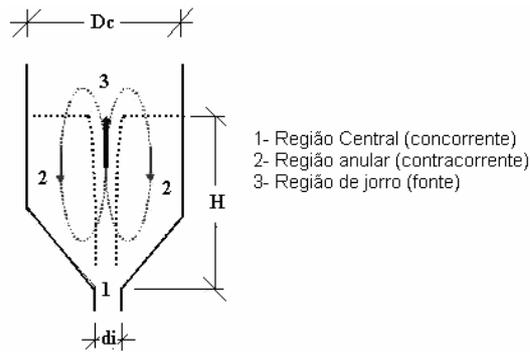
O regime do jorro é estabelecido em um leito de partículas através da injeção de um fluido por um orifício cujo diâmetro é reduzido em relação ao diâmetro do leito, ocorrendo a formação de canal preferencial como consequência das regiões distintas:

a) Região central (canal preferencial): ocorre o transporte pneumático das partículas devido à grande velocidade do fluido.

b) Região de jorro (fonte): região acima do leito onde as partículas advindas da região central movimentam-se em regime desacelerado, como em uma fonte, caindo na região anular.

c) Região anular (deslizante): nesta região as partículas caem da região de jorro e deslizam para baixo, operando como um leito deslizante.

Muitos autores, no entanto, definem como região de jorro ao conjunto região central – região de jorro.



**Figura 4:** Diagrama esquemático de um leito de jorro tronco cone-cilíndrico (CSB).

FONTE: FREIRE, 1992.

Segundo Mathur e Epstein, 1974, existem basicamente três geometrias de secadores de jorro: a cônica, a cone-cilíndrica e a retangular. Nem todo leito de jorro apresenta as três regiões mostradas na Figura 4 bem definidas.

Os secadores de jorro dividem-se em dois grupos principais: o JSB (Jet Spouted Bed) e o CSB (Conventional Spouted Bed). A diferença entre estes dois grupos está no diâmetro de entrada, que para o JSB é superior, e na porosidade do leito ( $\epsilon$ ), que para o CSB é inferior a 85% e para o JSB é superior. A estabilidade de um leito de jorro depende das dimensões do leito e das propriedades das partículas. Para cada tipo de partícula e cada leito de jorro é possível determinar experimentalmente o seu diagrama de fase. Existem inúmeras correlações para a previsão da perda de carga no jorro estável. Do ponto de vista fluidodinâmico, os principais parâmetros ligados ao projeto de secador de leito de jorro são: a perda de carga no leito, em função da vazão de fluido, a perda de carga máxima, a perda de carga no jorro estável, a velocidade de jorro mínimo e a altura máxima de jorro estável. Além destes parâmetros, é conveniente ter-se uma idéia do perfil de velocidade do gás no leito, do movimento das partículas e de sua circulação (FREIRE, 1992).

Velocidade de Jorro Mínimo: Pode-se definir o jorro mínimo como sendo o jorro que ocorre com menor velocidade superficial do qual o jorro ainda existe. Este parâmetro depende da geometria do sistema bem como das características físicas do fluido e das partículas.

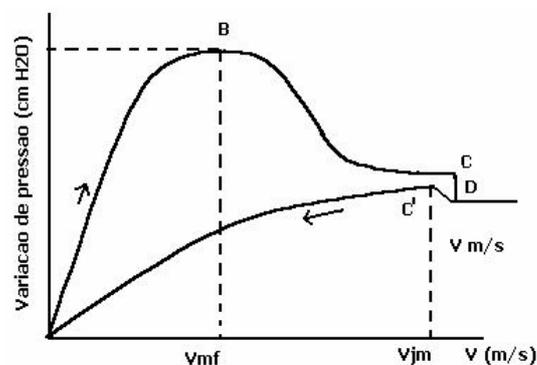
Altura de Jorro Estável: Define-se como a altura máxima de jorro estável, a altura de leito que qualquer valor superior a ela prejudicaria a estabilidade do jorro. A importância desta informação está no fato de poder estimar a quantidade total de material que será processada em cada corrida de um determinado equipamento.

Perda de Carga no Jorro Estável: É a queda de pressão que ocorre durante o funcionamento estável do leito. A estabilidade de um leito de jorro depende das dimensões do leito e das propriedades das partículas.

Queda de Pressão Máxima: É a perda que ocorre um pouco antes do jorro ser estabelecido. Esta perda de carga, juntamente com o valor da velocidade de jorro mínimo, fornece dados necessários para a especificação do soprador.

Para determinar as características de cada equipamento de secagem em particular, é necessário fazer-se uso da curva fluidodinâmica característica, que é uma representação gráfica da relação entre a velocidade de escoamento do fluido de secagem e a perda de carga na célula de secagem.

A Figura 5 apresenta uma curva fluidodinâmica genérica característica com a perda de carga no leito em função da velocidade.



**Figura 5:** Curva fluidodinâmica genérica – Perda de Carga x Velocidade.

FONTE: FREIRE, 1992.

Segundo Freire (1992) analisando-se a curva da figura 5 pode-se notar os seguintes destaques: ponto B onde ocorre a velocidade de mínima fluidização ( $v_{mj}$ ) e a de pressão máxima ( $\Delta P_m$ ), ponto C é o ponto de fluidização incipiente, o ponto D é o ponto de início do jorro e o ponto C' representa as condições mínimas de velocidade ( $v_{jm}$ ) para existir o jorro.

Apesar dos inúmeros trabalhos publicados, a secagem de pastas ainda é uma arte, uma vez que esta é uma operação extremamente complexa devido a grande diversidade de tipo de pastas, com características bastante distintas. A escolha da técnica a ser utilizada, para a secagem, esta diretamente relacionada às características do material a ser seco, cada pasta requer um estudo mais específico para a determinação do método mais adequado para a secagem (FREIRE, 1992).

O leito de jorro com partículas inertes é usado como secador de pastas devido, principalmente, ao grande grau de mistura das partículas, ao efetivo contato entre fluido e partículas sólidas, que proporciona altas taxas de transferência de calor e de massa, e a alta energia e número de colisões entre as partículas (SPITZNER, 2002).

As principais características físicas do material a ser seco são suas propriedades físicas e reológicas e sua resistência térmica. Assim como a pasta é encontrada em diversas formas, o produto final também. A forma final pode variar desde um pó finamente disperso (partículas de tamanho menores do que 10  $\mu\text{m}$ ), pós granulados grosseiros (partículas com tamanho entre 10-200  $\mu\text{m}$ ), grânulos (partículas entre 0,2-5 mm) até pós aglomerados (FREIRE, 1992).

O grande número de variáveis envolvidas na caracterização da pasta e a grande variação de granulométrica do produto final implicam na possibilidade de um grande número de tipos de secadores a serem utilizados. Segundo a literatura, o leito de jorro cônico pode ser modelado como se possuísse vários segmentos, onde cada seguimento se comporta como um leito fluidizado, exceto o segmento que se localiza próximo do orifício de entrada de ar do leito, orifício inferior. A secagem em leito de jorro acrescido de inertes gera produtos em pó de alta qualidade, utilizando equipamento de menor custo do que secadores do tipo spray (PHAM, 1983).

Diversos trabalhos apresentados na literatura utilizam o leito de jorro para a secagem e enriquecimento de produtos alimentícios: como sangue (PHAM, 1983); secagem de plasma bovino, (GOULART, 2000); enriquecimento de farelo de arroz desengordurado com sangue bovino (MASSARO, 2002); secagem de polpa de frutas, (LIMA, 2002); gêneros alimentícios e fitofarmacêuticos (PEIXOTO, 2004).

### **2.3.3. Secagem em Camada Delgada**

Na secagem em camada delgada a variação da temperatura ao longo do leito dos sólidos é bastante reduzida, considerando-se assim um processo no qual a temperatura varia somente no tempo, e não na posição (CHIRIFE, 1983).

Os modelos obtidos a partir da secagem em camada delgada contribuem efetivamente para o conhecimento das características da secagem dos materiais. Os modelos de secagem em camada delgada, podem ser distribuídos em três categorias principais, modelos teóricos, semi-teóricos e empíricos (LAHSASNI *et al.*, 2003).

A literatura tem mostrado vários estudos relacionados a secagem em camada delgada. Produtos com filés de pescado, cebola, frutas, quitosana, vegetais (TOBINAGA e PINTO, 1992; KARATHANOS, 1996; DANDAMRONGRAK, 2002; TOGRUL, 2004; MARTINS, 2004; BATISTA, 2004). Entretanto, há poucos estudos referentes a secagem de cianobactérias, o que indica a necessidade de mais pesquisas para avaliar esse método de preservação desse tipo de material.

#### 2.3.4. Secagem de cianobactérias

A operação de secagem é comumente utilizada para prolongar a vida útil de biomassas microbianas, especialmente se a biomassa é o produto final. Neste sentido, métodos de secagem têm sido extensivamente utilizados para a secagem de biomassas, incluindo spray dryer, secador de tambor, liofilizadores e ainda secagem ao sol (MORIST *et al*, 2001).

DESMORIEUX, 2005, estudou a secagem de *Spirulina platensis* em secadores convectivos após a filtração da biomassa como uma alternativa frente a secagem por spray dryer, devido ao baixo custo e facilidade operacional.

A liofilização pode ser considerada como um método de secagem de referência para cianobactérias, devido ao produto sofrer mínimas alterações em suas propriedades nutricionais, sensoriais e físico-químicas, o produto liofilizado é o que mais se assemelha a biomassa fresca (MORIST *et al*, 2001).

NAYLOR *et al*, 1993, descrevem que a secagem por liofilização da microalga *Chlorella vulgares* afeta a composição celular da biomassa, já que a operação pode causar as alterações na composição bioquímica das células.

Secadores industriais vêm sendo utilizados na secagem de cianobactérias. SARADA *et al*, 1999, relatam que diversas técnicas de secagem são utilizadas na secagem de *Spirulina*, incluindo spray dryer e secadores convectivos, os quais resultam na perda de aproximadamente 50% da ficocianina presente na biomassa.

# ARTIGO 1 – CARACTERIZAÇÃO DA SECAGEM DE *Spirulina platensis* EM CAMADA DELGADA UTILIZANDO ESCOAMENTO PERPENDICULAR DO AR

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi caracterizar e definir as melhores condições para a secagem em camada delgada de *Spirulina platensis*, utilizando secador de funcionamento descontínuo com escoamento perpendicular do ar. Os fatores de estudo foram a temperatura do ar e a carga de sólidos na bandeja, obtendo-se como resposta a solubilidade protéica em meio ácido. A isoterma de *Spirulina* foi determinada utilizando correlações de GAB e BET. A análise de regressão não linear dos dados das isotermas verificou que a equação que melhor ajustou estes dados foi a de GAB, em ambas as temperaturas de secagem. A taxa decrescente foi o período controlador da secagem de *Spirulina*. Para a resposta solubilidade em meio ácido a temperatura e a carga foram os efeitos significativos a ao nível de 95%, sendo os melhores resultados na região de trabalho de 60°C e 4 kg/m<sup>2</sup>.

**Palavras-chave:** *Spirulina*, solubilidade, secagem, isotermas, difusividade efetiva.

## 1. INTRODUÇÃO

Dentre os nutrientes que compõe a biomassa seca da cianobactéria *Spirulina platensis*, vários são os que apresentam importância por suas propriedades nutricionais, nutracêuticas e comerciais, dentre os quais estão proteínas e aminoácidos, os pigmentos e os ácidos graxos poliinsaturados (COLLA, 2002).

Na produção comercial de *Spirulina platensis*, a secagem é a operação de maior dispêndio econômico, constituindo cerca de 30% do custo total de produção. A técnica usualmente utilizada é a secagem em spray dryer, onde se obtém um produto na forma de pó. No entanto, estudos têm sido realizados para a secagem da biomassa em secadores de tambor, obtendo-se um produto na forma de flocos e com consistência para ser utilizado em demanda comercial (RICHMOND, 1994).

A umidade de equilíbrio determina o conteúdo de umidade que um material pode ter em relação à umidade relativa do meio em que se encontra. As isotermas de sorção representam a relação entre a atividade de água ou a umidade relativa do meio e o conteúdo de umidade do alimento em equilíbrio, a uma certa temperatura. As isotermas podem representar a perda (dessorção) ou o acréscimo (adsorção) de umidade do umidade em função da umidade relativa do meio em que se encontra ou da atividade de água deste (PEZZUTI & CRAPISTE, 1996; FENNEMA, 1985). A literatura apresenta diversas

correlações para a previsão da umidade de equilíbrio dos alimentos, baseados nos resultados das curvas experimentais, cujo comportamento apresenta a forma sigmoideal (MIR & NATH, 1995). As equações de isotermas mais conhecidas para alimentos são Brunauer, Emmett e Teller (BET) e Guggenheim, Anderson e de Boer (GAB).

Segundo TIMMERMANN *et al.* (2001) os valores das equações de GAB (Equação 2), são mais gerais e tem mais significado físico e que os dois parâmetros de BET (Equação 1), podem ser calculados em termos dos três parâmetros de GAB.

$$X_E = \frac{X_m * C_B * UR}{(1-UR)(1-UR + C_B * UR)} \quad (1)$$

$$X_E = \frac{X_m * C_G * k * UR}{(1-k*UR)(1-k*UR + C_G * k * UR)} \quad (2)$$

O estudo da secagem de alimentos em camada delgada é utilizado para a determinação experimental dos parâmetros que caracterizam a operação, obtendo-se assim um melhor domínio do processo, como também, um maior conhecimento dos fundamentos dos mecanismos envolvidos (BALA e WOODS, 1992; PINTO e TOBINAGA, 1992).

Na secagem em camada delgada a variação da temperatura ao longo do leito de sólidos é bastante reduzida, considerando-se assim um processo no qual a temperatura varia somente no tempo, e não na posição (CHIRIFE, 1983).

Uma importante correlação na secagem de alimentos é a lei exponencial (BALA e WOODS, 1992), esta lei estabelece que a taxa de secagem é proporcional ao teor de água livre do gênero alimentício na forma apresentada na Equação 3:

$$\frac{dX}{dt} = -K(\bar{X} - X_E) \quad (3)$$

A Equação 3 é normalmente utilizada na forma integrada, com os limites de integração, no tempo igual a zero a umidade do material é igual a  $X_0$  e no tempo igual a  $t$  a umidade é  $X$ , com dois parâmetros, resultando na Equação 4:

$$\left( \frac{\bar{X} - X_E}{X_0 - X_E} \right) = A \exp(-K t) \quad (4)$$

O cálculo da difusividade efetiva de umidade é realizado segundo uma analogia da segunda lei de Fick com a Equação 4 para tempos longos de secagem ( $Fo > 0,2$ ),

considerando a difusividade efetiva de umidade e a espessura constantes e secagem por um lado (Equação 5) (CHIRIFE, 1983).

$$D_{ef} = \frac{K \cdot 4L_0^2}{\pi^2} \quad (5)$$

Esfera:

$$D_{ef} = \frac{K \cdot R_0^2}{\pi^2} \quad (6)$$

Desmorieux e Decaen (2005) reportam a possibilidade da secagem da microalga *Spirulina* em secadores convectivos após a filtração da biomassa como alternativa frente a secagem por spray dryer, devido ao baixo custo e facilidade operacional.

A avaliação das propriedades funcionais de alimentos protéicos é um fator relevante no desenvolvimento de ingredientes protéicos a serem utilizados na formulação de alimentos. As propriedades funcionais são alteradas em grande parte pelas condições de processamento em que foi submetido o produto. A solubilidade de uma proteína é de grande importância na formulação de produtos alimentícios, para que ocorra desta forma a interação da proteína com os outros ingredientes, de maneira a contribuir para a formação de textura nos alimentos (KRÜGER *et al.*, 2002).

Os objetivos deste trabalho foram a caracterização e a determinação das melhores condições para a secagem em camada delgada de *Spirulina platensis*, sendo a variável resposta solubilidade protéica em meio ácido.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

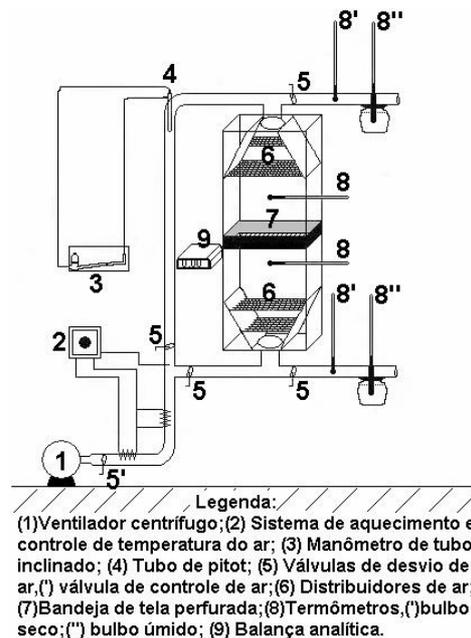
### 2.1. Matéria-prima

A matéria-prima utilizada foi a cianobactéria *Spirulina platensis*, cedida pelo laboratório de Engenharia Bioquímica/FURG. A cianobactéria foi cultivada na planta piloto, localizada no município de Santa Vitória do Palmar/RS. A matéria-prima foi filtrada e prensada até a umidade de 76%.

### 2.2. Equipamento de secagem

Foram realizados os ensaios de secagem de *Spirulina* em camada delgada, utilizando o equipamento apresentado na Figura 1 (ver anexo A6), sendo a bandeja de

forma retangular (19 cm de largura e 25 cm de comprimento), onde as condições do ar de secagem foram: temperaturas de 50 e 60°C e a velocidade do ar de 1,5m/s.



**Figura 1:** Esquema do secador descontínuo de bandejas com escoamento perpendicular do ar.

### 2.3. Procedimento experimental da Secagem

A secagem de *Spirulina* foi realizada com as amostras na forma de pellets cilíndricos longos (com comprimento igual ao da bandeja) com diâmetro de 3 mm e esfericidade ( $\phi$ ) igual a 0,6. A massa das amostras foi medida em uma balança eletrônica com precisão de 0,01g. As temperaturas de bulbo seco antes e depois da bandeja e a temperatura de bulbo úmido na saída do secador foram medidas através de termopares (cobre-constantan), utilizando um milivoltímetro com precisão de 1,0°C. A carga da bandeja e a temperatura de secagem tinham valores determinados pela matriz do planejamento experimental, segundo a Tabela 1. Foram anotados os valores de massa e temperatura a cada 5 min, durante os ensaios de secagem. As amostras foram secas até a umidade abaixo de 10%.

A umidade de equilíbrio das amostras foi determinada por isotermas, nas temperaturas de 50 e 60°C. Foi utilizado o método gravimétrico estático, com o uso de soluções ácidas em diferentes concentrações, garantindo uma variação de umidade relativa de 5,5 a 89%. As amostras permaneceram em ambiente hermético, com temperatura controlada, por 14 dias até atingir peso constante, cujas pesagens ocorreram no primeiro, sétimo e décimo quarto dias.

## 2.4. Metodologia analítica

Determinou-se a composição proximal da *Spirulina* através dos métodos analíticos de N-total, umidade, cinzas e lipídios, segundo as normas analíticas da A.O.A.C (1995). A composição de carboidratos foi feita por diferença.

Realizou-se a análise de solubilidade em meio ácido pelo método MORR (1985) no produto final desidratado. Adicionou-se à aproximadamente 2,5g de *Spirulina* em 50mL de ácido clorídrico 0,1N, a seguir levou-se ao agitador magnético por 15 minutos e posterior centrifugação a 3500 rpm por 15 minutos. Após a centrífuga, filtrou-se o conteúdo dos tubos, e procedeu-se a determinação de proteína do sobrenadante por Micro Kjeldahl, com fator de conversão de 6,25. O índice de proteína solúvel foi determinado sobre o conteúdo total de proteína das amostras e o teor de proteína solúvel.

## 2.5. Procedimento de cálculo

Os períodos da operação de secagem foram analisados através das curvas de secagem da umidade adimensional das amostras ( $\bar{X}/X_0$ ) em função do tempo de secagem. O período de taxa constante foi determinado pela secção das curvas de secagem da umidade, onde a declividade se mantinha constante, enquanto que o período de taxa decrescente foi analisado observando as mesmas curvas, porém, em escala semi-log.

Obteve-se o valor da constante de secagem (K) com a curva do adimensional de água livre em função do tempo de secagem, utilizou-se a Equação 4, que é análoga a Equação 3 ajustada a dois parâmetros. Fez-se a regressão não linear usando o método Quasi-Newton do software STATISTICA FOR WINDOWS. A partir dos valores de K calculados, através da Equação 4, obteve-se a difusividade efetiva de umidade (Equação 5) para os diferentes experimentos.

A capacidade de produção foi determinada pelas cargas de *Spirulina* nas bandejas, fixada pelo planejamento experimental dividida pelo tempo obtido para se alcançar a umidade do produto de 8% em base seca (b.s.).

## 2.6. Metodologia Estatística

Os ensaios de secagem foram elaborados segundo planejamento experimental do tipo fatorial com dois fatores e dois níveis de variação (NETO *et al*, 2003), para a resposta solubilidade protéica em meio ácido. Os ensaios foram determinados segundo a matriz do planejamento experimental apresentada na Tabela 1, para os fatores temperatura e carga. Foram definidas as temperaturas de 50 e 60°C, pois segundo a literatura temperaturas

superiores a 60°C podem causar degradação de proteínas e pigmentos existentes na *Spirulina platensis* (DESMORIEUX, 2005). A carga de 4 e 6kg/m<sup>2</sup>, foi fixada para garantir a condição de camada delgada (MARTINS, 2003).

**Tabela 1:** Matriz do planejamento experimental dos ensaios de secagem de *Spirulina* forma codificada e não codificada.

Ensaio	Tcod	Carga cod	Temp.	Carga
1	-1	-1	50°C	4 kg/m <sup>2</sup>
2	+1	-1	60°C	4 kg/m <sup>2</sup>
3	-1	+1	50°C	6 kg/m <sup>2</sup>
4	+1	+1	60°C	6 kg/m <sup>2</sup>

Para a análise estatística da resposta solubilidade protéica em meio ácido, foi realizada uma análise de variância (Quadro de ANOVA), com o auxílio de um software estatístico, tendo como fatores de estudo temperatura e carga de sólidos na forma codificada. A Equação 6 representa o modelo teórico estatístico na forma codificada para a resposta solubilidade protéica em meio ácido.

$$\text{Solubilidade} = a + b * T_{\text{cod}} + c * \text{Carga}_{\text{cod}} + d * T_{\text{cod}} * \text{Carga}_{\text{cod}} \quad (6)$$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Composição química

Foram realizadas as análises da composição proximal da *Spirulina* “in natura” após prensagem e antes da secagem. Estes resultados são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2:** Composição proximal da *Spirulina* “in natura” prensada em base úmida.

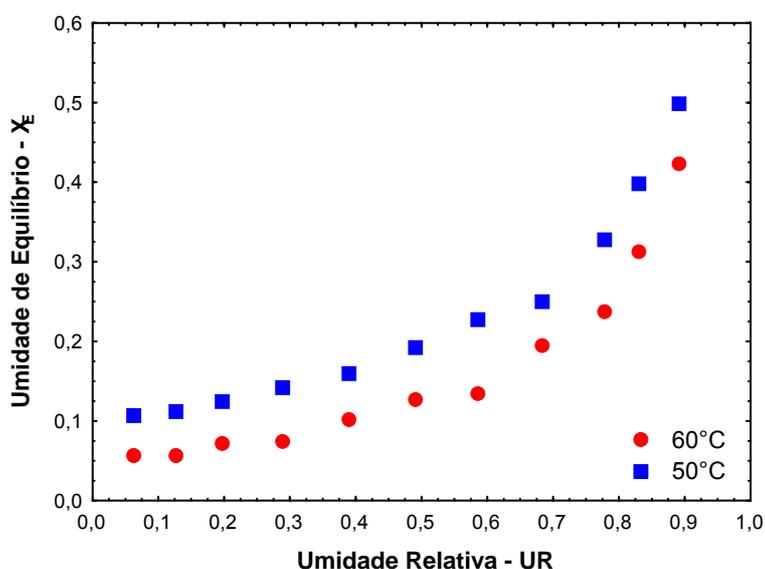
Especificação	Composição (%) (b.u.)
Umidade	76,7±0,6
Cinzas	1,7±0,1
Proteína	17,2±1,1
Lipídios	2,0±0,1
Carboidratos*	2,4±0,2

\*Por diferença.

Determinou-se a composição de carboidratos por diferença, já que os compostos que interessam ao estudo são os de maior percentagem em massa, tais como umidade e proteína.

### 3.2. Umidade de equilíbrio e caracterização da secagem

Os resultados das determinações das umidades de equilíbrio da amostra em função da umidade relativa do meio estão representados na Figura 2 pelas curvas de sorção para as temperaturas de 50 e 60°C.



**Figura 2:** Isoterma de sorção para *Spirulina* nas temperaturas de 50 e 60°C.

Pode ser observado na Figura 2 o comportamento sigmoidal característico de isotermas de alimentos para as duas temperaturas. A Tabela 3 apresenta os resultados da estimativa pelo método dos mínimos quadrados, com os respectivos valores de  $R^2$  e parâmetros determinados pelas equações em análise.

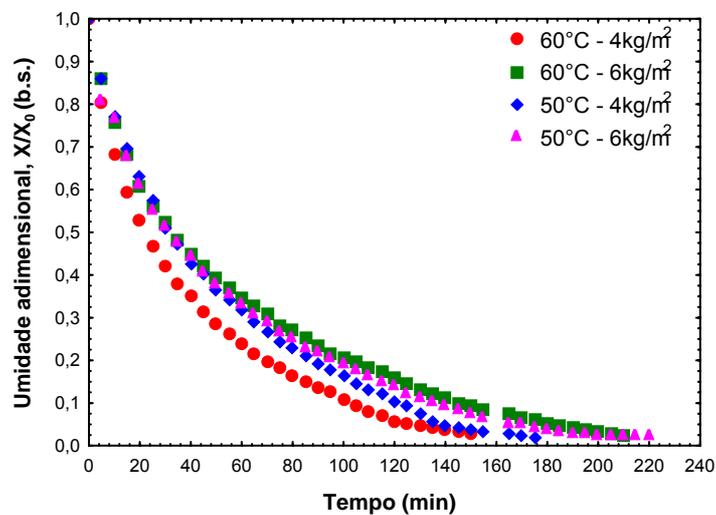
**Tabela 3:** Ajuste dos modelos GAB e BET para as isotermas de *Spirulina* a 50 e 60°C.

Modelo/Temperatura	$X_m$ (b.s.)	$C_G$	$C_B$	K	$R^2$
GAB – 50°C	0,11	120,63	-	0,87	99,5%
BET – 50°C	0,08	-	3,26	-	93,4%
GAB – 60°C	0,07	46,8	-	0,95	98,2%
BET – 60°C	0,06	-	78,7	-	91,1%

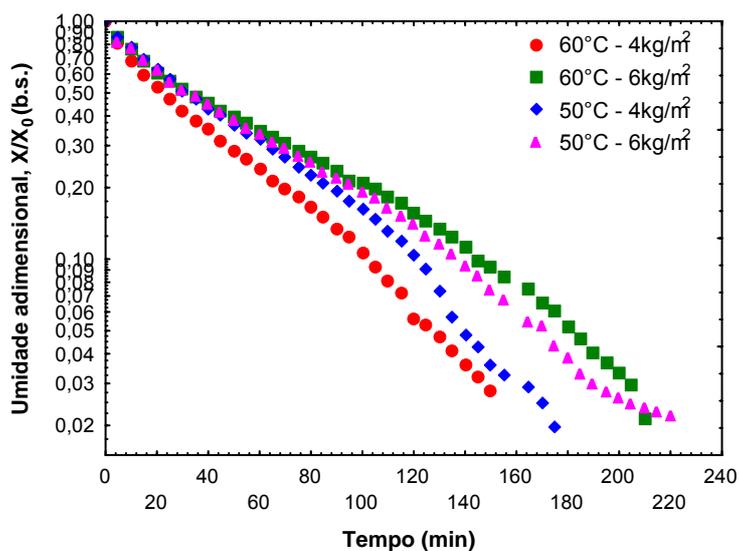
O modelo GAB apresenta um número de parâmetros que descrevem adequadamente os dados experimentais numa faixa de umidade relativa (10% a 90%), o que é interessante para alimentos. Já o modelo BET possui limitações teóricas para descrever o comportamento da monocamada de alimentos em valores de umidade relativa acima de 40%.

Através da Tabela 3, pode-se observar que o modelo GAB apresentou melhor ajuste do que BET. Com os parâmetros determinados na Tabela 3 e a umidade relativa do ar, foi utilizada Equação 2 para calcular a umidade de equilíbrio em cada ensaio, sendo os valores encontrados igual a 0,076 para a temperatura de 60°C e 0,11 para 50°C.

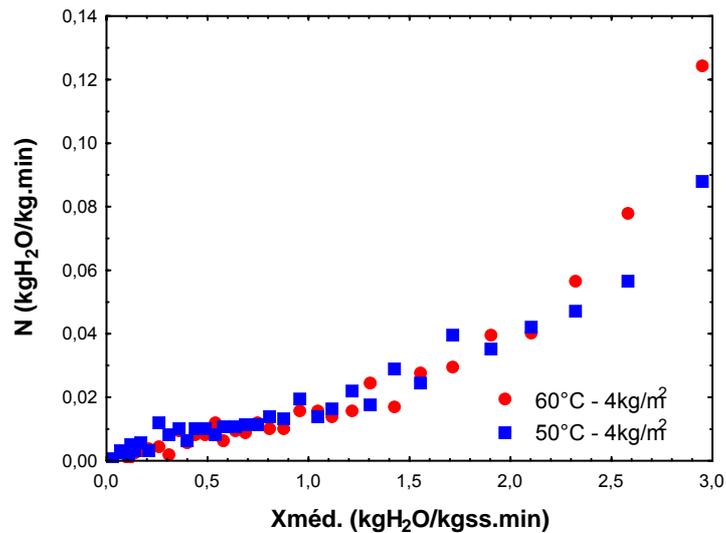
As curvas que descrevem o comportamento da secagem de *Spirulina* nas diferentes temperatura de secagem para a carga de 4 e 6kg/m<sup>2</sup> estão expressas na figuras 3, 4 e 5.



**Figura 3:** Curva de secagem de *Spirulina platensis* nas temperaturas de 50 e 60°C, nas cargas de 4 e 6kg/m<sup>2</sup>.



**Figura 4:** Curva de secagem de *Spirulina platensis* nas temperaturas de 50 e 60°C, nas cargas de 4 e 6kg/m<sup>2</sup>, em escala semi-log.

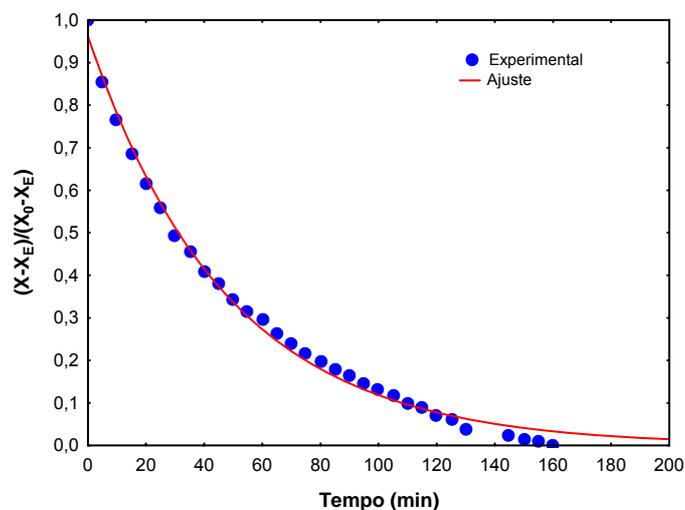


**Figura 5:** Taxa de secagem em função da umidade de *Spirulina platensis*, a 50 e 60°C, 4kg/m<sup>2</sup>.

Analisando-se as curvas do adimensional de umidade em base seca em função do tempo e da taxa de secagem (Figuras 3, 4 e 5), verifica-se a ausência de período de taxa constante, o que é característico de alimentos com elevado teor protéico, isso também se deve ao fato da biomassa ter sido prensado diminuindo a umidade inicial (Tabela 2).

Pode-se observar através da Figura 4, que a secagem ocorreu praticamente no primeiro período da taxa decrescente.

As curvas experimentais do adimensional de água livre em (b.s) em função do tempo, representadas pelo ensaio 1, Figura 6, foram utilizadas para o cálculo dos valores constantes de secagem (K), através da Equação 4, apresentados na Tabela 4.



**Figura 6:** Adimensional de água livre em função do tempo para a temperatura de 60°C e carga de 4kg/m<sup>2</sup>.

A Tabela 4 apresenta os valores do tempo total de secagem, da constante de secagem e da produção para a umidade do produto final desidratado fixada em torno de 8% em base seca, o que corresponde a umidade comercial.

**Tabela 4:** Caracterização da secagem de *Spirulina* em camada delgada.

Ensaio	Tempo total (min)	K (min <sup>-1</sup> )	Produção (kg.m <sup>-2</sup> /h)
1	180	0,021	1,33
2	150	0,025	1,60
3	220	0,018	1,63
4	205	0,017	1,75

Na Tabela 4, se observa que a secagem na menor temperatura e carga apresentou menor produção. Com os valores de constante de secagem e a Equação 5, calculou-se a difusividade efetiva dos ensaios. Como a secagem de *Spirulina* foi na forma de cilindros longos, foi utilizado o raio equivalente para o cálculo da difusividade efetiva, multiplicando o raio pela esfericidade.

$$D_{ef} = \frac{K \cdot (\phi R_0)^2}{\pi^2}$$

**Tabela 5:** Valores da difusividade efetiva média de umidade das etapas de secagem de *Spirulina*.

Ensaio	Def (m <sup>2</sup> /s) 10 <sup>11</sup>
1	2,86
2	3,42
3	2,46
4	2,33

Utilizando-se os valores da difusividade efetiva média de umidade da Tabela 5 e dos tempos de secagem da Tabela 4 para as diferentes condições avaliadas obteve-se os valores para o número de Fourier ( $Fo = D_{ef} \cdot t / (\phi \cdot R)^2$ ) na faixa de 0,35 a 0,40, verificando-se que a relação de  $Fo > 0,2$  foi estabelecida, assegurando a validade das Equações 4 e 5.

### 3.3. Análise Estatística

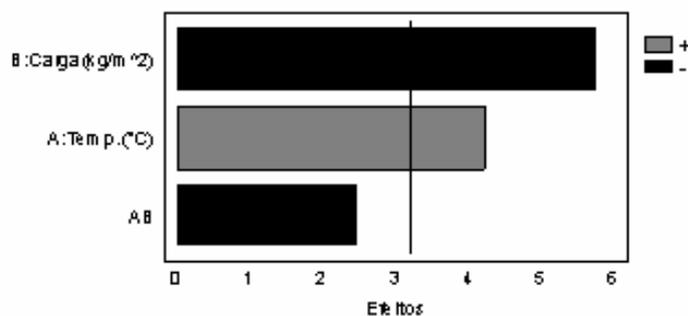
Os resultados da matriz do planejamento fatorial  $2^2$ , para estudar os efeitos da temperatura e da carga sobre a solubilidade protéica em meio ácido, estão apresentados na Tabela 6. O estudo foi realizado através da análise de variância, utilizando o quadro de ANOVA (Tabela 7), o gráfico de Pareto (Figura 7), o gráfico dos efeitos principais (Figura 8) e do quadrado de resposta dos fatores (Figura 9). A análise de variância para as respostas solubilidade está apresentada na Tabela 7.

**Tabela 6:** Valores matriz do planejamento experimental para a resposta solubilidade protéica em meio ácido.

Ensaio	Solubilidade protéica (%)
1	50,8±0,6
2	72,6±9,1
3	40,3±1,8
4	46,1±7,2

**Tabela 7:** Quadro de ANOVA para a resposta solubilidade protéica em meio ácido.

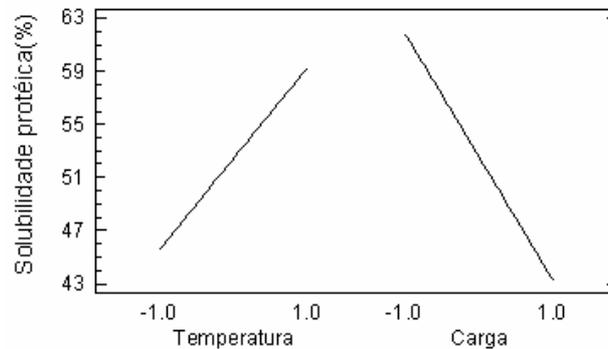
Fatores	$\Sigma$ quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	Teste – F	Significância
Temperatura (A)	376,75	1	376,75	17,85	0,024
Carga (B)	690,06	1	690,06	32,70	0,010
AB	127,20	1	127,20	6,03	0,091
Erro	63,31	3	63,31		



**Figura 7:** Gráfico de Pareto para a resposta do planejamento.

Os fatores foram analisados ao nível de 95% de significância, representado pela linha vertical no gráfico de Pareto (Figura 7). Observa-se nesta figura que os efeitos

principais dos fatores temperatura e da carga apresentaram significância estatística na solubilidade em meio ácido. Isto também é constatado na Tabela 7 através dos níveis de significância menores que 0,05.

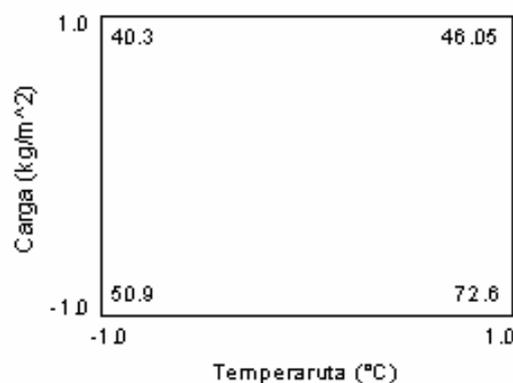


**Figura 8:** Gráfico dos efeitos principais para resposta solubilidade protéica em meio ácido.

Observa-se na Figura 8 que a temperatura foi um efeito positivo na solubilidade, já que esta aumentou com a elevação da temperatura. A carga apresentou um efeito negativo, pois aumentou o tempo de exposição dessas proteínas, causando desnaturação e conseqüente diminuição da solubilidade.

O quadrado de resposta (Figura 9) permite avaliar a melhor região de trabalho para a resposta solubilidade protéica. Os fatores de estudo estão representados pelas arestas, tendo nos vértices os valores teóricos do percentual de solubilidade protéica em meio ácido, determinado pelo modelo teórico estatístico (Equação 7). A Equação 7 representa o modelo teórico estatístico na forma codificada obtido com a análise de regressão para a resposta percentual de solubilidade protéica em meio ácido considerando os efeitos principais e as interações de primeira ordem, com uma alta correlação (95,3%).

$$\text{Solubilidade} = 52,46 + 6,86 * T - 9,29 * \text{Carga} - 3,98 * T * \text{Carga} \quad (7)$$



**Figura 9:** Quadrado de resposta do planejamento experimental.

Através da Figura 9 observa-se que os valores desejáveis de maior solubilidade estão relacionados com a menor carga ( $4\text{kg/m}^2$ ) e maior temperatura ( $60^\circ\text{C}$ ).

Recomenda-se assim, para a secagem de *Spirulina* em camada delgada utilizando escoamento perpendicular do ar, que se utilize a temperatura de  $60^\circ\text{C}$  com carga de  $4\text{kg/m}^2$  para se obter um maior valor de solubilidade em meio ácido e com capacidade de produção entre os maiores valores encontrados nos ensaios de secagem.

#### 4. CONCLUSÃO

A secagem de *Spirulina platensis* em camada delgada com escoamento perpendicular do ar, tendo como fatores de estudo a temperatura ( $50$  e  $60^\circ\text{C}$ ) e a carga de sólidos na bandeja ( $4$  e  $6\text{kg/m}^2$ ), ocorreu durante o período de taxa decrescente, não apresentando taxa constante e com capacidade de produção de  $1,33$  a  $1,75\text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$ .

A Equação de GAB mostrou-se mais adequada para o ajuste experimental dos dados das isotermas de equilíbrio, por apresentar maior significado físico para estimar a umidade de equilíbrio para *Spirulina platensis*, com valores do coeficiente de determinação ( $R^2 > 98\%$ ).

Os valores de solubilidade protéica em meio ácido foram na faixa de  $40,3$  a  $72,6\%$ , para o aumento da solubilidade na análise estatística realizada ao nível de  $95\%$ , a temperatura e a carga de amostra foram significativas, sendo que a melhor região de trabalho foi de  $60^\circ\text{C}$  e  $4\text{kg/m}^2$ .

#### Agradecimentos

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

#### 5. NOMENCLATURA

A	Constante equação 4	[adimensional]
$C_B$	Parâmetro de ajuste da equação 1	[adimensional]
a	Constante equação 6	[adimensional]
b	Constante equação 6	[adimensional]
c	Constante equação 6	[adimensional]
d	Constante equação 6	[adimensional]
$C_G$	Parâmetro de ajuste da equação 2	[adimensional]
$D_{EF}$	Difusividade efetiva média de umidade	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$
$F_o$	Número de Fourier	[adimensional]

K	Constante de secagem	[min <sup>-1</sup> ]
k	Parâmetro de ajuste da equação 2	[adimensional]
R	Raio	[m]
T	Temperatura	[°C]
t	Tempo	[min]
X <sub>0</sub>	Umidade inicial (base seca)	[kg.kg <sup>-1</sup> ]
$\bar{X}$	Umidade média (base seca)	[kg.kg <sup>-1</sup> ]
X <sub>m</sub>	Umidade da monocamada	[kg.kg <sup>-1</sup> ]
X <sub>E</sub>	Umidade de equilíbrio (base seca)	[kg.kg <sup>-1</sup> ]
UR	Umidade Relativa	[adimensional]
φ	Esfericidade	[adimensional]

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). **Official Methods of Analysis**. 14<sup>a</sup> ed., v.1, 1995.

[2] BALA, B.K. & WOODS, J.L. **Thin layer drying models for malts**. Journal Food Engineering, v.16, p. 239-149, 1992.

[3] CHIRIFE, J. **Fundamentals of the Drying Mechanism During Air Dehydration of Foods**. In: MUJUNDAR, A. Advances in drying. Washington/ New York/ London. Ed. Hemisphere Publishing Corporation, v.3, p. 73-102, 1983.

[4] COLLA, L.M. **Influência das condições de crescimento sobre o potencial antioxidante da microalga *Spirulina platensis* e seu potencial na redução da hipercolesterolemia**. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos. Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, RS, 2002.

[5] DESMORIEUX, H., DECAEN, N. **Convective drying of *Spirulina* in thin layer**. Journal Food Engineering, v.66, p. 497–503, 2005.

[6] FENNEMA, O.R. **Introducción a la ciencia de los alimentos**, editora Reverté, España, 1985.

[7] KARATHANOS, V.T. **Determination of water content of dried fruits by drying kinetics**. Journal of Food Engineering, n. 39, p. 337-334, 1999.

- [8] KRÜGER, C.; CENI, G.; SCARBIERI, V.; CÂNDIDO, L. **Propriedade hidrofílica de concentrados protéicos de leite bovino.** Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos, n.36(2), p.122-127, 2002.
- [9] MARTINS, P.C.; PINTO, L.A.A. **Caracterização da secagem de cebola (*Allium cepa* L.) em camada delgada e reidratação do produto desidratado.** Brazilian Journal of Food Technology. Ital/Campinas, São Paulo, v.6 (123), p.143-151, 2003.
- [10] MIR, M. A.; NATH, N. **Sorption isotherms of fortified mango bars.** Journal of Food Engineering, v. 25, p.141-50, 1995.
- [11] MORR, C.V.; GERMAN, B.; KINSELA, J.E.; REGENSTEIN, J.M.; VAN-BUREN, J.P.; KILARA, A.; LEWIS, B.A.; MAGNINO, M.E. **Collaborative study to develop a standardized food protein solubility procedure.** Journal of Food Science, v. 50, p.1715-1718, 1985.
- [12] PEZZUTTI, A. & CRAPISTE, G. H. **Sorptional equilibrium and drying characteristics of garlic.** Journal of Food Engineering. v. 29, p. 75-97. 1996.
- [13] PINTO, L.A.A.; TOBINAGA, S e PENEIREIRO, J.B. **Difusão líquida na secagem de músculos de peixe. In: Encontro sobre escoamento em meios porosos.** Anais do XX ENEMP. São Carlos, SP, 1992b.
- [14] RICHMOND, A. IN: BOROWITZKA, M. AND BOROWITZKA, L. **Products from algae, biotechnology in the Asia Pacific, Region.** University of Malaia, 477p. 1994.
- [15] TIMMERMANN, E.O.; CHIRIFE, J. & IGLESIAS, H.A. **Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters?** Journal of Food Engineering, v. 48, p. 19-31, 2001.

## ARTIGO 2 - SECAGEM DE *Spirulina platensis* EM LEITO DE JORRO: AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS DO PRODUTO FINAL

### RESUMO

*Spirulina* é uma cianobactéria de grande importância comercial devido seu elevado conteúdo protéico e vitamínico. Objetivo do presente trabalho foi estudar a viabilidade da técnica de leito de jorro na secagem de *Spirulina platensis*, avaliando as alterações do produto final em relação a solubilidade protéica em meio aquoso e digestibilidade “*in vitro*”. Foram utilizados secadores de geometria cônica e cone-cilíndrica, dos tipos CSB (conventional spouted bed) e JSB (jet spouted bed). O equipamento demonstrou boa funcionalidade, não apresentando colapso, e obtiveram-se melhores resultados na concentração de alimentação de 5%. Ocorreu um aumento na solubilidade protéica em relação a matéria-prima in-natura e a digestibilidade “*in vitro*” apresentou uma redução de 57% em relação ao produto “*in natura*”.

**Palavras-chave:** *Spirulina platensis*, leito de jorro, digestibilidade “*in vitro*”, solubilidade protéica.

### 1. INTRODUÇÃO

As algas representam a terceira parte da biomassa terrestre, e hoje estão sendo identificadas como fonte de alimentos, produtos farmacêuticos, bioquímicos e fertilizantes (HENRIKSON, 1994). *Spirulina* é uma cianobactéria aeróbica fotossintética que tem despertado interesse de muitos pesquisadores devido ao seu alto poder nutricional, produção de substâncias de alto valor agregado e propriedades nutracêuticas (SARADA *et al.*, 1999). Segundo Vonshak (1997) essa microalga se destaca das demais devido seu conteúdo protéico que alcança cerca de 70% e por ser fonte de compostos biologicamente ativos como o ácido  $\gamma$ -linolênico, vitaminas e pigmentos. Sarada *et al.* (1999) relatam que esta cianobactéria tem sido comercializada em muitos países para ser usada em alimentos funcionais e com propósitos terapêuticos devidos a constituintes, particularmente proteínas e vitaminas.

Para preservar a *Spirulina* após a colheita e para a sua incorporação no alimento ela deve ser submetida a um processo de secagem (DESMORIEUX, 2004). A secagem de pastas é uma operação complexa devido a grande diversidade de tipos de pasta, com características distintas. Neste sentido, diversos trabalhos vêm sendo publicados, principalmente relacionados a industrialização de alimentos (FLORO, 2004).

Comercialmente, a secagem de *Spirulina* é realizada em secadores tradicionais de bandejas e em spray dryer (DESMORIEUX, 2004). A secagem utilizando o leito de jorro pode ser vantajosa por este ser um equipamento de baixo custo operacional, com produção em pequena escala e que permite o uso de maiores temperaturas do que em camada delgada, obtendo-se um produto final com características semelhantes aos secadores tipo spray (MEDEIROS, 2001).

O sistema de leito de jorro foi desenvolvido no Canadá em 1954, por Mathur e Gishler, quando testavam um leito fluidizado com maior capacidade para a secagem de trigo, conforme apresentado em Freire (1992). Observou-se que dependendo da vazão de ar de alimentação é possível obter diferentes regimes de contato fluido-partícula. Segundo Massarani (1997), este tipo de secador pode ser aplicado eficientemente para secagem de cereais, suspensões e pastas, além de granulação e recobrimento de partículas. No secador de leito de jorro, a atomização da pasta ou suspensão sobre o leito reveste as partículas com uma fina camada de material. À medida que seca, a película se torna frágil, fragmentando-se devido aos efeitos de colisões interpartículas. O material na forma de pó é então arrastado para fora pela corrente de ar. Um ciclone conectado ao secador promove a separação e recolhimento do pó; entretanto, muitas vezes as taxas de remoção da película são muito baixas, promovendo acumulação do material no leito, sendo este um dos graves problemas deste secador, chegando até mesmo a inviabilizar sua utilização na secagem de diversos materiais (MEDEIROS, 2001).

A flexibilidade destes leitos para operações que envolvam contato gás-sólido está relacionada com a possibilidade de adoção de diferentes geometrias do equipamento que, por sua vez, afetam as características do escoamento de ambas as fases. Estudos sobre secagem em leito de jorro têm sido realizados usando desde o leito de jorro tradicional (CSB) até o leito de jorro menos denso, com alta porosidade, denominado “jet spouted bed” (JSB), (MARKOWSKI & KAMINSKI, 1983). Outra variação de geometria é o leito cônico, ao contrário do leito convencional, cuja maior parte das partículas encontra-se no corpo cilíndrico do equipamento, no leito cônico as partículas estão todas na base cônica do equipamento (FREITAS, 2000).

Do ponto de vista fluidodinâmico, os principais parâmetros ligados ao projeto de secador de leito de jorro são: a perda de carga no leito em função da vazão do fluido, a perda de carga máxima, a velocidade de jorro mínimo e a altura máxima de jorro estável. A perda de carga máxima juntamente com o valor da velocidade de jorro mínimo fornece os dados necessários para caracterização do soprador. A velocidade de jorro mínimo é fortemente dependente das características geométricas do sistema, bem como das características físicas do fluido e das partículas. A altura de jorro estável fornece uma

estimativa da quantidade de material que pode ser processado em um dado equipamento (FREIRE, 1992).

Segundo Scarbieri (1996) a digestibilidade da proteína de origem vegetal apresenta uma digestibilidade inferior quando comparada a proteína animal. Vários fatores contribuem para a menor digestibilidade das proteínas nos alimentos vegetais, como por exemplo, pigmentos, produtos da oxidação de ácidos graxos insaturados, componentes da fibra alimentar, entre outros, que podem reagir com as proteínas, formando derivados protéicos que são menos digeríveis que as proteínas vegetais.

A avaliação das propriedades funcionais é alterada em grande parte pelas condições de processamento em foi submetido o produto. A solubilidade de uma proteína é de grande importância na formulação de produtos alimentícios, para que ocorra desta forma interação da proteína com os outros ingredientes, de maneira a contribuir para a formação de textura nos alimentos (KRÜGER *et al.*, 2002). Lordache e Jelen (2003) relatam que tratamentos térmicos comumente afetam a estrutura e a solubilidade das proteínas. A insolubilização, devido a indução do calor é um dos maiores obstáculos na inclusão de proteínas em sistemas alimentares.

O objetivo deste trabalho foi estudar a viabilidade da secagem de *Spirulina platensis* em leite de jorro em relação as características do produto final, sendo avaliadas a umidade, a solubilidade protéica em água e a digestibilidade “*in vitro*”.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

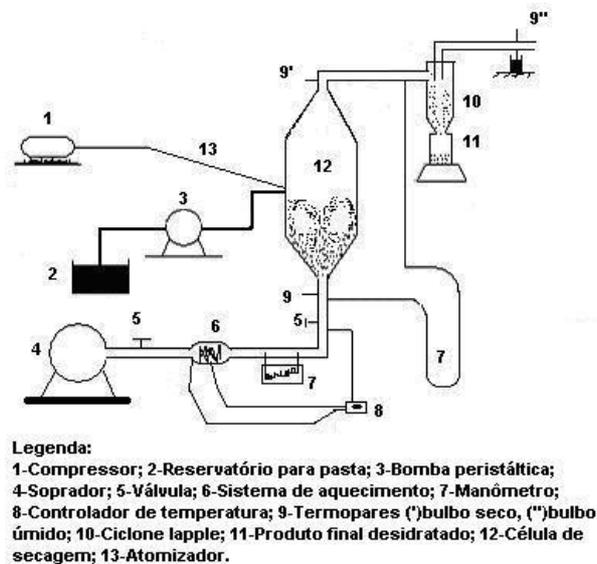
### **2.1. Matéria-prima**

A matéria-prima utilizada foi a cianobactéria *Spirulina platensis*, cedida pelo laboratório de Engenharia Bioquímica/FURG. A microalga foi cultivada no município de Santa Vitória do Palmar/RS, e posteriormente encaminhada ao Laboratório de Operações Unitárias/FURG para a realização dos ensaios. Antes da realização dos ensaios foi feita a adição de um conservante (azida 0,02%) para evitar a degradação do produto.

### **2.2. Equipamentos para a secagem de *Spirulina platensis***

Os ensaios de secagem em leite de jorro foram realizados no tipo de geometria cone-cilíndrica (ver anexo A7). A base cônica de vidro, com ângulo incluso de 60°, tinha altura de 15,0 cm para o secador CSB e 12,5 cm para o JSB. A coluna cilíndrica tinha diâmetro e altura de 17,5 e 75 cm para o CSB, e para o JSB de 17,5 e 104 cm, respectivamente. O secador CSB possuía uma relação entre o diâmetro da célula e o

diâmetro do orifício de entrada do ar ( $D_c/D_i$ ) igual a 6, e o secador JSB com relação de 3,5. O equipamento possuía uma tela de proteção localizada a 20 cm acima do leito de inertes. O leito de partículas inertes era constituído de polietileno com diâmetro de 3 mm, esfericidade 0,7 e massa específica de  $960 \text{ kg/m}^3$ . Foram utilizados 2,5 kg de inerte. O diagrama esquemático dos equipamentos utilizados nos ensaios experimentais de secagem em leito de jorro é apresentado na Figura 1:



**Figura 1:** Esquema do equipamento para secagem em leito de jorro.

O sistema era constituído de um soprador radial com potência de 6 kW e vazão máxima de  $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ . O ar foi aquecido em um sistema composto de três resistências elétricas com 800 W de potência cada uma. Mediu-se a velocidade do ar de secagem através de placa de orifício, e a queda de pressão no leito com um manômetro de tubo em "U". As medidas de temperatura foram realizadas com termopares de cobre-constantan. Alimentou-se a solução de *Spirulina* com bomba peristáltica e foi feita atomização do tipo duplo fluido. A *Spirulina* seca foi coletada em um ciclone tipo Lapple.

### 2.3. Metodologia analítica

Determinou-se a composição química da *Spirulina* úmida e do produto final através dos métodos analíticos de cinzas, umidade, lipídios e N-total (com fator de conversão de 6,25 para N-proteína), segundo as normas oficiais da A.O.A.C (1995). A composição de carboidratos da amostra foi feita por diferença. Realizaram-se também análises no produto final de solubilidade em meio aquoso e digestibilidade "in vitro".

A solubilidade em meio aquoso foi feita pelo método MORR (1985). Adicionou-se à aproximadamente 2,5 g de *Spirulina* em 50 mL de água destilada, a seguir levou-se ao

agitador magnético por 15 minutos e posterior centrifugação a 3500 rpm por 15 minutos. Após a centrifugação, filtrou-se o conteúdo dos tubos, e procedeu-se a determinação de proteína do sobrenadante. O índice de proteína solúvel foi determinado sobre o conteúdo total de proteína das amostras e o teor de proteína solúvel.

A determinação da digestibilidade “*in vitro*” na matéria-prima in-natura e desidratada foi realizada segundo o método de Sgarbieri (1996), que constituiu na incubação das amostras de *Spirulina* com pepsina (dissolvida em HCl 1N) em banho-maria à 37°C, durante 2 horas, sob agitação. Retirou-se as amostras do banho, o pH foi elevado a 8,0 com adição de solução de NaOH 1N. A seguir adicionou-se pancreatina em solução tampão fosfato de sódio com pH 8,0 e colocou-se em estufa a 37°C, permitindo a atuação da pancreatina por 24 horas. Para interromper a atuação da pancreatina foi utilizado ácido tricloro acético (TCA) 15% p/v na proporção de 1:1. A seguir, separou-se a fração digerida por filtração. No filtrado então, foi determinada a proteína segundo micro Kjeldahl, A.O.A.C. (1995). A porcentagem de proteína digerida foi determinada sobre o teor de proteína total e a quantidade digerida.

## 2.4. Metodologia experimental

A fluidodinâmica do equipamento foi caracterizada através da determinação da velocidade de jorro mínimo e queda de pressão máxima no leito. Esses parâmetros foram obtidos através de gráficos de queda de pressão no equipamento em função da velocidade de ar introduzida no sistema. Utilizou-se uma taxa de circulação de 100% acima da velocidade de jorro mínimo indicado para secagem de pasta, conforme Mathur & Epstein (1974).

A perda de carga máxima pode ser prevista pela Equação 1 e corresponde à perda que ocorre pouco antes do jorro ser estabelecido.

$$\Delta P_m = H(\rho_s - \rho_f)(1 - \varepsilon)g \quad (1)$$

Onde  $\Delta P_m$  é a perda de carga máxima em (Pa), H é a altura do leito de inertes em repouso em (m),  $\rho_s$  é a massa específica das partículas de inertes em (kg/m<sup>3</sup>),  $\rho_f$  é a massa específica do ar aquecido em (kg/m<sup>3</sup>),  $\varepsilon$  é a porosidade do leito e g é a aceleração da gravidade em (m/s<sup>2</sup>).

A velocidade de jorro mínimo é a menor velocidade superficial do gás na qual o jorro ainda existe e pode ser prevista pela Equação 2 (GISHLER e MATHUR, 1955).

$$v_{jm} = \left(\frac{d_p}{D_c}\right)\left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{1/3} \left[\frac{2gH(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}\right]^{1/2} \quad (2)$$

Onde  $v_{jm}$  é a velocidade de jorro mínimo em (m/s),  $d_p$  é o diâmetro das partículas do inerte em (m),  $D_c$  é o diâmetro da célula em (m),  $D_i$  é o diâmetro do orifício de entrada do ar aquecido em (m),  $H$  é a altura do leito de inertes em repouso em (m),  $\rho_s$  é a massa específica das partículas de inertes em ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\rho_f$  é a massa específica do ar aquecido em ( $\text{kg/m}^3$ ),  $g$  é a aceleração da gravidade em ( $\text{m/s}^2$ ).

Altura máxima de jorro estável é a altura de leito a partir do qual o jorro torna-se instável e pode ser prevista pela Equação 3.

$$H_m = 0,67[(D_c^{4/3})/(d_p^{1/3})] \quad (3)$$

Onde  $H_m$  é a altura máxima de jorro estável em (m),  $D_c$  é o diâmetro da célula em (m) e  $d_p$  é o diâmetro das partículas do inerte em (m) (FREIRE, 1992).

Para a secagem em leito de jorro, inicialmente a *Spirulina platensis* in-natura foi diluída até a concentração de suspensão desejada, antes de ser alimentada na célula de secagem em leito de jorro. Foram preparadas soluções com concentrações na faixa de 3 a 10,7%.

As condições de secagem em leito de jorro foram as seguintes: taxa de alimentação de suspensão de 0,4kg/h.kg de inerte, taxa de circulação do ar  $v/v_{jm}$  igual a 2 e temperatura de saída do ar de  $\pm 70^\circ\text{C}$ . A temperatura do ar de entrada é uma das variáveis que deve ser mais controlada, pois quanto maior a temperatura, mais rápida a secagem se processa, no entanto, o produto no final da secagem deve apresentar boas características e o mínimo de alterações das propriedades físicas e químicas do produto. Para a determinação da velocidade de jorro mínimo, abriu-se a válvula até o instante em que o jorro ocorresse no leito, anotando a queda de pressão máxima. Após abertura total da válvula, fechou-se gradualmente a mesma, marcando-se o instante em que o jorro entrasse em colapso ( $v_{jm}$ ). A velocidade do ar de secagem a ser utilizada nos experimentos foi estabelecida a partir da velocidade de jorro mínimo, de forma a garantir a estabilidade do jorro em todos os ensaios realizados.

Quando estabelecido o regime de jorro estável, o sistema de alimentação da amostra foi acionado e a suspensão de *Spirulina* foi então alimentada para o interior da célula por meio de bomba peristáltica utilizando ar comprimido para atomização com uma pressão manométrica de 98,1kPa. A secagem da *Spirulina platensis* no leito ocorreu pelo contato fluido-partícula e também pelo atrito entre as partículas de inertes, provocadas pela alta taxa de circulação das mesmas no interior do leito. A *Spirulina* seca em forma de pó foi arrastada pneumáticamente pelo ar de secagem e coletada por ciclone tipo *Lapple*. Foram verificadas as temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido do ar de secagem. Os experimentos tiveram a duração de 2 horas, sendo que, a primeira meia hora foi para o equipamento

entrar em regime. Foram retiradas amostras durante o tempo de secagem a cada meia-hora para a realização das análises.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Composição química

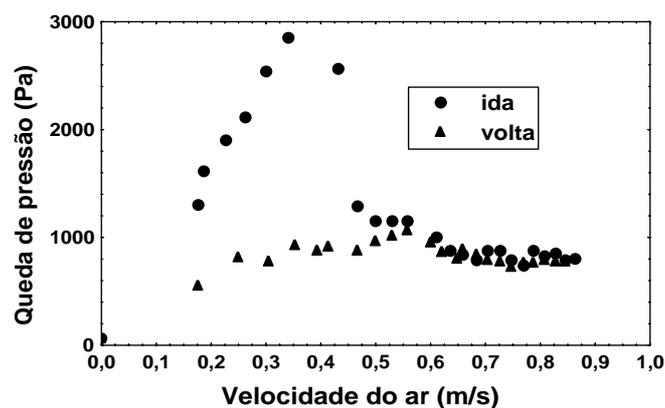
A composição proximal da *Spirulina platensis* in-natura, após a adição de conservante (azida 0,02%) é apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1:** Composição proximal da *Spirulina platensis* “in natura”, em base úmida.

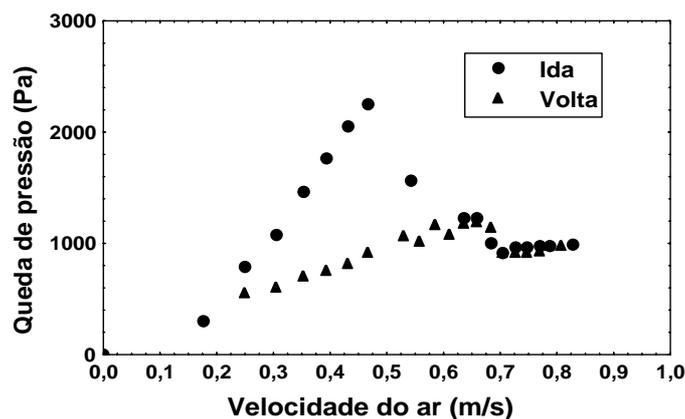
Especificação	Composição (%)
Umidade	89,3±0,1
Cinzas	0,8±0,1
Lipídios	0,9±0,1
N-proteína	7,8±1,1
Carboidratos*	1,2±0,1

#### 3.2. Curvas Fluidodinâmicas

As Figuras 2 e 3 apresentam as curvas de queda de pressão nos leitos de jorro dos tipos CSB e JSB em função da velocidade do ar introduzido no sistema para os experimentos com carga de inertes de 2,5 kg.



**Figura 2:** Curva fluidodinâmica para CSB.



**Figura 3:** Curva fluidodinâmica para JSB.

Através das curvas fluidodinâmicas (Figuras 2 e 3), determinou-se a velocidade de jorro mínimo ( $v_{jm}$ ), os valores da perda de carga máxima e a perda de carga no jorro estável nos leitos. Estes valores estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2:** Parâmetros fluidodinâmicos teóricos e experimentais das células cone-cilíndrico CSB e JSB.

Tipo de célula	$v_{jm}$ (m/s)	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ (Pa)	$\Delta P_{est\acute{a}vel}$ (Pa)
CSB (Teórico)	0,69	2172	-
CSB (Experimental)	0,56	2870	930
JSB (Teórico)	0,80	1955	-
JSB (Experimental)	0,68	2260	900

O secador JSB apresentou maior velocidade experimental de jorro mínimo, isso se deve ao fato da porosidade do leito desse secador ser superior ao CSB, a correlação utilizada para o cálculo da velocidade de jorro mínimo foi válida, pois a relação  $D_c/D_i$  ficou dentro da faixa da literatura ( $3,78 \leq D_c/D_i \leq 7,75$ ). A relação  $\Delta P_{m\acute{a}x}/\Delta P_{est\acute{a}vel}$  para o JSB ficou fora da faixa apresentada pela literatura (FREIRE, 1992), que vai de  $1,3 \leq \Delta P_{m\acute{a}x}/\Delta P_{est\acute{a}vel} \leq 2,1$ . Através da Tabela 2, pode-se observar que o secador tipo CSB apresentou menores valores de velocidade de jorro mínimo ( $v_{jm}$ ) e maiores valores de queda de pressão máxima ( $\Delta P_{m\acute{a}x}$ ) e de queda de pressão estável ( $\Delta P_{est\acute{a}vel}$ ), para a carga de inerte utilizada.

### 3.3. Secagem em leito de jorro

Em ensaios preliminares foram definidas as variáveis operacionais da secagem em leito de jorro. Foi utilizada primeiramente uma célula de geometria cônica (ver anexo A8),

com as mesmas dimensões que a base cônica da célula tipo CSB e uma concentração de suspensão de 10,7%. As variáveis estabelecidas foram taxa de circulação de ar, temperatura de secagem e vazão de alimentação de pasta. No entanto, esta concentração apresentou muita retenção no leito e baixa produção, e causou colapso no equipamento em alguns testes. Ficando definida que para melhores resultados a taxa de circulação do ar deveria ser 100% acima da velocidade de jorro mínimo, temperatura de saída de 70°C para garantir boas características do produto final e taxa de alimentação de suspensão de 0,4 kg/h.kg de inerte. Com a ampliação de escala para a geometria cone-cilíndrica, a taxa de circulação foi de 80%, a fim de diminuir o consumo de ar na operação, mantendo as características de funcionamento do leito.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados de umidade e produção de *Spirulina* seca nos experimentos de secagem obtidos nos dois tipos de geometria cone-cilíndrica utilizada e respectivas concentrações.

**Tabela 3:** Resultados de umidade e produção de *Spirulina* seca nos dois tipos de secador de leito de jorro.

Experimentos	Geometria	Concentração (%)	Umidade b.u. (%)	Produção (g/h)
1	CSB	3	6,4±0,7	7,5±0,9
2	CSB	5	6,6±0,2	29,5±4,1
3	JSB	5	9,4±0,7	33,7±3,5
4	JSB	8	4,0±0,1	17,2±1,8

Segundo a Tabela 3, pode-se observar que todas as geometrias e concentrações, alcançaram a umidade comercial (abaixo de 10%), ou seja, diluindo o material de 3 a 8% é possível secar *Spirulina* em leito de jorro e alcançar a umidade comercial.

A Tabela 3 mostra que trabalhar com concentrações de alimentação de suspensão no menor e maior valor, a produção foi menor devido a maior retenção no leito. A concentração de 8% apresentou menor umidade e baixa produção, pois quanto maior a alimentação de sólidos no leito, maior o tempo de residência dentro do secador e por consequência menor será a umidade do produto final.

A concentração de 5% apresentou os melhores resultados quanto a umidade e produção, independente da geometria, ou seja, tanto CSB quanto JSB, podem ser utilizados na secagem de *Spirulina*. Como a umidade na geometria JSB foi superior ao CSB, confirma a maior produção encontrada no JSB. Pham, Ré e Markowski in Freire, 1992, observaram uma produção maior quando secaram sangue animal nas duas geometrias e concluíram que

o secador tipo JSB produz um pouco mais que o CSB em condições otimizadas, conforme apresentado na Tabela 3.

A Tabela 4 apresenta os valores da solubilidade protéica em meio aquoso e o coeficiente de digestibilidade da *Spirulina platensis* in-natura e seca em leito de jorro.

**Tabela 4:** Resultados da solubilidade protéica e da digestibilidade de *Spirulina* “in natura” e seca nos dois tipos de secador de leito de jorro.

Experimentos	Geometria	Concentração (%)	Coeficiente de digestibilidade (%)	Solubilidade Protéica (%)
1	CSB	3	21,7±0,2	25,8±2,9
2	CSB	5	21,3±0,7	35,1±4,5
3	JSB	5	19,4±0,6	37,9±2,6
4	JSB	8	20±0,8	26,9±2,4
“In natura”	-	-	47,6±3,8	25,2±3,7

A Tabela 4 mostra que trabalhar nas concentrações 3 e 8%, conserva a solubilidade da *Spirulina* “in-natura”. A concentração de 5% apresentou elevação na solubilidade, nas duas geometrias. A elevação foi superior no JSB, pois como a umidade e a produção foram superiores (Tabela 3), o produto permaneceu em um tempo menor dentro leito causando maior elevação na solubilidade. Sgarbieri (1996) relata que a maioria das proteínas são solúveis à temperatura ambiente e a solubilidade tende a aumentar a medida que a temperatura se eleva até 40-50°C. Acima dessa temperatura as proteínas começam a sofrer desnaturação e a solubilidade tende a diminuir. Como no secador de leito de jorro, a secagem ocorre um pouco acima da temperatura de bulbo úmido do ar de secagem, pode-se observar que em relação à matéria-prima “in natura” houve uma elevação na solubilidade depois da secagem.

Digestibilidade “in vitro” é o que é aproveitado (assimilado pelo organismo) pelo animal. Através da Tabela 4, constatou-se que ocorreu uma redução em média de 57% no coeficiente de digestibilidade durante a secagem, independente da concentração e da geometria. Segundo Sgarbieri (1996) a ação da temperatura pode causar a desnaturação dessas proteínas, ocorrendo reações e ou interações da proteína com outros componentes do alimento, podendo causar decréscimo da digestibilidade.

#### 4. CONCLUSÃO

O secador de leite de jorro com geometria cone-cilíndrica apresentou um comportamento estável durante o período de realização dos experimentos de secagem de *Spirulina platensis*. As condições operacionais apresentaram um bom funcionamento nos diferentes tipos de secadores, sendo que a velocidade de jorro mínimo foi menor e a perda de carga máxima foi maior no secador CSB em relação ao JSB.

A umidade comercial foi alcançada em todas as concentrações e geometrias utilizadas nos experimentos. As amostras apresentaram um aumento na solubilidade protéica em meio aquoso. A digestibilidade “*in vitro*” diminuiu independente da concentração e geometria, em média de 57%.

Na secagem de *Spirulina platensis* em leite de jorro a concentração que apresentou melhores resultados nas condições operacionais estudadas, foi a de 5%. Para garantir um produto final com boas características com relação a solubilidade em meio aquoso e digestibilidade “*in vitro*” a concentração deverá ser 5% nas duas geometrias.

#### Agradecimentos

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). **Official Methods of Analysis**. 14<sup>a</sup> ed., v.1, 1995.
- [2] DESMORIEUX, H.; HERNANDEZ, F. **Biochemical and physical criteria of *Spirulina* after different drying process**. Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS), vol. B, p. 900-907, 2004.
- [3] FLORO, L.M.S. **Obtenção de sopa a partir de rejeitos de hortifrutigranjeiros: Avaliação da secagem em leite de jorro**. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos. Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, RS, 2004.
- [4] FREIRE, J.T.; OLIVEIRA, W. P. **Secagem de Pastas em Leite de Jorro**. In: FREIRE, J. T., SARTORI, D. J. M. Tópicos Especiais em Secagem. Editora São Carlos, UFSCAR, São Carlos, SP, p. 43 – 49, 1992.

- [5] FREITAS, L.A.P.; FREIRE, J.T. **Fluidodinâmica de um leito de jorro cônico**. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, publicado em CD-ROM, 2000.
- [6] GISHLER, R.E. & MATHUR, K. B. **AIChE Journal**, v.1, p.157 – 171, 1955.
- [7] HENRIKSON, R. **Microalga Spirulina: Superalimento del futuro**. Barcelona: Ediciones S.A. Urano, 1994.
- [8] IORDACHE, M., JELEM, P. **High pressure microfluidization treatment of heat denatured wey proteins for improved functionality**. Innovation Food Science and Emerging Technologies. n.1, p.1-10, 2003.
- [9] KRÜGER, C.; CENI, G.; SCARBIERI, V.; CÂNDIDO, L. **Propriedade hidrofílica de concentrados protéicos de leite bovino**. Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos, n.36(2), p.122-127, 2002.
- [10] LOPES, E.J. **Secagem de *Aphanothece microscópica Nägeli* cultivada no efluente da parboilização do Arroz**. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos. Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, RS, 2005.
- [11] MARKOWSKI, A.; KAMINSKI, W. Hydrodynamic Characteristics of Jet Spouted Bed, *Can. J. Chem. Eng.*, n. 61, p. 377-381, 1983.
- [12] MASSARANI, G. **“Fluidodinâmica em Sistemas Particulados”**. 1ª. Edição. UFRJ, 1997.
- [13] MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. Ed. Academic Press. New York. p. 304p, 1974.
- [14] MEDEIROS, M.F.D.; ALSINA, O.L.S.; ROCHA, S.C.; JERÔNIMO, C.E.M. **Escoabilidade de leitos de partículas inertes com polpa de frutas tropicais. Efeitos na secagem em leito de jorro**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.5, n.3, p.475-480, 2001.
- [15] MORR, C.V.; GERMAN, B.; KINSELA, J.E.; REGENSTEIN, J.M.; VAN-BUREN, J.P.; KILARA, A.; LEWIS, B.A.; MAGNINO, M.E. **Collaborative study to develop a standardized food protein solubility procedure**. *Journal of Food Science*, v. 50, p.1715-1718, 1985.

[16] SARADA, R.; PILLAI, M.G.; RAVISHANKAR, G.A. **Phycocyanin from *Spirulina* sp: influence of processing of biomass on phycocyanin yield, analysis of efficacy of extraction methods and stability studies on phycocyanins.** *Process Biochemistry*, v. 34 p. 795–801, 1999.

[17] SGARBIERI, V. C. **Proteínas em alimentos protéicos: Propriedades, Degradações, Modificações.** Editora e Livraria Varela, São Paulo, SP, 1996.

[18] VONSAHK, A. ***Spirulina platensis* (Arthrospira) Physiology, cell-biology and biotechnology.** Taylor & Francis, 1997.

## ARTIGO 3 – DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE FICOCIANINA DE *Spirulina platensis* SECA EM LEITO DE JORRO E EM CAMADA DELGADA

### RESUMO

O objetivo do trabalho foi estudar a secagem de *Spirulina platensis* avaliando as características do produto final quanto ao conteúdo de ficocianina e a solubilidade em meio aquoso. Foram utilizadas duas técnicas de secagem, em leito de jorro e em camada delgada. Para a secagem em leito de jorro, foi utilizado secador de geometria cone-cilíndrica, do tipo CSB (conventional spouted bed), com uma concentração de pasta de 5% e temperatura de saída do ar de 70°C. A secagem em camada delgada foi caracterizada através de curvas experimentais de secagem, a temperatura de 60°C e com carga de sólidos de 4 kg/m<sup>2</sup>. A solubilidade em meio aquoso foi semelhante nos dois secadores. A recuperação de ficocianina da *Spirulina* seca em leito de jorro foi superior a obtida em camada delgada, sendo este valor igual a 93% da ficocianina da matéria-prima.

**Palavras-chave:** Ficocianina, solubilidade, leito de jorro, secagem, *Spirulina platensis*.

### 1. INTRODUÇÃO

A ficocianina é um pigmento azul presente em cianobactérias como a *Spirulina platensis*, sua função é participar do processo fotossintético juntamente com a clorofila-a e os carotenóides. A obtenção da ficocianina com alto grau de pureza é interessante, pois atualmente a demanda por corantes naturais tem aumentado consideravelmente (BHAT e MADYASTHA, 2000; REDDY *et al.*, 2003; BENEDETTI *et al.*, 2004).

A operação de secagem é comumente utilizada para prolongar a vida útil de biomassas microbianas, especialmente se a biomassa é o produto final. Neste sentido, métodos de secagem têm sido extensivamente utilizados para a secagem de biomassas, incluindo spray dryer, secadores de tambor, liofilizadores e ainda secagem ao sol. A liofilização pode ser considerada como um método de secagem de referência para cianobactérias, devido ao produto sofrer mínimas alterações em suas propriedades nutricionais, sensoriais e físico-químicas, o que sugere que o produto liofilizado é o que mais se assemelha a biomassa fresca (MORIST *et al.* 2001).

Sarada *et al.*, 1999, relatam que diversas técnicas de secagem são utilizadas na secagem da cianobactéria *Spirulina*, incluindo spray dryer e secadores convectivos, os quais resultam na perda de aproximadamente 50% da ficocianina presente na biomassa. Resultados desses autores demonstram que a secagem por spray dryer a 150°C resulta em

uma recuperação de 55,5% da ficocianina presente na biomassa, enquanto que para biomassa seca em secador convectivo a 60°C por um período de 7 horas, há uma recuperação de 54% do conteúdo total do pigmento.

A secagem de pastas e suspensões em leito de jorro tem se mostrado uma alternativa à secagem em spray, fornecendo produtos de alta qualidade a baixo custo (MEDEIROS, 2004). O termo leito de jorro foi usado pela primeira vez no Canadá em 1954 sendo suas aplicações comerciais, iniciadas em 1962, são para secagem de grãos, cristalização evaporativa, mistura, resfriamento, recobrimento e granulação de sólidos, entre outras (FILHO, 2004). Os secadores tipo leito de jorro com inertes tem sido extensivamente estudados para a secagem de bio-recursos tais como gêneros alimentícios e produtos fitofarmacêuticos. Recentemente, o leito de jorro tem sido utilizado também para a secagem de extratos medicinais de plantas brasileiras (PEIXOTO, 2004).

A solubilidade é uma propriedade físico-química fundamental das proteínas, também classificada como propriedade funcional, pela importância que essa propriedade exerce sobre a funcionalidade das proteínas nos alimentos. As condições de secagem e estocagem da proteína isolada são fatores que podem afetar as suas propriedades funcionais (SGARBIERI, 1996).

A lei exponencial vem sendo amplamente utilizada para estimar a constante de secagem de diversos produtos com alto conteúdo de umidade, estabelecendo que a taxa de secagem é proporcional ao teor de água livre do material. Esta equação é uma expressão análoga a lei de resfriamento de Newton, considerando-se que a resistência ao transporte de umidade concentra-se no interior do material, desconsiderando os efeitos da camada limite, conforme indica a Equação 1 (LAHSASNI et al., 2004):

$$\frac{dX}{dt} = -K(\bar{X} - X_E) \quad (1)$$

A Equação 1 é normalmente utilizada na forma integrada, com os limites de integração, no tempo igual a zero a umidade do material é igual a  $X_0$  e no tempo igual a  $t$  a umidade é  $X$ , com dois parâmetros, resultando na Equação 2:

$$\left( \frac{\bar{X} - X_E}{X_0 - X_E} \right) = A \exp(-K t) \quad (2)$$

Onde o fator de proporcionalidade  $K$  é denominado de constante de secagem, sendo esta uma função da velocidade, temperatura, umidade relativa do ar e umidade inicial e espessura do material a ser desidratado.

O objetivo do presente trabalho foi caracterizar a secagem de *Spirulina platensis*, sendo analisado o conteúdo de ficocianina e a solubilidade protéica em meio aquoso da biomassa seca em leito de jorro e em camada delgada.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

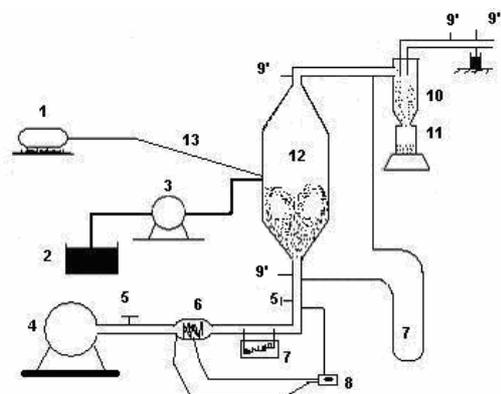
### 2.1. Matéria-prima

A matéria-prima utilizada foi a cianobactéria *Spirulina platensis*, cedida pelo laboratório de Engenharia Bioquímica/FURG. A cianobactéria foi cultivada na planta piloto, localizada no município de Santa Vitória do Palmar/RS, e posteriormente encaminhada ao Laboratório de Operações Unitárias/FURG para a realização dos ensaios de secagem.

### 2.2. Secagem de *Spirulina platensis*

#### 2.2.1. Leito de jorro

Foi utilizada uma célula de geometria cone-cilíndrica, a base cônica de vidro com ângulo incluído de 60° e altura de 15 cm. A coluna cilíndrica tinha diâmetro e altura de 17,5 e 75 cm respectivamente. O secador possui uma relação entre o diâmetro da célula ( $D_c$ ) e o diâmetro do orifício de entrada do ar ( $D_i$ ) igual a 6. O leito de partículas inertes era constituído de polietileno com diâmetro de 3 mm, esfericidade 0,7 e massa específica de 960 kg/m<sup>3</sup>. Foram utilizados 2,5kg de inerte. O diagrama esquemático do equipamento utilizado nos ensaios experimentais de secagem em leito de jorro (ver anexos) é apresentado na Figura 1:



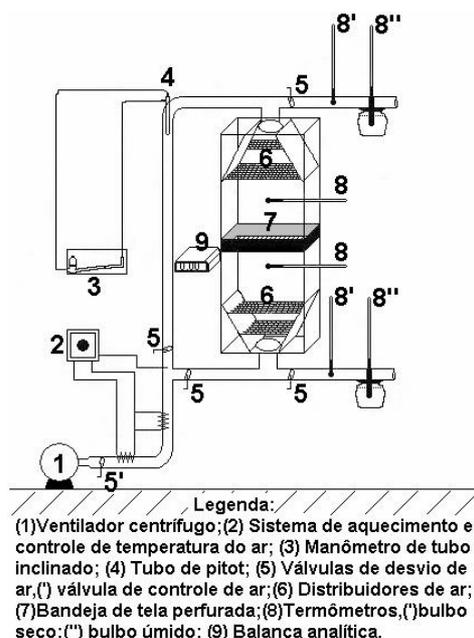
Legenda:  
1-Compressor; 2-Reservatório para pasta; 3-Bomba peristáltica;  
4-Soprador; 5-Válvula; 6-Sistema de aquecimento; 7-Manômetro;  
8-Controlador de temperatura; 9-Termopares (')bulbo seco, (")bulbo úmido; 10-Ciclone lapple; 11-Produto final desidratado; 12-Célula de secagem; 13-Atomizador.

**Figura 1:** Esquema do equipamento para secagem em leito de jorro.

O sistema era constituído de um soprador radial com potência de 6 kW e vazão máxima de  $0,1\text{m}^3/\text{s}$ . O ar foi aquecido em um sistema composto de três resistências elétricas com 800W de potência cada uma. Mediu-se a velocidade do ar de secagem através de placa de orifício, e a queda de pressão no leito com um manômetro de tubo em "U". As medidas de temperatura foram realizadas com termopares de cobre-constantan. Alimentou-se a solução de *Spirulina* com bomba peristáltica e foi feita atomização do tipo duplo fluido. A *Spirulina* seca foi coletada em um ciclone tipo Lapple.

### 2.2.2. Camada delgada

Foram realizados os ensaios de secagem de *Spirulina* em camada delgada, utilizando o equipamento apresentado na Figura 2 (ver anexos), sendo a bandeja de forma retangular (19 cm de largura e 25 cm de comprimento), onde as condições do ar de secagem foram: temperatura de  $60^\circ\text{C}$  e a velocidade de  $1,5\text{m/s}$  na câmara de secagem.



**Figura 2:** Esquema do secador descontínuo de bandejas com escoamento perpendicular do ar.

### 2.3. Metodologia analítica

Determinou-se a composição proximal da *Spirulina* através dos métodos analíticos de N-total, umidade, cinzas e lipídios, segundo as normas analíticas da A.O.A.C (1995). A composição de carboidratos foi feita por diferença.

Realizou-se a análise de solubilidade em meio aquoso pelo método adaptado MORR (1985) no produto final desidratado, inicialmente adicionou-se aproximadamente 2,5g de *Spirulina* em 50 mL de água destilada, a seguir levou-se ao agitador magnético por 15 minutos e posterior centrifugação a 3500 rpm por 15 minutos. Após a centrifuga, filtrou-se o conteúdo dos tubos, e procedeu-se a determinação de proteína do sobrenadante. O índice de proteína solúvel foi determinado sobre o conteúdo total de proteína das amostras e o teor de proteína solúvel.

A análise quantitativa de ficocianina foi feita por método espectrofotométrico, segundo BOUSSIBA (1979), na biomassa in-natura e após a secagem. Primeiramente determinou-se a massa seca da amostra, pesando 2g de amostra em cadinho de porcelana e colocando na estufa por 6 horas. O cálculo do percentual de massa seca é feito subtraindo a massa total seca do peso do cadinho e o resultado é dividido pela massa amostra úmida. Para determinar a ficocianina, pesou-se 40mg de *Spirulina* e adicionou-se 10mL de buffer fosfato 100mM, deixou-se em agitador magnético até a completa dissolução. Deixaram-se as amostras em descanso durante a noite no refrigerador a 4°C. Em seguida, levaram-se as amostras a agitação e posterior centrifugação a 10°C, 3500rpm por 5 minutos. Foi feita a leitura das absorvâncias a 615nm usando o buffer fosfato como branco. O cálculo da ficocianina foi feito segundo a Equação 3:

$$\% \text{Ficocianina} = \frac{A_{615} \cdot 10 \cdot 100}{3,36 \cdot (\text{massa Spirulina}_{(mg)}) \cdot (\% \text{massa seca})} \quad (3)$$

Onde: 3,36 é o coeficiente para ficocianina a 615nm, 10 é o volume total e 100 é o representativo de 100%.

## 2.4. Procedimento experimental

### 2.4.1. Leito de jorro

Antes de ser alimentada na célula de secagem, a *Spirulina* foi diluída a concentração de 5%. As condições de secagem em leito de jorro estabelecidas em testes preliminares foram as seguintes: taxa de alimentação de pasta de 0,4kg/h.kg de inerte, taxa de circulação do ar (v/vjm) igual a 1,8 e temperatura do ar de saída de  $\pm 70^\circ\text{C}$ . Os experimentos tiveram a duração de 2 horas, sendo que, a primeira meia hora foi para o equipamento entrar em regime. Foram retiradas amostras a cada 30 minutos durante o tempo de secagem para a realização das análises.

## 2.4.2. Camada delgada

A biomassa após a colheita dos tanques de cultivo foi filtrada e prensada até a umidade de 76%. A secagem foi na forma de pellets cilíndricos longos com diâmetro de 3 mm. A massa das amostras foi medida em uma balança eletrônica com precisão de 0,01g, a carga de sólidos na bandeja foi de 4 kg/m<sup>2</sup>. As temperaturas de bulbo seco antes e depois da bandeja e a temperatura de bulbo úmido na saída do secador foram medidas através de termopares (cobre-constantan). Foram anotados os valores de massa e temperatura a cada 5 minutos, durante o período dos ensaios de secagem. A amostra foi seca até a umidade comercial (abaixo de 10%).

## 2.5. Procedimento de cálculo

Os períodos da operação de secagem em camada delgada foram analisados através da curva de taxa de secagem (N) em função da umidade do material (X).

A constante de secagem (K) foi obtida a partir das curvas do adimensional de água livre  $[(X-X_E)/(X_0 - X_E)]$  em função do tempo (t) pelo uso da solução da Equação 1, ajustada a dois parâmetros, conforme apresentada na Equação 2. Fez-se a regressão usando o método Quasi-Newton do software STATISTICA FOR WINDOWS e obteve-se o valor de K.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizadas as análises da composição proximal para a caracterização da *Spirulina* após prensagem e antes da secagem. Estes resultados são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1:** Composição proximal da *Spirulina* “in natura” em base úmida.

Especificação	Composição (%)
Umidade	76,7±0,6
Cinzas	1,8±0,2
Proteína	16,9±2,4
Lipídios	1,8±0,1
Carboidratos*	2,8±1,9

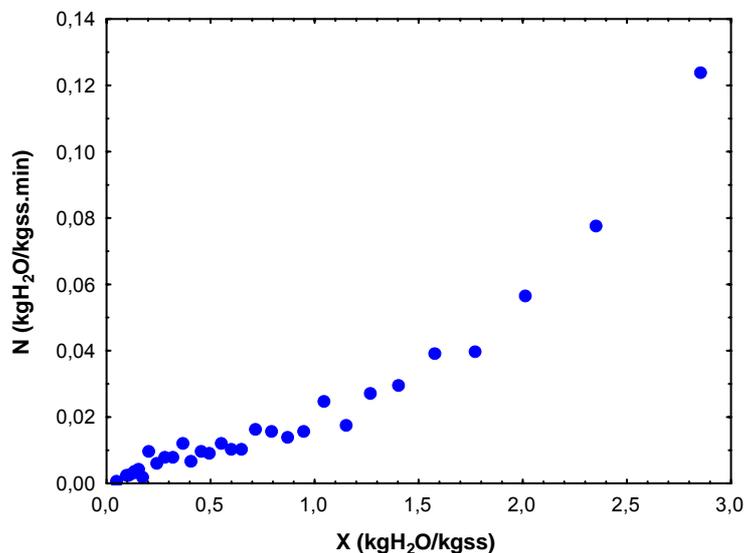
\*por diferença.

### 3.1. Caracterização da secagem

As curvas que descrevem o comportamento da secagem da microalga *Spirulina* estão expressas nas Figuras 3 e 4.

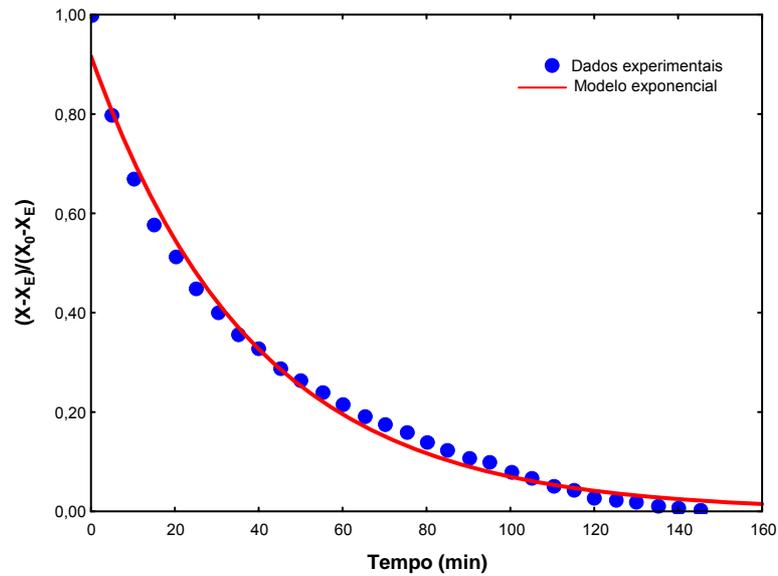
A Figura 3 mostra o período de secagem, onde pode-se observar somente a existência do período de taxa decrescente. A não existência de taxa constante é característica de produtos de elevado conteúdo protéico, apresentando um teor de umidade inicial não elevado, como pode ser observado na Tabela 1, devido ao processo de prensagem que a matéria-prima é submetida antes da secagem.

A taxa de secagem das amostras em função do tempo foi obtida derivando a curva de secagem expressa por umidade em base seca (X) em função do tempo, e está apresentada na Figura 3.



**Figura 3:** Curva da taxa de secagem em função da umidade de *Spirulina*, 60°C.

A curva do adimensional de água livre em base seca em função do tempo, Figura 4, foi utilizada para o cálculo da constante de secagem. Esta Figura apresenta o ajuste dos dados experimentais através da Equação 2 para todo o tempo do período da taxa decrescente.



**Figura 4:** Adimensional de água livre em função do tempo para a temperatura de 60°C e carga de 4kg/m<sup>2</sup>.

A secagem de *Spirulina platensis* em camada delgada ocorreu durante o período de taxa decrescente, no tempo total de secagem de 150 min com uma constante de secagem de 0,025 min<sup>-1</sup>. A correlação exponencial apresentou um bom ajuste para o cálculo da constante de secagem, sendo o valor encontrado igual a 0,99.

### 3.2. Solubilidade e Ficocianina

#### 3.2.1. Solubilidade

A Tabela 2 apresenta os resultados encontrados para a solubilidade em meio aquoso para o leito de jorro e camada delgada.

**Tabela 2:** Valores médios para a solubilidade protéica da *Spirulina* por diferentes métodos de secagem.

Método de secagem	Solubilidade protéica (%)
“In natura”	25,2±3,7
Leito de jorro	35,1±4,5
Camada delgada	37,8±2,5

A microalga *Spirulina* comercialmente é seca em secadores tradicionais de bandeja ou em spray dryer. Através da Tabela 2, pode-se observar que o material seco em leito de jorro apresentou um valor de solubilidade próximo ao encontrado na secagem em

camada delgada. Segundo Sgarbieri (1996) a solubilidade das proteínas aumenta com aumento de temperatura em uma faixa de 40-50°C, acima deste valor a solubilidade tende a diminuir devido a desnaturação dessas proteínas. Lopes (2005) estudou a solubilidade protéica da cianobactéria *Aphanothece microscópica Nägeli* seca em camada delgada na faixa de temperatura de 40-60°C e nas espessuras de 3, 5 e 7 mm e seca por liofilização, considerado este como padrão para a secagem de cianobactérias, verificando que a solubilidade encontrada foi superior em camada delgada, sendo o valor encontrado em torno de 30%, enquanto que o produto liofilizado ficou em 18%.

### 3.2.2. Ficocianina

A Tabela 3 apresenta os resultados encontrados para a ficocianina de *Spirulina* in natura e após a secagem, os valores foram obtidos através da Equação 3.

**Tabela 3:** Conteúdo de ficocianina em *Spirulina* seca em diferentes métodos de secagem.

Método de secagem	%Ficocianina
In natura	65,1±0,1
Leito de jorro	60,7±0,1
Camada delgada	54,5±0,1

Através da Tabela 3, pode-se observar que a amostra seca em leito de jorro apresentou maior recuperação de ficocianina em relação a matéria-prima, em torno de 93%, enquanto que em camada delgada essa recuperação foi de 83%. Sarada *et al* (1999) estudou a recuperação de ficocianina em diferentes métodos de secagem e verificou que a amostra seca em spray dryer apresentou maior recuperação, em torno de 55%, em camada delgada a 60°C a recuperação encontrada pelo autor foi de 54%. A recuperação superior encontrada em leito de jorro pode ser explicada pelo fato da temperatura de entrada no secador spray dryer, utilizada pelo o autor foi de 150°C, enquanto que, no leito de jorro foi em torno de 110°C e a temperatura de saída a 70°C.

## 4. CONCLUSÃO

Para a secagem em camada delgada das amostras na forma de pellets prensados ( $X_0=76\%$ ), pode-se constatar a existência somente do período de taxa decrescente para alcançar a umidade comercial do produto final (abaixo de 10% b.u.).

O secador de leite de jorro apresentou maior recuperação de ficocianina quando comparado ao produto seco em bandeja.

As duas técnicas de secagem apresentaram um aumento similar na solubilidade em meio aquoso da *Spirulina*.

## Agradecimentos

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

## 5. NOMENCLATURA

A	Constante equação 2	[adimensional]
K	Constante de secagem	[min <sup>-1</sup> ]
t	Tempo	[min]
X <sub>0</sub>	Umidade inicial (base seca)	[kg.kg <sup>-1</sup> ]
$\bar{X}$	Umidade média (base seca)	[kg.kg <sup>-1</sup> ]
X <sub>E</sub>	Umidade de equilíbrio (base seca)	[kg.kg <sup>-1</sup> ]

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). Official Methods of Analysis. 14<sup>a</sup> ed., v.1, 1995.

[2] BENEDETTI, S.; BENVENUTI, F.; PAGLIARANI, S.; FRANCOGLI, S.; SCOGLIO, S.; CANESTRARI, F. Antioxidant properties of a novel Phycocyanin extract from the blue-green alga *Aphanizomenon flos-aquae*. Life Sciences, v.75, p. 2353-2362, 2004.

[3] BHAT, V.B. e MADYASTHA, K.M. C-Phycocyanin: a potent peroxy radical scavenger *in vivo* and *in vitro*. Biochemical and Biophysical Research Communications, v. 275, p.20-25, 2000.

[4] BOUSSIBA S.; RICHMOND. A. Isolation and purification of phycocyanins from the blue-green alga *Spirulina platensis*. Arch. Microbiol. 120: 155-159, 1979.

[5] FILHO, M.P.; TIBA, R.M.; ROCHA, S.C.S. Fluidodinâmica de partículas polidispersas em leite de jorro. Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2004.

[6] LAHSASNI, S.; KOUHILA, M.; MAHROUZ, M.; JAOUHARI, J.T. Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). Journal of Food Engineering, v.61, p. 173-179, 2004.

[7] LOPES, E.J. Secagem de *Aphanothece microscópica Nägeli* cultivada no efluente da parboilização do Arroz. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos. Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, RS, 2005.

[8] MEDEIROS, M.F.D.; ALSINA, O.L.S.; ROCHA, S.C.S.; JERONIMO, C.E.M.; MEDEIROS, U.K.L. Drying of pastes in spouted beds: Influence of the paste composition on the material retention in the bed. Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS), vol. C, p. 1529-1536, 2004.

[9] MORIST, A.; MONTESINOS, J.L.; CUSIDÓ, J.A.; GÒDIA, F. Recovery and treatment of *Spirulina platensis* cells cultured in a continuous photobioreactor to be used as food. Process Biochemistry, v.37, p. 535-547, 2001.

[10] MORR, C.V.; GERMAN, B.; KINSELA, J.E.; REGENSTEIN, J.M.; VAN-BUREN, J.P.; KILARA, A.; LEWIS, B.A.; MAGNINO, M.E. Collaborative study to develop a standardized food protein solubility procedure. Journal of Food Science, v. 50, p.1715-1718, 1985.

[11] PEIXOTO, M.P.G.; MONTEIRO, A.P.R.; FREITAS, L.A.P. Determination of residence time of paste during drying of a phytomedicine in a spouted bed. Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS), vol. A, p.232-238, 2004.

[12] SARADA, R.; PILLAI, M.G.; RAVISHANKAR, G.A. Phycocyanin from *Spirulina* sp: influence of processing of biomass on phycocyanin yield, analysis of efficacy of extraction methods and stability studies on phycocyanins. Process Biochemistry, v. 34 p. 795–801, 1999.

[13] REDDY, M.C.; SUBHASHINI, J.; MAHIPAL, S.V.K.; BHAT, V.B.; REDY, P.S.; KIRANMI, G.; MADYASTHA, K.M.; REDDANNA, P. C-Phycyanin, a selective cyclooxygenase-2 inhibitor, induces apoptosis in lipopolysaccharide-stimulated RAW 264.7 macrophages. Biochemical and Biophysical Research Communications, v.304, p.385-392, 2003.

[14] SGARBIERI, V. C. Proteínas em alimentos protéicos: Propriedades, Degradações, Modificações. Editora e Livraria Varela, São Paulo, SP, 1996.

#### 4. CONCLUSÃO GERAL

A secagem de *Spirulina platensis* com a amostra prensada na forma de pellets ( $x_0=76\%$ ) em camada delgada com escoamento perpendicular do ar, tendo como fatores de estudo a temperatura e a carga de amostra na bandeja, ocorreu durante o período de taxa decrescente, não apresentando taxa constante. Para a solubilidade em meio ácido, na análise estatística realizada ao nível de 95%, a temperatura e a carga de amostra foram significativas, sendo que a melhor região de trabalho foi de 60°C e 4 kg/m<sup>2</sup>.

O secador de leite de jorro apresentou um comportamento estável durante o período de realização dos experimentos de secagem. Para a secagem de *Spirulina platensis* em leite de jorro, a geometria e a concentração de suspensão que apresentaram melhores resultados foram respectivamente, CSB e 5%, em relação a propriedades funcionais e nutricionais, sendo que a digestibilidade “in vitro” diminuiu independente da concentração e geometria, em média de 57%.

As duas técnicas de secagem apresentaram um aumento similar na solubilidade em meio aquoso da *Spirulina*. O secador de leite de jorro (CSB) apresentou maior recuperação de ficocianina quando comparado ao produto seco em camada delgada.

#### 4.1. Sugestões para trabalhos futuros

Após o desenvolvimento desse trabalho são feitas as seguintes sugestões:

- Analisar a cinética de variação de propriedades funcionais (solubilidade e digestibilidade) na secagem em camada delgada;
- Analisar a cinética de variação de ficocianina da *Spirulina* ao longo da secagem em camada delgada;
- Realizar a modelagem físico-matemática de *Spirulina platensis* com os resultados obtidos experimentalmente na secagem em camada delgada, considerando o encolhimento do material durante a operação;
- Estudar as condições operacionais do processo de secagem de *Spirulina platensis* em leito de jorro utilizando diferentes geometrias;
- Avaliar a qualidade do produto desidratado, segundo seus aspectos sensoriais, microbiológicos e nutricionais;
- Realizar levantamento de custos no processo de secagem de *Spirulina platensis*.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). Official Methods of Analysis. 14<sup>a</sup> ed., v.1, 1995.

BALA, B.K. & WOODS, J.L. **Thin layer drying models for malts**. Journal Food Engineering, v.16, p. 239-149, 1992.

BATISTA, L.M.; SOARES, N.M.; ROSA, C.A.; PINTO, L.A.A. **Secagem em camada delgada de quitosana purificada: estudo da operação através do uso da metodologia da superfície de resposta**. Revista Vetor, v.14 (1/2), p. 39-56, 2004.

BENEDETTI, S.; BENVENUTI, F.; PAGLIARANI, S.; FRANCOGLI, S.; SCOGLIO, S.; CANESTRARI, F. **Antioxidant properties of a novel Phycocyanin extract from the blue-green alga *Aphanizomenon flos-aquae***. Life Sciences, v.75, p. 2353-2362, 2004.

BHAT, V.B. e MADYASTHA, K.M. **C-Phycocyanin: a potent peroxy radical scavenger *in vivo* and *in vitro***. Biochemical and Biophysical Research Communications, v. 275, p.20-25, 2000.

BOUSSIBA S.; RICHMOND. A. **Isolation and purification of phycocyanins from the blue-green alga *Spirulina platensis***. Arch. Microbiol. 120: 155-159, 1979.

CHIRIFE, J. **Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods**. In: MUJUNDAR, A. Advances in drying. Washington/ New York/ London. Ed. Hemisphere Publishing Corporation, v.3, p. 73-102, 1983.

COLLA, L.M. **Influência das condições de crescimento sobre o potencial antioxidante da microalga *Spirulina platensis* e seu potencial na redução da hipercolesterolemia**. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos. Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, RS, 2002.

CORONEL, E. L.; TOBINAGA, S. **Drying the okara in a spouted bed**. Proceedings of the 14th International Drying Symposium. v. C, p. 1767-1775, São Paulo: 2004.

COUGO, R.S. **Influência da temperatura, iluminância e taxa de aeração na concentração de biomassa da cianobactéria *Spirulina platensis***. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos. Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, RS, 2001.

COZZA, K.L. ***Spirulina platensis* em meios naturais e sintéticos: fatores nutricionais e custos experimentais**. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos. Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, RS, 1999.

DANDAMRONGRAK, R.; YOUNG, G.; MASON, R. **Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models**. Journal of Food Engineering, v. 55, p.139–146, 2002.

DESMORIEUX, H.; NADÈGE, D. **Convective drying of *Spirulina* in thin layer**. Journal Food Engineering, V. 66 p. 497–503, 2005.

DESMORIEUX, H.; HERNANDEZ, F. **Biochemical and physical criteria of *Spirulina* after different drying process**. Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS), vol. B, p. 900-907, 2004.

ESTRADA, J.E.P.; BESCÓS, P.B.; FRESNO, A.M.V. **Antioxidant activity of different fractions of *Spirulina platensis* protean extract**. IL Farmaco, v. 56, p.497-500, 2001.

FENNEMA, O.R. **Química de los Alimentos**, 2ª edição, Editorial Acribia, 549p, 1993.

FILHO, M.P.; TIBA, R.M.; ROCHA, S.C.S. **Fluidodinâmica de partículas polidispersas em leite de jorro**. Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2004.

FLORO, L.M.S. **Obtenção de sopa a partir de rejeitos de hortifrutigranjeiros: Avaliação da secagem em leite de jorro**. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos. Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, RS, 2004.

FREIRE, J. In: FREIRE, J.T.; SARTORI, T.D.J.M. **Tópicos especiais em secagem**. Editora São Carlos, UFSCar, São Carlos, SP, V. 1, p. 43-81, 1992.

FREITAS, L.A.P.; FREIRE, J.T. **Fluidodinâmica de um leite de jorro cônico**. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, publicado em CD-ROM, 2000.

GEANKOPLIS, C. **Transport and Unit Operations**. 2<sup>nd</sup> Ed. Prentice-Hall International Inc. New Jersey, USA, 1983.

GISHLER, R.E. & MATHUR, K. B. **AIChE Journal**, v.1, p.157 – 171, 1955.

GOULART, G.A. **Secagem de plasma bovino em leite de jorro cônico**. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos. Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, RS, 2000.

HENRIKSON, R. **Microalga *Spirulina* superalimento del futuro**. Ediciones Urano, 1994.

IGLESIAS, H. A. & CHIRIFE, J. **An alternative to the GAB model for the mathematical description of moisture sorption isotherms of foods**. Food Research International, v. 28, p. 317-321, 1995.

IORDACHE, M., JELEM, P. **High pressure microfluidization treatment of heat denatured wey proteins for improved functionality**. Innovation Food Science and Emerging Technologies. n.1, p.1-10, 2003.

KARATHANOS, V.T. **Determination of water content of dried fruits by drying kinetics**. Journal of Food Engineering, n. 39, p. 337-334, 1999.

KARATHANOS, V.T.; KANELLOPOULOS, N.K.; V. G. BELESSIOTIS, V.G. **Development of Porous Structure during Air Drying of Agricultural Plant Products**. Journal of Food Engineering, n. 29, p. 167-183, 1996.

KRÜGER, C.; CENI, G.; SCARBIERI, V.; CÂNDIDO, L. **Propriedade hidrofílica de concentrados protéicos de leite bovino**. Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos, n.36(2), p.122-127, 2002.

LABUZA, T. P. **Sorption phenomena in foods**. Food Technology, v. 23, p. 15-19, 1968.

LAHSASNI, S.; KOUHILA, M.; MAHROUZ, M.; JAOUHARI, J.T. **Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*)**. Journal of Food Engineering, v.61, p. 173-179, 2004.

LEHNINGER, A.L.; NELSON, D.L.; COX, M.M. **Princípios da Bioquímica**. 2ª edição, São Paulo, Sarvier, 1995.

LIMA, M. F. M.; ROCHA, S. C. S.; ALSINA, O. L. S.; JERÔNIMO, C. E. M.; MATA, A. L. M. **Influência da composição química dos materiais no desempenho do processo de secagem de polpas de frutas em leito de jorro**. Anais XIII COBEQ, 2002.

LOPES, E.J. **Secagem de *Aphanthece microscópica Nægeli* cultivada no efluente da parboilização do Arroz**. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos. Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, RS, 2005.

MARTINS, P.C.; PORTO, P.S.S; PINTO, L.A.A. **Estudo das propriedades físicas e de transporte na secagem de cebola (*Allium cepa* L.) em camada delgada**. Ciência e Tecnologia de Alimentos, v.24(3), p. 319-326, 2004.

MARTINS, P.C.; PINTO, L.A.A. **Caracterização da secagem de cebola (*Allium cepa* L.) em camada delgada e reidratação do produto desidratado**. Brazilian Journal of Food Technology. Ital/Campinas, São Paulo, v.6 (123), p.143-151, 2003.

MARKOWSKI, A.; KAMINSKI, W. **Hydrodynamic Characteristics of Jet Spouted Bed**, Can. J. Chem. Eng., n. 61, p. 377-381, 1983.

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. Editora UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1997.

MASSARO, A.F.; PINTO, L.A.A. **Enriquecimento protéico de farelo de arroz desengordurado, com sangue bovino, utilizando a técnica de leito de jorro**. Revista Instituto Adolfo Lutz, n.61(2), p.77-84, 2002.

MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. Ed. Academic Press. New York. p. 304p, 1974.

Mc CORMICK, P.Y. **Solids Drying Fundamentals**. PERRY, R.H and CHINTON, C.H, Chemical Engineer's Handbook, Editora Mc Graw-Hill. Co 5ª edição, 1983.

MEDEIROS, M.F.D., ALSINA, O.L.S, ROCHA, S.C.S., JERONIMO, C.E.M., MEDEIROS, U.K.L. **Drying of pastes in spouted beds: Influence of the paste composition on the material retention in the bed.** Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS), vol. C, p. 1529-1536, 2004.

MIR, M. A & NATH, N. **Sorption isotherms of fortified mango bars.** Journal of Food Engineering, v. 25. p. 141-50, 1995.

MORIST, A.; MONTESINOS, J.L.; CUSIDÓ, J.A.; GÒDIA, F. **Recovery and treatment of *Spirulina platensis* cells cultured in a continuous photobioreactor to be used as food.** Process Biochemistry, v.37, p. 535-547, 2001.

MORR, C.V.; GERMAN, B.; KINSELA, J.E.; REGENSTEIN, J.M.; VAN-BUREN, J.P.; KILARA, A.; LEWIS, B.A.; MAGNINO, M.E. **Collaborative study to develop a standardized food protein solubility procedure.** Journal of Food Science, v. 50, p.1715-1718, 1985.

NAYLOR, C.; MAIREAD, C.; CALOW, P. **Freeze dried *Chlorella vulgares* as food for *Daphnia Straus* in toxicity testing.** Ecotoxicology and Environment Safety, n.15, p.620-630, 1993.

OLIVEIRA, H. V.A., FREITAS, L.A.P. **The effect of processing factors on the efficiency of hard gelatin capsules coating in a spouted bed.** Proceedings of the 14th International Drying Symposium. v. B, p. 852 - 859, São Paulo: 2004.

PEIXOTO, M.P.G.; MONTEIRO, A.P.R.; FREITAS, L.A.P. **Determination of residence time of paste during drying of a phytomedicine in a spouted bed.** Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS), vol. A, p.232-238, 2004.

PERRY, R.H. & CHILTON, G.H. **Manual de Engenharia Química.** 5<sup>a</sup> Ed. Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980.

PEZZUTI, A.; CRAPISTE, G.H. **Sorptional equilibrium and drying characteristic of garlic.** Journal of Food Engineering, V. 29, p. 75-79, 1997.

PHAM, Q.T., Canadian Journal Chemical Engineering. v.61, p.426–434, 1983.

PINTO, L.A.A.; TOBINAGA, S e PENEIREIRO, J.B. **Difusão líquida na secagem de músculos de peixe. In: Encontro sobre escoamento em meios porosos.** Anais do XX ENEMP. São Carlos, SP, 1992b.

REDDY, M.C.; SUBHASHINI, J.; MAHIPAL, S.V.K.; BHAT, V.B.; REDY, P.S.; KIRANMI, G.; MADYASTHA, K.M.; REDDANNA. **P. C-Phycyanin, a selective cicloxygenase-2 inhibitor, induces apoptosis in lipopolysaccharide-stimulated RAW 264.7 macrophages.** Biochemical and Biophysical Research Communications, v.304, p.385-392, 2003.

RICHMOND, A. IN: BOROWITZKA, M. AND BOROWITZKA, L. **Products from algae, biotechnology in the Asia Pacific, Region.** University of Malaya, 477p. 1994.

ROSTEIN, E. & CORNISH, A.R.H. **Prediction of the Sorptional equilibrium relationship for the drying of foodstuffs.** A.I.Ch.E. Journal, V. 24, n6, p. 956-966, 1978.

SARADA, R.; PILLAI, M.G.; RAVISHANKAR, G.A. **Phycocyanin from *Spirulina* sp: influence of processing of biomass on phycocyanin yield, analysis of efficacy of extraction methods and stability studies on phycocyanins.** Process Biochemistry, v. 34 p. 795–801, 1999.

SGARBIERI, V. C. **Proteínas em alimentos protéicos: Propriedades, Degradações, Modificações.** Editora e Livraria Varela, São Paulo, SP, 1996.

SPITZNER, N.P.I. & FREIRE, J. T. **Estabilidade do leite de jorro na secagem de pastas.** Anais do XXX ENEMP, 2002.

STRUMILLO, C.Z.; KUDRA, T. **Drying: Principles, Applications and Design.** In Hughes, R. Topics in Chemical Engineering. v.3, UK: Gordon and Breach Science Publisher, 1986.

TOGRUL, I.T.; PEHLIVAN, D. **Modeling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process.** Journal of Food Engineering, V.65, P.413–425, 2004.

TIMMERMANN, E.O.; CHIRIFE, J. & IGLESIAS, H.A. **Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters?** Journal of Food Engineering, v. 48, p. 19-31, 2001.

VONSAHK, A. ***Spirulina platensis* (Arthrospira) Physiology, cell-biology and biotechnology.** London: Taylor & Francis, 1997.

**Tabela A1:** Dados experimentais da secagem de *Spirulina platensis* em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 50°C e carga na bandeja de 4 kg/m<sup>2</sup> (Ensaio 1). A umidade inicial da amostra é de 76,7% (b.u.) e 3,167 (b.s.). A massa inicial da bandeja foi de 190,09g.

Tempo (min)	X (gH <sub>2</sub> O/gss)	X/X <sub>0</sub>	N(gH <sub>2</sub> O/gss.min)	(X-X <sub>E</sub> )/(X <sub>0</sub> -X <sub>E</sub> )
0	3,167	1,000	0,088	1,000
5	2,726	0,861	0,056	0,856
10	2,443	0,771	0,047	0,763
15	2,206	0,697	0,042	0,686
20	1,996	0,630	0,035	0,617
25	1,819	0,574	0,039	0,559
30	1,619	0,511	0,024	0,494
35	1,498	0,473	0,028	0,454
40	1,354	0,428	0,017	0,407
45	1,268	0,400	0,022	0,379
50	1,158	0,366	0,016	0,343
55	1,077	0,340	0,014	0,316
60	1,009	0,318	0,019	0,294
65	0,913	0,288	0,013	0,263
70	0,847	0,268	0,014	0,241
75	0,777	0,245	0,011	0,218
80	0,720	0,227	0,011	0,199
85	0,662	0,209	0,010	0,181
90	0,609	0,192	0,010	0,163
95	0,556	0,175	0,008	0,146
100	0,514	0,162	0,010	0,132
105	0,462	0,146	0,010	0,115
110	0,412	0,130	0,006	0,099
115	0,380	0,120	0,009	0,088
120	0,331	0,104	0,008	0,072
125	0,290	0,092	0,011	0,059
130	0,231	0,073	0,003	0,040
145	0,181	0,057	0,006	0,023
150	0,151	0,048	0,003	0,014
155	0,136	0,043	0,004	0,016
160	0,110	0,036	0,002	0,010

165	0,103	0,032	0,002	0,009
170	0,091	0,029	0,002	0,002
175	0,078	0,025	0,003	0,002
180	0,062	0,020	0,001	0,001

---

**Tabela A2:** Dados experimentais da secagem de *Spirulina platensis* em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 60°C e carga na bandeja de 4 kg/m<sup>2</sup> (Ensaio 2). A umidade inicial da amostra é de 76,7% (b.u.) e 3,167 (b.s.). A massa inicial da bandeja foi de 190,02g.

Tempo (min)	X(gH <sub>2</sub> O/gss)	X/X <sub>0</sub>	N(gH <sub>2</sub> O/gss.min)	(X-X <sub>E</sub> )/(X <sub>0</sub> -X <sub>E</sub> )
0	3,167	0,999	0,124	0,999
5	2,547	0,803	0,078	0,799
10	2,159	0,681	0,057	0,673
15	1,875	0,592	0,040	0,582
20	1,676	0,529	0,039	0,517
25	1,479	0,467	0,029	0,454
30	1,333	0,420	0,027	0,406
35	1,196	0,377	0,017	0,362
40	1,110	0,350	0,025	0,334
45	0,986	0,311	0,016	0,294
50	0,907	0,286	0,014	0,269
55	0,837	0,264	0,016	0,246
60	0,758	0,239	0,016	0,220
65	0,678	0,214	0,010	0,195
70	0,629	0,198	0,010	0,179
75	0,579	0,182	0,012	0,162
80	0,519	0,164	0,009	0,143
85	0,475	0,150	0,010	0,129
90	0,426	0,134	0,006	0,113
95	0,394	0,124	0,012	0,103
100	0,335	0,106	0,008	0,084
105	0,296	0,093	0,008	0,071
110	0,256	0,081	0,006	0,058
115	0,226	0,071	0,010	0,049
120	0,178	0,056	0,002	0,033
125	0,169	0,053	0,004	0,030
130	0,148	0,047	0,004	0,023
135	0,130	0,041	0,003	0,018
140	0,114	0,036	0,003	0,012
145	0,101	0,032	0,002	0,008
150	0,089	0,028	0,001	0,004

**Tabela A3:** Dados experimentais da secagem de *Spirulina platensis* em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 50°C e carga na bandeja de 6 kg/m<sup>2</sup> (Ensaio 3). A umidade inicial da amostra é de 76,7% (b.u.) e 3,167 (b.s.). A massa inicial da bandeja foi de 284,94g.

Tempo (min)	X(gH <sub>2</sub> O/gss)	X/X <sub>0</sub>	N(gH <sub>2</sub> O/gss.min)	(X-X <sub>E</sub> )/(X <sub>0</sub> -X <sub>E</sub> )
0	3,167	1,000	0,12065	1,000
5	2,564	0,810	0,02749	0,803
10	2,426	0,766	0,05654	0,758
15	2,144	0,677	0,03984	0,665
20	1,944	0,614	0,03899	0,600
25	1,749	0,552	0,02539	0,536
30	1,623	0,512	0,02340	0,495
35	1,506	0,475	0,02132	0,457
40	1,399	0,442	0,02150	0,422
45	1,291	0,408	0,01746	0,386
50	1,204	0,380	0,01661	0,358
55	1,121	0,354	0,01457	0,331
60	1,048	0,331	0,01474	0,307
65	0,975	0,308	0,01261	0,283
70	0,912	0,288	0,01261	0,262
75	0,848	0,268	0,00936	0,242
80	0,802	0,253	0,01541	0,226
85	0,725	0,229	0,00705	0,201
90	0,689	0,218	0,00869	0,190
95	0,646	0,204	0,00901	0,175
100	0,601	0,190	0,00790	0,161
105	0,561	0,177	0,00880	0,148
110	0,517	0,163	0,00819	0,133
115	0,476	0,150	0,00708	0,120
120	0,441	0,139	0,01024	0,108
125	0,390	0,123	0,00564	0,092
130	0,362	0,114	0,00641	0,082
135	0,330	0,104	0,00737	0,072
140	0,293	0,092	0,00559	0,060
145	0,265	0,084	0,00643	0,051
150	0,233	0,073	0,00433	0,040

155	0,211	0,067	0,00409	0,033
165	0,170	0,054	0,00135	0,020
170	0,163	0,052	0,00562	0,017
175	0,135	0,043	0,00313	0,014
180	0,120	0,038	0,00313	0,013
185	0,104	0,033	0,00219	0,012
190	0,093	0,029	0,00129	0,011
195	0,087	0,027	0,00094	0,009
200	0,082	0,026	0,00094	0,008
205	0,077	0,024	0,00058	0,006
210	0,074	0,023	0,00058	0,003
215	0,071	0,023	0,00058	0,002
220	0,068	0,022	0,00031	0,002

**Tabela A4:** Dados experimentais da secagem de *Spirulina platensis* em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 60°C e carga na bandeja de 6 kg/m<sup>2</sup> (Ensaio 4). A umidade inicial da amostra é de 76,7% (b.u.) e 3,167 (b.s.). A massa inicial da bandeja foi de 285,29g.

Tempo (min)	X(gH <sub>2</sub> O/gss)	X/X <sub>0</sub>	N(gH <sub>2</sub> O/gss.min)	(X-X <sub>E</sub> )/(X <sub>0</sub> -X <sub>E</sub> )
0	3,167	1,000	0,0876	1,000
5	2,729	0,862	0,0649	0,858
10	2,405	0,759	0,0495	0,753
15	2,157	0,681	0,0460	0,673
20	1,928	0,609	0,0299	0,599
25	1,778	0,561	0,0251	0,551
30	1,652	0,522	0,0247	0,510
35	1,529	0,483	0,0211	0,470
40	1,423	0,449	0,0189	0,436
45	1,329	0,420	0,0164	0,405
50	1,247	0,394	0,0151	0,379
55	1,171	0,370	0,0141	0,354
60	1,101	0,348	0,0137	0,332
65	1,032	0,326	0,0108	0,309
70	0,979	0,309	0,0167	0,292
75	0,895	0,283	0,0084	0,265
80	0,853	0,269	0,0111	0,251
85	0,798	0,252	0,0113	0,233
90	0,741	0,234	0,0132	0,215
95	0,675	0,213	0,0037	0,194
100	0,656	0,207	0,0076	0,188
105	0,618	0,195	0,0085	0,175
110	0,576	0,182	0,0070	0,162
115	0,541	0,171	0,0087	0,150
120	0,497	0,157	0,0077	0,136
125	0,459	0,145	0,0078	0,124
130	0,420	0,133	0,0059	0,111
135	0,390	0,123	0,0075	0,102
140	0,353	0,111	0,0079	0,089
145	0,313	0,099	0,0035	0,077
150	0,295	0,093	0,0062	0,071

155	0,264	0,083	0,0055	0,061
160	0,237	0,075	0,0061	0,052
165	0,207	0,065	0,0034	0,042
170	0,190	0,060	0,0052	0,037
175	0,164	0,052	0,0038	0,028
180	0,145	0,046	0,0034	0,022
185	0,128	0,040	0,0024	0,017
190	0,116	0,036	0,0022	0,013
195	0,105	0,033	0,0021	0,009
200	0,094	0,030	0,0054	0,006
205	0,067	0,021	0,0003	-0,003

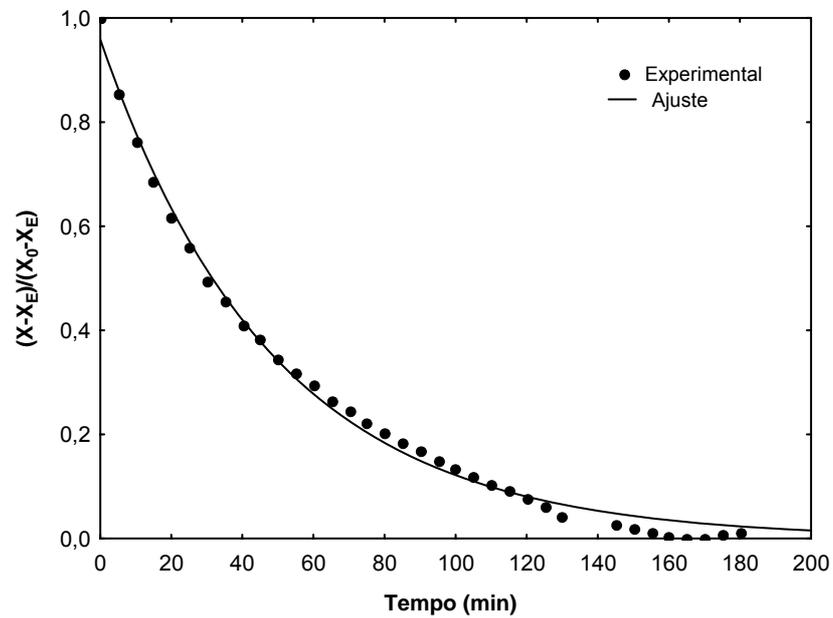
---

**Tabela A5:** Relação da concentração de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> com umidade relativa a 50 e 60°C.

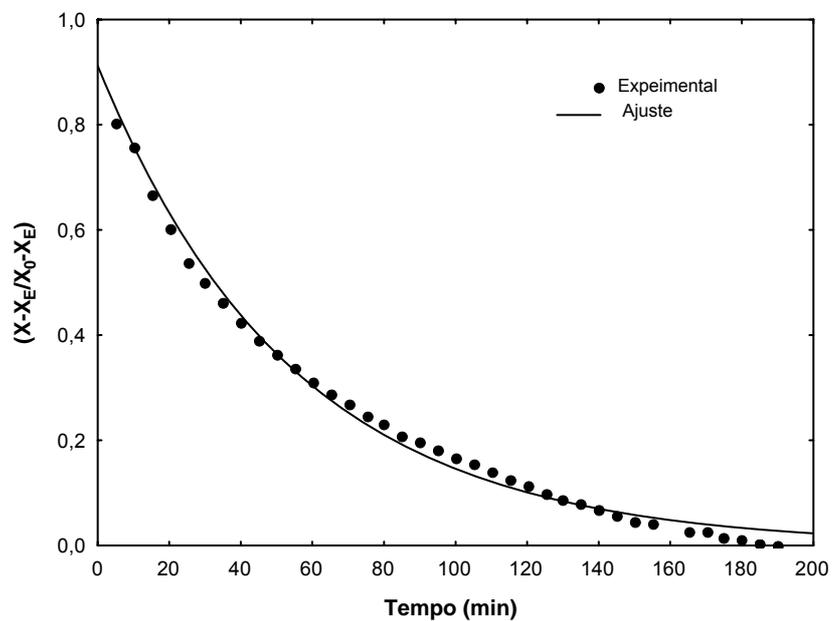
Concentração H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%p/p)	Temperatura 50°C	Temperatura 60°C
20	0,888	0,890
25	0,829	0,830
30	0,770	0,776
35	0,681	0,682
40	0,582	0,584
45	0,483	0,488
50	0,380	0,388
55	0,280	0,287
60	0,189	0,199
65	0,110	0,124
70	0,055	0,061

Gráficos apresentados a seguir foram utilizados para a caracterização da secagem de *Spirulina platensis* em camada delgada com escoamento do ar perpendicular, nos ensaios de secagem do planejamento experimental.

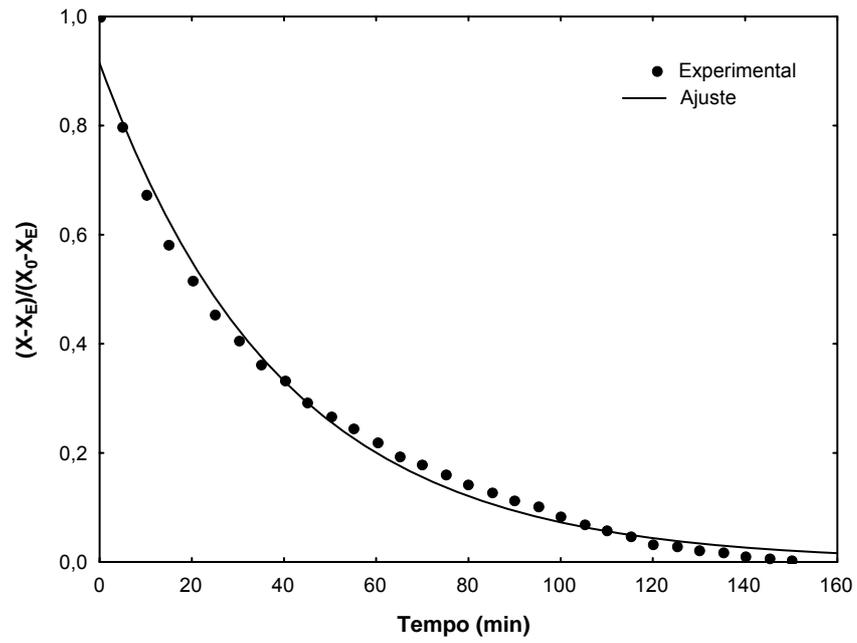
As Figuras A1, A2, A3 e A4 foram utilizadas para determinar o valor da constante de secagem (K) no artigo 1.



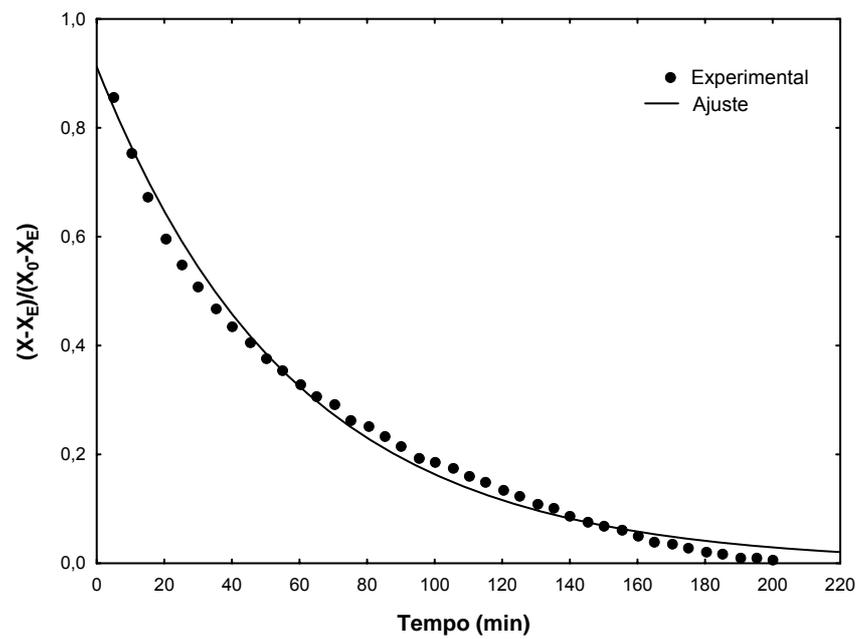
**Figura A1:** Adimensional de água livre em função do tempo para a temperatura de 50°C e carga de 4 kg/m<sup>2</sup>.



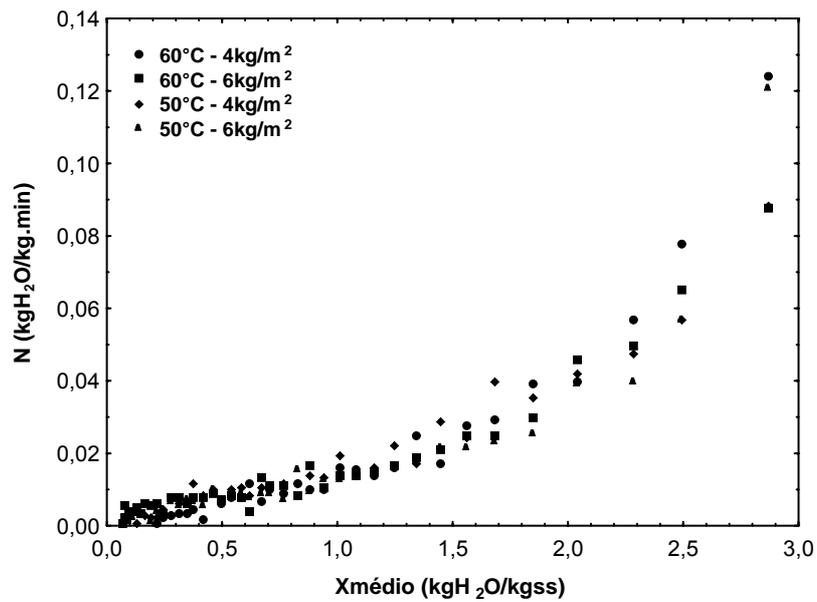
**Figura A2:** Adimensional de água livre em função do tempo para a temperatura de 50°C e carga de 6 kg/m<sup>2</sup>.



**Figura A3:** Adimensional de água livre em função do tempo para a temperatura de 60°C e carga de 4 kg/m<sup>2</sup>.



**Figura A4:** Adimensional de água livre em função do tempo para a temperatura de 60°C e carga de 6 kg/m<sup>2</sup>.



**Figura A5:** Curva da taxa de secagem de *Spirulina platensis* em função da umidade para todos os ensaios de secagem.

Os equipamentos utilizados nos ensaios de secagem de *Spirulina platensis* estão apresentados abaixo:



**Figura A6:** Secador descontínuo de bandejas com escoamento perpendicular do ar.



**Figura A7:** Secador de leite jorro, geometria cone-cilíndrica.



**Figura A8:** Secador de leite jorro, geometria cônica.