



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de São José do Rio Preto

Lilian Fachin Leonardo Betiol

**Transferência de massa e propriedades de sorção de água em
produtos de carne suína**

São José do Rio Preto

2022

Lilian Fachin Leonardo Betiol

**Transferência de massa e propriedades de sorção de água em
produtos de carne suína**

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência de Alimentos, junto ao Programa de Pós-Graduação em Alimentos, Nutrição e Engenharia de Alimentos do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de São José do Rio Preto.

Orientador: Prof. Dr. Javier Telis Romero

Coorientador: Rodrigo Corrêa Basso

Coorientador: Gisandro Reis de Carvalho

São José do Rio Preto

2022

B563t

Betiol, Lilian Fachin Leonardo

Transferência de massa e propriedades de sorção de água em produtos de carne suína / Lilian Fachin Leonardo Betiol. -- São José do Rio Preto, 2022

153 p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto

Orientador: Javier Telis Romero

1. Carne de porco. 2. Massa Transferência. 3. Sais. 4. Isotermas. 5. Conservação. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Bibliote Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto. D fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Lilian Fachin Leonardo Betiol

**Transferência de massa e propriedades de sorção de água em
produtos de carne suína**

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência de Alimentos, junto ao Programa de Pós-Graduação em Alimentos, Nutrição e Engenharia de Alimentos do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de São José do Rio Preto.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Javier Telis Romero
Unesp/Ibilce – Campus de São José do Rio Preto
Orientador

Profa. Dra. Andrea Carla da Silva Barretto
Unesp/Ibilce – Campus de São José do Rio Preto

Prof. Dr. Tiago Luis Barretto
IFSP – Campus Barretos

Dra. Larissa Tátero Carvalho
USP/FZEA – Campus Pirassununga

Profa. Dra. Jane Selia dos Reis Coimbra
UFV/DTA – Campus Viçosa

São José do Rio Preto

07 de março de 2022

Dedico este trabalho

Aos meus pais, Oscar e Teresa, por sempre acreditarem em mim e por terem
abdicado de suas vidas e seus sonhos em prol das realizações e felicidade de seus
filhos.

Aos meus amados esposo e filha, Rodrigo e Maria Antonia, por todo amor, apoio,
paciência e compreensão.

Aos meus irmãos, Lineu e Leonan, que mesmo longe fisicamente, sempre estiveram
ao meu lado.

Ao meu professor e orientador, Javier, que sempre me guiou nos momentos de
incertezas e dificuldades e sempre acreditou em mim

AGRADECIMENTOS

Mais uma vez tenho a feliz oportunidade de agradecer formalmente a todos aqueles que me ajudaram chegar até aqui.

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e pela oportunidade de estar concluindo mais uma etapa importante.

À minha mãe e meu pai deixo um agradecimento especial, por todas as lições de amor, companheirismo, amizade, carinho, dedicação, abnegação, compreensão, respeito e perdão que vocês me dão a cada novo dia. Sinto-me orgulhosa e privilegiada por ter pais tão especiais.

Ao meu esposo Rodrigo, por todo amor, carinho, compreensão e apoio em tantos momentos difíceis desta caminhada. Obrigada por permanecer ao meu lado, mesmo sem a atenção e o carinho devidos e depois de tantos momentos de lazer perdidos.

À minha menina, minha riqueza, Maria Antonia, por todo amor incondicional que você sempre me deu. Inúmeras foram as vezes que, no meio da madrugada, depois de concluir algum trabalho, ou sair para aulas antes do sol nascer, fui até o seu quarto te ver dormir e agradecer por você fazer parte da minha vida.

Ao meu professor, orientador e amigo, Javier, pela orientação, competência, profissionalismo, paciência e dedicação tão importantes. Obrigada por acreditar em mim desde o início, quando eu era apenas uma Aluna Especial. Tenho certeza que não chegaria neste ponto sem o seu apoio.

A todos os colegas com quem passei bons momentos no decorrer do curso. Aos amigos que fiz e em especial aos queridos Tiago Carregari Polachini, Marcio Augusto Sanches e Rodrigo Evangelista que sempre me ajudaram e ensinaram. Sou muito grata.

Aos amigos Bruna Grassetti Fonseca e Marcio Augusto Sanches pelas correrias, risadas e trabalhos em conjunto.

A todos os demais amigos e amigas, obrigada pelo convívio, amizade e apoio.

Aos professores e funcionários do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus São José do Rio Preto pela oportunidade de convívio e pelos ensinamentos, conselhos e carinho que sempre recebi.

Aos membros da banca que tão gentilmente aceitaram participar e colaborar com esta tese. Obrigada pela disponibilidade e contribuição.

À professora Andrea Carla da Silva Barretto, agradeço ainda pelas breves conversas, porém importantíssimas e enriquecedoras.

Ao pessoal da empresa que trabalho, JBS, em especial à minha Coordenadora Karina Carneiro e ao meu gerente Marcos Roque, que me nunca se opuseram e me apoiaram a chegar até o final.

Finalmente, mais uma vez, o meu MUITO OBRIGADA, há tudo e a todos, que de alguma forma, me fizeram chegar até aqui.

RESUMO

Entre os produtos cárneos elaborados a partir de carne suína, pode-se mencionar o presunto cru, bacon, salame, hambúrguer, linguiça, presunto cozido. A maioria dos produtos cárneos usam o cloreto de sódio (NaCl) como ingrediente. Entretanto, a alta ingestão de sódio aumenta o risco de doenças crônicas não transmissíveis. Portanto, reduzir o teor de sódio em carnes e produtos cárneos tornou-se uma tendência em ciência e tecnologia de alimentos, o que impulsionou os estudos envolvendo a substituição do cloreto de sódio (NaCl) por outros sais de cloreto como o cloreto de potássio (KCl), cloreto de cálcio (CaCl_2) e o cloreto de magnésio (MgCl_2). Dessa forma, é importante conhecer a velocidade do fenômeno de transferência de massa dos diferentes sais durante o processo de salga úmida de carne suína e como o tipo e o conteúdo desses sais podem afetar as isotermas de sorção de água dos produtos de carne salgada. No primeiro capítulo, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os temas abordados na tese. No segundo capítulo, foi avaliada a influência da composição química e da temperatura nas isotermas de sorção de água de sete marcas de presunto curado em diferentes temperaturas de armazenamento. As isotermas foram determinadas pelo método gravimétrico. Os dados experimentais foram ajustados aos modelos matemáticos de GAB, Peleg, Oswin e Henderson. O modelo de GAB foi escolhido para descrever as isotermas, por apresentar o melhor ajuste. O teor de umidade de equilíbrio do presunto curado a seco diminuiu com o aumento da temperatura. As diferenças na composição química das amostras, principalmente quanto ao teor de cloreto de sódio, afetaram as isotermas de sorção de água. Os resultados indicaram que para uma dada atividade de água, o teor de umidade de equilíbrio aumentou quando o produto continha um maior teor de NaCl, e isso ocorreu em todas as temperaturas avaliadas. No terceiro capítulo, estudou-se a cinética de difusão do cloreto de potássio (KCl), cloreto de cálcio (CaCl_2), cloreto de magnésio (MgCl_2) e do cloreto de sódio (NaCl) durante a salga úmida de carne suína, até condições de equilíbrio. Para isso, filés de alcatra suína foram submetidos à salga úmida em salmouras saturadas de NaCl; KCl; MgCl_2 e CaCl_2 , em duas temperaturas (1 e 15 °C). Três modelos (Peleg, Weibull e difusional) foram usados para simular a perda de água (PA) e o ganho de sal (GS) durante a salga úmida. Durante a salga úmida, o conteúdo de água da carne diminuiu enquanto o conteúdo de sal aumentou. A elevação da temperatura de processo aumentou a PA, o GS e os coeficientes de

difusão de água e de sal na carne de suína. O modelo Weibull conseguiu prever satisfatoriamente as taxas de PA e GS até as condições de equilíbrio. Os modelos de Peleg e Weibull apresentaram maiores taxas de PA e GS para o KCl, quando comparado aos outros sais estudados. O modelo de Fick apresentou maiores coeficientes de difusão de água e de sal para o KCl. Esses resultados podem ajudar a indústria da carne a melhorar o gerenciamento do processo de salga úmida usando diferentes sais para desenvolver produtos cárneos com teor de sódio reduzido. No quarto capítulo, avaliaram-se os efeitos da temperatura (5, 10, 20, 30 e 40 °C) e do conteúdo de NaCl (0%, 9,3%, 15,6%, 20,6% e 26,6% em base seca) e de KCl (0%, 10,7%, 17,1%, 21,1%, 26,1% e 29,8% em base seca) sobre as propriedades de sorção de água de carne suína salgada. As isotermas apresentaram características de sorção típica de produtos alimentícios com alto teor de proteína e sais, que corresponde ao tipo III. Analisando um mesmo valor de atividade de água, o incremento da temperatura reduziu a umidade de equilíbrio da carne suína salgada. As curvas de sorção também mostraram que a umidade de equilíbrio aumentou devido ao aumento do conteúdo de NaCl e de KCl na carne salgada. Além disso, em concentrações próximas de NaCl e de KCl na carne salgada, as isotermas da carne salgada com NaCl apresentaram uma maior umidade de equilíbrio quando comparadas a isotermas da carne salgada com KCl. Dentre os modelos testados, GAB foi o mais adequado para descrever as isotermas de sorção de água da carne salgada.

Palavras-chave: Salga úmida. Isotermas de sorção. Sais. Carne. Difusão.

ABSTRACT

Among the meat products made from swine meat, we can mention dry-cured ham, bacon, salami, hamburger, sausage, and cooked ham. Most meat products use sodium chloride (NaCl) as an ingredient. However, high sodium intake increases the risk of chronic non-communicable diseases. Therefore, reducing the sodium content in meat and meat products has become a trend in food science and technology, which has boosted studies involving the replacement of sodium chloride (NaCl) with other chloride salts such as potassium chloride (KCl), calcium chloride (CaCl_2) and magnesium chloride (MgCl_2). Thus, it is important to know the speed of the mass transfer process of the different salts during the wet salting process of meat pork and how the type and content of these salts can affect the water sorption isotherms of salted meat products. In the first chapter, a bibliographic review was carried out on the topics covered in the thesis. In the second chapter, the influence of chemical composition and temperature on the water sorption isotherms of seven brands of cured ham at different storage temperatures was evaluated. The isotherms were determined by the gravimetric method. The experimental data were fitted to the mathematical models of GAB, Peleg, Oswin and Henderson. The GAB model was chosen to describe the isotherms, as it presents the best fit. The equilibrium moisture content of dry cured ham decreased with increasing temperature. Differences in the chemical composition of the samples, mainly in terms of sodium chloride content, affected the water sorption isotherms. The results indicated that for a given water activity, the equilibrium moisture content increased when the product contained a higher NaCl content, and this occurred at all temperatures evaluated. In the third chapter, the kinetics of diffusion of potassium chloride (KCl), calcium chloride (CaCl_2), magnesium chloride (MgCl_2) and sodium chloride (NaCl) were studied during wet salting of pork. For this, swine meat was subjected to wet salting in brines saturated with: NaCl; KCl; MgCl_2 ; CaCl_2 , at two temperatures (1 and 15 °C). Three models (Peleg, Weibull and diffusional) were used to simulate water loss (PA) and salt gain (GS). During wet salting, the water content of the meat decreased while the salt content increased. Increasing the process temperature increased PA, GS, and water and salt diffusion coefficients in meat. The Weibull model was able to more satisfactorily predict the rates of PA and GS up to equilibrium conditions. The Peleg and Weibull models showed higher rates of PA and GS for KCl, when compared to the other salts studied. The Fick model showed higher

water and salt diffusion coefficients for KCl. These results can help the meat industry to improve the management of the wet salting process using different salts with the aim of developing meat products with reduced sodium content. In the fourth chapter, was evaluated the effects of temperature (5, 10, 20, 30 and 40 °C) and NaCl content (0%, 9,3%, 15,6%, 20,6% and 26,6% on a dry basis) and KCl (0%, 10,7%, 17,1%, 21,1%, 26,1% and 29,8% on a dry basis) on the water sorption properties of salted swine meat. The isotherms showed typical sorption characteristics of food products with a high content of protein and salts, which corresponds to type III. Observing in the same water activity, the increase in temperature reduced the equilibrium moisture content of salted meat. The sorption curves also showed that the equilibrium moisture content increased due to the increase in NaCl and KCl content in the salted meat. Furthermore, at concentrations close to NaCl and KCl in the salted meat, the isotherms of the meat salted with NaCl showed a higher equilibrium moisture when compared to the isotherms of the meat salted with KCl. Among the models tested, GAB is the most suitable to describe the water sorption isotherms of salted meat.

Keywords: Wet salting. Sorption isotherms. salts. Meat. Diffusion.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo I - Revisão bibliográfica

Figura 1. Representação esquemática da organização estrutural do músculo.	27
Figura 2. Transferência de massa durante a salga úmida em salmoura com alta concentração de solutos.	29
Figura 3. Esquema de um processo de equilíbrio molecular entre o alimento e o ambiente.	34
Figura 4. Mapa de estabilidade dos alimentos em função da atividade de água.	36
Figura 5. Tipos de isotermas de sorção de Van Der Waals.	38
Figura 6. Isoterma de sorção de água de um alimento hipotético do tipo II.	44
Figura 7. Tendência das alterações na atividade de água de um alimento submetido diferentes temperaturas.	46

Capítulo II - Influence of temperature and chemical composition on water sorption isotherms for dry-cured ham

Figura 1. Sorption isotherms at 7 °C of seven samples of dry-cured ham fitted to the GAB model.	69
Figura 2. Sorption isotherms at 17 °C of seven samples of dry-cured ham fitted to the GAB model.	70
Figura 3. Sorption isotherms at 27 °C of seven samples of dry-cured ham fitted to the GAB model.	70
Figura 4. Sorption isotherms of samples S2 and S3 of dry-cured ham in different temperatures.	72
Figura 5. Residual plot distributions of modelling isotherms for: (A) GAB equation at all temperatures referring to sample S1; (B) Henderson equation at all temperatures referring to sample S1.	75

Capítulo III - Difusão de sais de cloreto na salga úmida de carne suína: um estudo sobre os sais substitutos do NaCl

Figura 1. Esboço do dispositivo experimental.	89
Figura 2. Perda de água (PA) em carne suína tratada em salmouras saturadas de a) NaCl, b) KCl, c) MgCl ₂ e d) CaCl ₂ .	94
Figura 3. Ganho de sal (GS) em carne suína tratada em salmouras saturadas de a) NaCl, b) KCl, c) MgCl ₂ e d) CaCl ₂ .	101

Capítulo IV - Efeito da temperatura e do conteúdo de NaCl e de KCl sobre as propriedades de sorção de água de carne suína salgada

Figura 1. Cinética da perda de água (a) e do ganho de sal (b) em carne suína salgada em salmouras saturadas de NaCl e de KCl.	127
Figura 2. Efeito da temperatura nas isotermas de sorção de água de carne suína salgada com: (a) 0% de NaCl; (b) 9,3% de NaCl; (c) 15,6% de NaCl; (d) 20,6% de NaCl e (e) 26,6% de NaCl.	129
Figura 3. Efeito da temperatura nas isotermas de sorção de água de carne suína salgada com: (a) 0% de KCl; (b) 10,7% de KCl; (c) 17,1% de KCl; (d) 21,1% de KCl; (e) 26,1% de KCl e (f) 29,8% de KCl.	130
Figura 4. Efeito da concentração de NaCl nas isotermas de sorção de água de carne suína salgada em temperaturas de (a) 5 °C; (b) 10 °C; (c) 20 °C; (d) 30 °C e (e) 40 °C.	131
Figura 5. Efeito da concentração de KCl nas isotermas de sorção de água de carne suína salgada em temperaturas de (a) 5 °C; (b) 10 °C; (c) 20 °C; (d) 30 °C e (e) 40 °C.	132
Figura 6. Calor isostérico líquido de sorção de água da carne salgada com diferentes conteúdos de NaCl (a) e de KCl (b).	140

LISTA DE TABELAS

Capítulo I - Revisão bibliográfica

Tabela 1. Composição aproximada de carnes a partir de diversas fontes. 26

Tabela 2. Características de sorção de água dos alimentos. 39

Capítulo II - Influence of temperature and chemical composition on water sorption isotherms for dry-cured ham

Tabela 1. Models used to fit sorption isotherm data from dry-cured ham. 67

Tabela 2. Chemical composition of seven different samples of dry-cured ham. 68

Tabela 3. Fitting parameters of the GAB model for all dry-cured ham samples at different temperatures. 76

Capítulo III - Difusão de sais de cloreto na salga úmida de carne suína: um estudo sobre os sais substitutos do NaCl

Tabela 1. Constantes do modelo de Peleg para perda de água (PA) e ganho de sal (GS) durante o tratamento osmótico da carne. 96

Tabela 2. Constantes do modelo exponencial para perda de água (PA) e ganho de sal (GS) durante o tratamento osmótico da carne. 99

Tabela 3. Perda de água em equilíbrio (PA_{∞}) e ganho de sal em equilíbrio (GS_{∞}) obtidos experimentalmente e a partir dos modelos de Peleg e Weibull. 105

Tabela 4. Coeficiente de difusão para perda de água (PA) e para o ganho de sal (GS) durante o tratamento osmótico da carne. 108

Capítulo IV - Efeito da temperatura e do conteúdo de NaCl e de KCl sobre as propriedades de sorção de água de carne suína salgada

Tabela 1. Modelos usados para ajustar as isotermas de sorção da carne suína salgada.	123
Tabela 2. Composição química da carne suína in natura e com diferentes conteúdos de KCl na carne salgada.	125
Tabela 3. Composição química da carne suína in natura e com diferentes conteúdos de NaCl na carne salgada.	125
Tabela 4. Parâmetros de ajuste do modelo GAB para a carne salgada em diferentes concentrações de NaCl em diferentes temperaturas.	137
Tabela 5. Parâmetros de ajuste do modelo GAB para a carne salgada em diferentes concentrações de KCl em diferentes temperaturas.	138

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	19
2. REFERÊNCIAS	20
3. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	23
4. OBJETIVOS	24
4.1. Objetivo geral	24
4.2. Objetivos específicos	24
Capítulo I - Revisão bibliográfica	25
1. Carne suína	25
1.1. Composição e estrutura do tecido muscular	25
2. Tratamento osmótico e o processo de salga úmida de carnes	27
2.1. Mecanismo do processo osmótico	28
2.2. Fatores que afetam o processo osmótico	30
3. Isotermas de sorção	33
3.1. Umidade de equilíbrio	33
3.2. Atividade de água	34
3.3. Efeito da temperatura nas isotermas de sorção	45
3.4. Efeito da composição química nas isotermas de sorção	46
3.5. Modelagem matemática das isotermas de sorção	47
Capítulo II - Influence of temperature and chemical composition on water sorption isotherms for dry-cured ham	64
1. Introduction	64
2. Material and methods	65
2.1. Sample preparation	65
2.2. Chemical composition	66
2.3. Determination of the sorption isotherms	66
2.4. Modelling of sorption isotherms	66
2.5. Statistical analysis	67
3. Results and discussion	67
3.1. Chemical composition	68

3.2.	Sorption isotherms	69
3.3.	Effect of temperature on sorption isotherms of dry-cured ham	71
3.4.	Effect of chemical composition on sorption isotherms of dry-cured ham	72
3.5.	Modelling of sorption isotherms of dry-cured ham	74
4.	Conclusion	77

Capítulo III - Difusão de sais de cloreto na salga úmida de carne suína: um estudo sobre os sais substitutos do NaCl

1.	Introdução	86
2.	Materiais e métodos	87
2.1.	Matéria-prima	87
2.2.	Preparo das amostras e da salmoura	88
2.3.	Tratamento por salga úmida	88
2.4.	Determinações analíticas após a salga úmida	90
2.5.	Modelagem matemática da PA e GS após a salga úmida	90
2.5.1.	Modelo de Peleg	90
2.5.2.	Modelo Weibull	91
2.5.3.	Modelo de difusão	91
2.6.	Análise Estatística	93
3.	Resultados e Discussões	93
3.1.	Perda de água (PA)	93
3.1.1.	Modelagem matemática da perda de água (PA)	95
3.1.1.1.	Modelo de Peleg	95
3.1.1.2.	Modelo Weibull	97
3.2.	Ganho de sal (GS)	100
3.2.1.	Modelagem matemática do ganho de sal (GS)	102
3.2.1.1.	Modelo de Peleg	102
3.2.1.2.	Modelo Weibull	103
3.3.	Perda de água (PA^{∞}) e ganho de sal (GS^{∞}) em situações de equilíbrio	104
3.4.	Coeficientes de difusão de água e de sal	107

4. Conclusões	110
 Capítulo IV - Efeito da temperatura e do conteúdo de NaCl e de KCl sobre as propriedades de sorção de água de carne suína salgada	
1. Introdução	119
2. Materiais e métodos	121
2.1. Matéria-prima	121
2.2. Preparação da amostra	121
2.3. Composição química	121
2.4. Salga úmida	121
2.5. Isotermas de sorção	122
2.6. Modelagem das isotermas de sorção	123
2.7. Calor isostérico líquido de sorção	123
2.8. Análise Estatística	124
3. Resultados e Discussões	124
3.1. Composição química	124
3.2. Cinética de salga úmida de carne suína	126
3.3. Isotermas de sorção de água da carne suína salgada	128
3.4. Efeito da temperatura nas isotermas de sorção de água da carne suína salgada	134
3.5. Efeito do conteúdo de sal nas isotermas de sorção de água da carne suína salgada	134
3.6. Modelagem matemática das isotermas de sorção	135
3.7. Calor isostérico líquido de sorção	139
4. Conclusões	141
CONCLUSÃO GERAL	151

1. INTRODUÇÃO GERAL

A carne suína é a mais consumida no mundo. Em 2020, sua produção (mercado mundial) alcançou 97,757 (milhões ton), sendo a China o maior produtor (38,000 milhões ton) (ABPA, 2021). Em 2010, a produção Brasileira de carne suína era de 3,237 (milhões ton) e o consumo per capita de carne suína era de 14,1 kg/hab. Em 2020, a produção Brasileira de carne suína subiu para 4,436 (milhões ton) e o consumo per capita também cresceu para 16 kg/hab (ABPA, 2021). No Brasil, cerca de 89% da carne suína é consumida na forma de produtos industrializados (ABPA, 2021) como o presunto curado, bacon, salame, hambúrguer, linguiça, apresuntado e presunto cozido. Esses produtos são atrativos para os consumidores devido a sua praticidade e rapidez no preparo e preço acessível de alguns produtos (BALDIN et al., 2016), aliado as suas características sensoriais específicas. Entretanto, o processamento da carne *in natura* não visa somente a elaboração de novos produtos, mas também a redução de problemas com o transporte e armazenamento, além de vantagens com relação ao aumento da vida útil, quando comparado a carne *in natura* (SHIMOKOMAKI et al., 1998; VIDAL et al., 2019). Dessa forma, durante a fabricação, a carne *in natura* passa por uma ou mais tecnologias de processamento, entre elas, pode-se mencionar a fermentação (SANTOS et al., 2021), defumação (MERLO et al., 2020), salga (SANCHES et al., 2021), secagem (AYKIN-DINÇER & ERBAŞ, 2018) entre outras.

Muitas técnicas tradicionais de conservação de alimentos, como a secagem (CÁRCEL et al., 2012) e salga (SANCHES et al., 2021) são empregadas no processamento de carnes e produtos cárneos com o objetivo de reduzir a atividade de água e, assim, estender sua vida útil. A maioria dos produtos cárneos usam o cloreto de sódio (NaCl) como ingrediente. Tal importância está relacionada ao seu grande papel tecnológico no processamento e fabricação de produtos cárneos (DELGADO-PANDO et al., 2018; DESMOND, 2006). Entretanto, a alta ingestão de sódio pode aumentar o risco de doenças crônicas (DOYLE & GLASS, 2010; HE & MACGREGOR, 2010). Portanto, reduzir o teor de sódio em carnes e produtos cárneos tornou-se uma tendência em ciência e tecnologia de alimentos (INGUGLIA et al., 2017), o que impulsionou diversos estudos envolvendo a substituição parcial do cloreto de sódio (NaCl) por outros sais de cloreto como o cloreto de potássio (KCl), cloreto de cálcio (CaCl₂) e cloreto de magnésio (MgCl₂) (BAMPI et al., 2016; VIDAL et

al., 2019a; VIDAL et al., 2019b; ZHANG et al., 2020a; ZHANG et al., 2020b) para desenvolver carnes e produtos cárneos com teor de sódio reduzido. Dessa forma, é importante conhecer a velocidade do fenômeno de transferência de massa dos diferentes sais durante o processo de salga de carne suína.

Outro aspecto importante para a tecnologia de processamento e conservação de alimentos é conhecer o comportamento de sorção de água dos alimentos em relação ao ambiente. Esse comportamento pode ser estudado através das isotermas de sorção de água, que são curvas que relacionam a a_w e seu correspondente teor de umidade de equilíbrio (X_{eq}) de um alimento a uma dada temperatura (FREITAS et al., 2016). A atividade de água influencia diretamente em várias reações químicas que podem ocorrer nos alimentos, como a oxidação lipídica, reações de escurecimento enzimático e não-enzimático, degradação de vitaminas, etc.

Levando em consideração que a atividade de água dos alimentos é afetada pela temperatura (AL-MUHTASEB et al., 2002) e que os alimentos são expostos a variações de temperatura durante o processamento e/ou armazenamento, é necessário conhecer os efeitos da temperatura sobre as isotermas de sorção de água. De forma semelhante à temperatura, a composição química dos alimentos também pode afetar a forma como as moléculas de água se ligam na matriz alimentar, resultando em alterações na atividade da água (a_w) e, conseqüentemente, na estabilidade dos alimentos (RIZVI, 2005). Dessa forma, conhecer o efeito da temperatura, da composição química e do conteúdo de sal sobre as isotermas de sorção de água de produtos de carne salgada é de grande importância tecnológica para a indústria de alimentos.

2. REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL.** Relatório Anual 2021. Disponível em https://abpa-br.org/wpcontent/uploads/2021/04/ABPA_Relatorio_Anual_2021_web.pdf. Acesso em 20 de janeiro de 2021.
- AL-MUHTASEB, A. H.; MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Moisture Sorption Isotherm Characteristics of Food Products: A Review. **Food and Bioprocess Processing**, v. 80, n. 2, p. 118–128, 2002.

AYKIN-DINÇER, E.; ERBAŞ, M. Drying kinetics, adsorption isotherms and quality characteristics of vacuum-dried beef slices with different salt contents. **Meat Science**, v. 145, p. 114–120, 2018.

BALDIN, J. C.; MICHELIN, E. C.; POLIZER, Y. J.; RODRIGUES, I.; DE GODOY, S. H. S.; FREGONESI, R. P.; ... & TRINDADE, M. A. Microencapsulated jabuticaba (*Myrciaria cauliflora*) extract added to fresh sausage as natural dye with antioxidant and antimicrobial activity. **Meat Science**, v. 118, p. 15–21, 2016.

BAMPI, M.; DOMSCHKE, N. N.; SCHMIDT, F. C.; & LAURINDO, J. B. Influence of vacuum application, acid addition and partial replacement of NaCl by KCl on the mass transfer during salting of beef cuts. **LWT - Food Science and Technology**, v. 74, p. 26–33, 2016.

CÁRCEL, J. A.; GARCÍA-PÉREZ, J. V.; BENEDITO, J.; MULET, A. Food process innovation through new technologies: Use of ultrasound. **Journal of Food Engineering**, v. 110, n. 2, p. 200-207, 2012.

DELGADO-PANDO, G.; FISCHER, E.; ALLEN, P.; KERRY, J. P.; O'SULLIVAN, M. G.; & HAMILL, R. M. Salt content and minimum acceptable levels in whole-muscle cured meat products. **Meat Science**, v. 139, p. 179-186, 2018.

DELGADO-PANDO, G.; FISCHER, E.; ALLEN, P.; KERRY, J. P.; O'SULLIVAN, M. G.; HAMILL, R. M. Reducing salt: A challenge for the meat industry. **Meat Science**, v. 74, n. 1, p. 188–196, 2006.

DOYLE, M. E.; GLASS, K. A. Sodium Reduction and Its Effect on Food Safety, Food Quality, and Human Health. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 9, n. 1, p. 44–56, 2010.

FREITAS, M. L. F.; POLACHINI, T. C.; DE SOUZA, A. C.; TELIS-ROMERO, J. Sorption isotherms and thermodynamic properties of grated Parmesan cheese. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 51, n. 1, p. 250–259, 2016.

HE, F. J.; & MACGREGOR, G. A. Reducing population salt intake worldwide: from evidence to implementation. **Progress in cardiovascular diseases**, v. 52, n. 5, p. 363-382, 2010.

INGUGLIA, E. S.; ZHANG, Z.; TIWARI, B. K.; KERRY, J. P.; & BURGESS, C. M. Salt reduction strategies in processed meat products—A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 59, p. 70-78, 2017.

MERLO, T. C.; DA CRUZ ANTONIO, J.; SAVIAN, T. V.; VILLEGAS, C.; DARGELIO, M. D. B.; DA SILVA PINTO, J. S.; ... & CONTRERAS-CASTILLO, C. J. Effect of the smoking using Brazilian reforestation woods on volatile organic compounds, lipid oxidation, microbiological and hedonic quality of bacons during shelf life. **Meat Science**, v. 164, p. 108110, 2020.

RIZVI, S. S. **Thermodynamic properties of foods in dehydration**. In: Engineering properties of foods. CRC Press, p. 261-348. 2014.

SANCHES, M. A. R.; SILVA, P. M. O. C.; BARRETTO, T. L.; DARROS-BARBOSA, R.; DA SILVA-BARRETTO, A. C.; & TELIS-ROMERO, J. Technological and diffusion properties in the wet salting of beef assisted by ultrasound. **LWT - Food Science and Technology**, v. 149, p. 112036, 2021.

SANTOS, J. M.; IGNÁCIO, E. O.; BIS-SOUZA, C. V.; & DA SILVA-BARRETTO, A. C. Performance of reduced fat-reduced salt fermented sausage with added microcrystalline cellulose, resistant starch and oat fiber using the simplex design. **Meat Science**, v. 175, p. 108433, 2021.

SHIMOKOMAKI, M.; FRANCO, B. D. G. M.; BISCONTINI, T. M.; PINTO, M. F.; TERRA, N. N.; & ZORN, T. M. T. Charqui meats are hurdle technology meat products. **Food Reviews International**, v. 14, n. 4, p. 339-349, 1998.

VIDAL, V. A.; BIACHI, J. P.; PAGLARINI, C. S.; PINTON, M. B.; CAMPAGNOL, P. C.; ESMERINO, E. A.; ... & POLLONIO, M. A. Reducing 50% sodium chloride in healthier jerked beef: An efficient design to ensure suitable stability, technological and sensory properties. **Meat Science**, v. 152, p. 49-57, 2019a.

VIDAL, V. A.; BERNARDINELLI, O. D.; PAGLARINI, C. S.; SABADINI, E.; & POLLONIO, M. A. Understanding the effect of different chloride salts on the water behavior in the salted meat matrix along 180 days of shelf life. **Food research international**, v. 125, p. 108634, 2019b.

ZHANG, D.; LI, H.; WANG, Z.; EMARA, A. M.; & HE, Z. Effects of NaCl substitutes on physicochemical properties of salted pork. **Meat Science**, v. 169, p. 108205, 2020.

Zhang, D.; Li, H.; Emara, A. M.; Wang, Z.; Chen, X.; & He, Z. Study on the mechanism of KCl replacement of NaCl on the water retention of salted pork. **Food Chemistry**, v. 332, p. 127414, 2020b.

3. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi escrito em quatro capítulos visando uma melhor distribuição e entendimento dos assuntos abordados.

O capítulo I consiste em uma revisão bibliográfica sobre os temas abordados na tese.

O capítulo II trata-se do manuscrito intitulado **“Influence of temperature and chemical composition on water sorption isotherms for dry-cured ham”** publicado na Revista LWT - Food Science and Technology, volume 123, 2020, p. 109112, de autoria de Lilian Fachin Leonardo Betiol, Rodrigo Rodrigues Evangelista, Marcio Augusto Ribeiro Sanches, Rodrigo Corrêa Basso, Beatriz Gullón, Jose Manuel Lorenzo, Andrea Carla Da Silva Barretto e Javier Telis Romero.

O capítulo III trata-se do manuscrito intitulado **“Difusão de sais de cloreto na salga úmida de carne suína: um estudo sobre os sais substitutos do NaCl”**, de autoria de Lilian Fachin Leonardo Betiol, Marcio Augusto Ribeiro Sanches, João Borges Laurindo e Javier Telis Romero. Será elaborada a versão em inglês deste manuscrito para ser submetido ao periódico “International Journal of Heat and Mass Transfer”.

O capítulo IV trata-se do manuscrito intitulado **“Efeito da temperatura e do conteúdo de NaCl e de KCl sobre as propriedades de sorção de água de carne suína salgada”**, de autoria de Lilian Fachin Leonardo Betiol, Marcio Augusto Ribeiro Sanches, Maria Júlia Neves Martins, André Luiz Borges Machado e Javier Telis Romero. Será elaborada a versão em inglês deste manuscrito para ser submetido ao periódico “Meat Science”.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo geral

Avaliar os efeitos de diferentes sais sobre a cinética de transferência de massa durante a salga úmida de carne suína, e os efeitos da composição química e do conteúdo de sal sobre as propriedades de sorção de água em produtos de carne suína.

4.2. Objetivos específicos

Avaliar a influência da composição química nas isotermas de sorção de água de sete marcas de presunto cru em diferentes temperaturas (7, 17 e 27 °C) de armazenamento.

Avaliar a cinética de difusão do cloreto de potássio (KCl), cloreto de cálcio (CaCl_2), cloreto de magnésio (MgCl_2) e cloreto de sódio (NaCl) durante a salga úmida de carne suína usando soluções saturadas em diferentes temperaturas de processo, até condições de equilíbrio.

Avaliar a influência da temperatura (5, 10, 20, 30 e 40 °C) e de diferentes concentrações de NaCl (0%, 9,3%, 15,6%, 20,6% e 26,6%; em base seca) e de KCl (0%, 10,7%, 17,1%, 21,1%, 26,1% e 29,8% em base seca) nas propriedades de sorção de água de carne suína salgada.

Capítulo I - Revisão bibliográfica

1. Carne suína

A carne suína é a mais consumida no mundo. No Brasil, seu consumo ainda é menor do que o consumo de carne de frango (ABPA, 2021). Em 2010, a produção Brasileira de carne suína era de 3,237 (milhões ton) e o consumo per capita de carne suína era de 14,1 kg/hab. Em 2020, a produção Brasileira de carne suína subiu para 4,436 (milhões ton) e o consumo per capita também cresceu para 16 kg/hab (ABPA, 2021). Neste mesmo ano, o destino da produção Brasileira de carne suína foi de 77% para o mercado interno e 33% destinado as exportações.

De uma forma geral, o mercado de produtos cárneos industrializados tem crescido, pois é atrativo para os consumidores devido a sua praticidade e rapidez no preparo, aliado ao preço acessível de alguns produtos (BALDIN et al., 2016). Entre os produtos de carne suína, pode-se mencionar o presunto curado, bacon, salame, hambúrguer, linguiça, apresuntado e presunto cozido. Esses produtos derivados da carne suína são obtidos a partir da carne *in natura* que passa por uma ou mais tecnologias de processamento, entre elas, pode-se mencionar a salga (SANCHES et al., 2021), secagem (AYKIN-DINÇER & ERBAŞ, 2018), fermentação (SANTOS et al., 2021), defumação (MERLO et al., 2020) entre outras. O processamento da carne *in natura* visa não somente a elaboração de novos produtos, mas também a redução de problemas com o transporte e armazenamento, além de vantagens com relação ao aumento da vida útil, quando comparado a carne *in natura* (SHIMOKOMAKI et al., 1998; VIDAL et al., 2019).

1.1. Composição e estrutura do tecido muscular

A composição da carne varia em função da alimentação, idade, sexo, espécie animal, zona anatômica entre outros (DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2010; ORDÓÑEZ, PEREDA; MURAD, 2005).

A Tabela 1 apresenta a composição química aproximada da carne de diversas fontes de animais.

Tabela 1. Composição aproximada de carnes a partir de diversas fontes (g/100g).

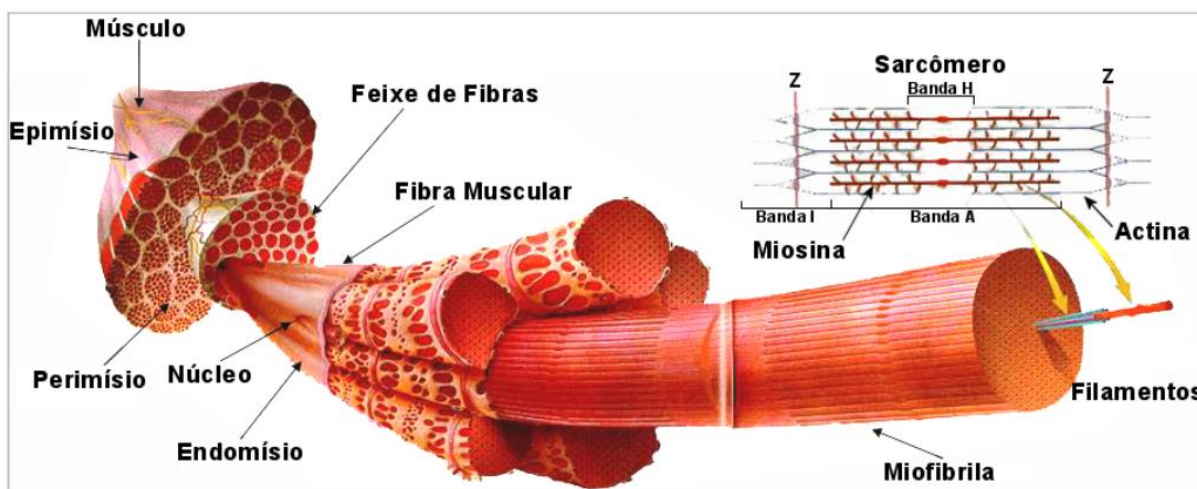
Componente	Bovina	Suína	Cordeiro	Frango	Peru	Bacalhau	Atum
Água	70,62	72,34	73,42	74,76	75,12	81,22	68,09
Proteínas	20,78	21,07	20,29	23,09	24,60	17,81	23,33
Gorduras	6,16	5,88	5,25	1,24	0,65	0,67	4,90
Cinzas	1,02	1,04	1,06	1,02	1,02	1,16	1,18

Fonte: DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA (2010).

Como mostra a Tabela 1, a água é o componente em maior quantidade na carne. Antes do abate, o conteúdo médio de água é de 75% em peso. Por ser um componente abundante, o conteúdo de água está relacionado com a qualidade da carne, afetando diretamente atributos sensoriais como suculência, textura, cor e sabor. O segundo maior componente na carne são as proteínas, que constituem aproximadamente 21% na carne suína, representando o principal componente sólido na carne. Em média, o conteúdo de gordura constitui aproximadamente 5% na carne suína, embora seja um componente que pode variar bastante devido a fatores como tipo de músculo, dieta e idade do animal (KOOHMARAIE et al., 2002). O conteúdo de cinzas ou o resíduo mineral fixo constitui aproximadamente 1% na carne (DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2010).

A Figura 1 ilustra a estrutura muscular da carne. Observa-se que o tecido muscular é envolvido pelo tecido conjuntivo denominado epimísio, que tem como o principal componente o colágeno. O perimísio é uma camada composta por tecido conjuntivo, que envolve os feixes de fibras musculares, enquanto o endomísio é o tecido conjuntivo que envolve cada fibra muscular. As miofibrilas são dispostas em filamentos finos (constituídos basicamente pela proteína actina) e grossos (constituídos basicamente pela proteína miosina), que formam as bandas que são ilustradas por faixas claras (isotrópicas) e escuras (anisotrópicas) (LAWRIE; RUBENSAM, 2005; ORDÓÑEZ, PEREDA; MURAD, 2005).

Figura 1. Representação esquemática da organização estrutural do músculo.



Fonte: Adaptado de SCHMIDT (2010).

As proteínas da carne são classificadas quanto a sua solubilidade e por suas funções biológicas:

- Solubilidade: As proteínas podem ser classificadas em solúveis em água ou em soluções salinas diluídas (proteínas sarcoplasmáticas), insolúveis em soluções salinas concentradas (proteínas do tecido conjuntivo e outras estruturas formadas) e solúveis em soluções salinas concentradas (proteínas miofibrilares) (LAWRIE; RUBENSAM, 2005; ORDÓÑEZ PEREDA; MURAD, 2005).
- Funções biológicas: Podem ser divididas em proteínas que exercem funções sobre o metabolismo (amilase, maltase e pepsina) e as que contribuem para a contração (actina e miosina);

2. Tratamento osmótico e o processo de salga úmida de carnes

A água é o maior componente da carne in natura e exerce um papel importante quanto às suas propriedades físico-químicas, funcionais e sensoriais como maciez, elasticidade e suculência (LAWRIE & RUBENSAM, 2005). No tecido muscular, a água pode estar retida dentro das miofibrilas, entre as miofibrilas, entre as miofibrilas e a membrana celular (sarcolema), entre as células musculares (água extracelular) e entre os feixes musculares (HUFF-LONERGAN & LONERGAN, 2005). Além disso, a água pode estar na forma livre e ligada. A água ligada é frequentemente definida como a água em contato com solutos e outros constituintes não aquosos, que apresenta

mobilidade reduzida e que não congela a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, não está disponível para reações enzimáticas nem para o crescimento de microrganismos. Dessa forma, a água ligada não se comporta como a água pura (DAMODARAN et al., 2010). Já a água livre, é a água que apresenta as mesmas propriedades que a água pura, que está disponível para reações enzimáticas e para o crescimento de microrganismos (DAMODARAN et al., 2010). A quantidade e a forma como a água se encontra na carne podem ser alterados por vários fatores associados ao próprio tecido, bem como por quaisquer tratamentos aplicados a ele (HUFF-LONERGAN & LONERGAN, 2005).

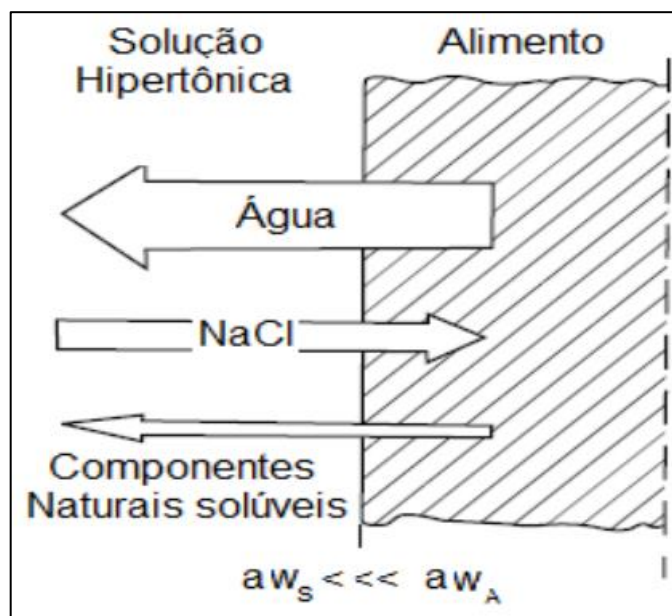
Muitas técnicas tradicionais de conservação de alimentos, como a secagem (CÁRCEL et al., 2012) e salga (SANCHES et al., 2021) são empregadas no processamento de carnes e produtos cárneos com o objetivo de reduzir a atividade de água e, assim, estender sua vida útil. Essa redução na atividade de água pode ser alcançada através da adição de agentes umectantes, como o açúcar e o sal, que removem a água do interior do alimento (ASSIS et al., 2016). O processamento osmótico é um tratamento considerado moderado que combina os processos de desidratação e impregnação de solutos, causando a perda de água de alimentos sem a necessidade de aplicação de calor, tendo como objetivo, melhorar suas propriedades sensoriais e funcionais (DIMAKOPOULOU-PAPAZOGLU & KATSANIDIS, 2019b).

2.1. Mecanismo do Processo osmótico

A imersão do alimento em uma solução contendo agentes osmóticos é denominado como desidratação osmótica. Entretanto, no processo de salga úmida de carnes, a direção das trocas de massa, principalmente de água, depende da concentração da salmoura, podendo ocorrer dois processos distintos: a perda ou o ganho de água (SCHMIDT et al., 2009). Em salmouras contendo baixas concentrações de agente osmótico, geralmente ocorre o ganho de água pela carne, devido às ligações entre os íons cloreto com as proteínas da carne, permitindo uma maior impregnação da água na estrutura da proteína (ALBARRACÍN et al., 2011). Nesse caso, o processo é chamado de marinação e seu objetivo é justamente incorporar água e agentes de cura, por meio da imersão da carne em soluções de baixa concentração de sal. Este processo modifica as características sensoriais da carne, gerando sabor, maciez e suculência característico do produto final (LI et al., 2020; SCHMIDT et al., 2008). Entretanto, conforme é ilustrado na Figura 2, em

salmouras com altas concentrações de solutos, ocorre o processo de perda de água, que é a saída da água da carne para a salmoura, enquanto ocorre a migração de solutos da salmoura para a carne (DIMAKOPOULOU-PAPAZOGLOU & KATSANIDIS, 2019b).

Figura 2. Transferência de massa durante a salga úmida em salmoura com alta concentração de solutos.



Fonte: Adaptado de MUJUMDAR (2006).

Na salga úmida usando altas concentrações de solutos, uma diferença de pressão osmótica é criada entre a carne e a salmoura. Como relatado anteriormente, este potencial de pressão osmótico ocasiona o desenvolvimento dos fluxos simultâneos de perda de água e ganho de sólidos (SCHMIDT et al., 2009). Nesses casos, quando a carne é inserida na salmoura, a camada externa da carne entra em contato com a solução osmótica e a água começa a se difundir para fora da carne devido à diferença de pressão osmótica, resultando no encolhimento do tecido (RASTOGI et al., 2002). Após a perda de água desta primeira camada, uma diferença de pressão osmótica ocorre entre as células da primeira e da segunda camada e consequentemente a segunda camada começa a perder água e encolher. Esse processo de transferência de massa se propaga da superfície para o centro da carne em função do tempo de salga úmida (DIMAKOPOULOU-PAPAZOGLOU & KATSANIDIS, 2019b). Além disso, parte dos compostos solúveis como vitaminas e minerais da carne podem ser perdidos para a solução osmótica. Entretanto, esses

fluxos são considerados insignificantes quando comparados aos fluxos de perda de água e ganho de sólidos (RASTOGI et al., 2002).

2.2. Fatores que afetam o processo osmótico

O processamento osmótico é afetado por diversos fatores (ASSIS et al., 2016; MUÑIZ-BECERÁ et al., 2017):

- I) Relacionados aos parâmetros do processo:** Concentração da solução osmótica, temperatura do processo, agitação e proporção entre a carne e a salmoura.

Em relação aos parâmetros do processo, concentrações mais altas de agente osmótico aumentam a pressão osmótica exercida pela solução, resultando em maior perda de água e ganho de sólidos. Recentemente, Sanches et al. (2021) estudaram a salga úmida de carne bovina em diferentes concentrações de salmoura (100, 200 e 300 g de NaCl / L de água). O aumento da concentração de cloreto de sódio na salmoura aumentou a pressão osmótica das soluções, reduziu a atividade de água da carne, e aumentou o ganho de sal na carne salgada.

A transferência de massa também é afetada pela temperatura. Temperaturas mais altas causam uma maior perda de água e ganho de sal na carne salgada. Isso provavelmente está relacionado aos efeitos da temperatura sobre a viscosidade da solução osmótica e sobre as propriedades viscoelásticas da carne. O aumento da temperatura diminui a viscosidade das soluções osmóticas (CARVALHO et al., 2015), o que provoca a redução da resistência externa à transferência de massa que atua sobre a superfície do produto. Aliado a isso, o aumento da temperatura de processo aumenta a permeabilidade das membranas celulares (DIMAKOPOULOU-PAPAZOGLU & KATSANIDIS, 2016). Esses fatores, em conjunto, favorecem a perda de água e o ganho de sal na carne com o aumento da temperatura de processo.

Nicoletti-Telis et al. (2003) estudaram a cinética de salga em carne de jacaré do Pantanal criado em cativeiro. Os autores relataram que o ganho de sal aumentou com o aumento da temperatura, principalmente quando a temperatura mudou de 10 °C para 15 °C. Os autores ainda mencionaram que na salga conduzida a 10 °C, após 60 horas de imersão em salmoura, o teor de sal em equilíbrio na carne não foi

alcançado. Entretanto, a 15 °C e 20 °C foram necessárias cerca de 30 horas para a carne de jacaré atingir o teor de sal em equilíbrio.

Outro fator que influencia o processo osmótico é a agitação. Devido a perda de água da carne, os processos osmóticos conduzidos sem agitação tendem a reduzir a concentração de soluto na interface entre a solução e a carne, principalmente quando a viscosidade da solução osmótica é alta e a proporção entre a carne e a salmoura é baixa. Dessa forma, a agitação pode aumentar a taxa de transferência de massa devido ao contato contínuo solução osmótica renovada com a interface da carne, o que acaba fornecendo uma pressão osmótica constante na interface entre a solução e a carne.

Recentemente, Dimakopoulou-Papazoglou & Katsanidis, (2019a) estudaram a desidratação osmótica de carne bovina usando soluções binárias e ternárias. Os autores relataram que a operação de agitação aumentou a perda de água da carne bovina em soluções osmóticas de maltodextrina-NaCl nas temperaturas de 5 e 15 °C. Entretanto, a 25 °C a agitação não aumentou a perda de água da carne, o que foi atribuído a baixa viscosidade da solução osmótica a 25°C, o que provavelmente inibiu os efeitos da agitação sobre a perda de água.

A proporção entre a carne e a salmoura é um outro fator que possui influência sobre o processo osmótico. Quando a carne começa a ganhar soluto e perder água para a solução, dependendo da proporção entre a carne e a solução, pode ocorrer a diluição da solução osmótica, o que provoca a redução da diferença de pressão osmótica entre a carne e a solução. Dessa forma, quando se deseja minimizar os fenômenos de diluição da solução osmótica ao longo do processo, deve-se usar uma alta proporção de solução osmótica para carne. Alguns estudos utilizaram proporções de solução osmótica para carne de 10:1 (AYKIN-DINÇER, 2021; BAMPI et al., 2016; SANCHES et al., 2021; SANCHES et al., 2020); 12,5:1 (ALAMATIAN et al., 2019; DIMAKOPOULOU-PAPAZOGLU & KATSANIDIS, 2016, 2017, 2019a); 20:1 (MARTINS et al., 2019; KANG et al., 2016); 50:1 (SCHMIDT et al., 2008, 2009). Entretanto, essa alta proporção de solução osmótica para carne causam questionamentos relacionados a aplicação pela indústria da carne e ao gerenciamento da solução osmótica. Dessa forma, alguns pesquisadores têm usado taxas mais baixas, como 5:1 (ANDREOU et al., 2018; DERMESONLOUOGLOU et al., 2017; FILIPOVIĆ et al., 2017; TSIRONI & TAOUKIS, 2017) e até mesmo 1:1 (CASALES & YEANNES, 2016). No entanto, quando se deseja determinar os coeficientes de

difusão de água e de sólidos utilizando o modelo de difusão baseado na segunda lei de Fick, deve-se utilizar uma alta proporção entre a solução osmótica e a carne, visando satisfazer a condição de contorno que exige uma pressão osmótica constante na interfase entre a carne e a solução (ASSIS et al., 2016).

II) Relacionados ao agente osmótico: Tipo, viscosidade e pressão osmótica.

Um dos fatores relacionados ao agente osmótico, que influenciam o processo, é o tipo de soluto, pois as propriedades físico-químicas dos solutos, como solubilidade, força iônica, massa molecular, pressão osmótica e viscosidade (AHMED et al., 2016; ALVES-JUNIOR et al., 2021; CARVALHO et al., 2015) podem afetar a perda de água, o ganho de sólidos e as características de qualidade de carnes e produtos cárneos salgados. A pressão osmótica da solução é inversamente relacionada à massa molecular do soluto. Em geral, para uma mesma concentração de soluto, conforme a massa molecular do soluto diminui, a pressão osmótica da solução aumenta. De maneira semelhante, quando a solução osmótica possui uma menor viscosidade, a resistência externa à transferência de massa na superfície do produto é reduzida, o que aumenta ainda mais a perda de água e ganho de sólidos.

A maioria dos estudos osmóticos de carnes usaram o cloreto de sódio (NaCl) como soluto (AYKIN-DINÇER, 2021; CÁRCEL et al., 2007; MARTINS et al., 2019; GRAIVER et al., 2006; KANG et al., 2016; NICOLETTI-TELIS et al., 2003; SANCHES et al., 2020, 2021). Tal importância está relacionada ao seu grande papel tecnológico no processamento e fabricação de carnes e produtos cárneos. Além de auxiliar para a conservação e atribuir o gosto salgado, o NaCl é um ingrediente que afeta a capacidade de retenção de água, aumenta a força iônica, promove estabilidade microbiológica, modifica a textura, e reduz a atividade de água da carne (DELGADO-PANDO et al., 2018; DESMOND, 2006). Entretanto, a alta ingestão de sódio aumenta o risco de doenças crônicas (DOYLE & GLASS, 2010; HE & MACGREGOR, 2010). Portanto, reduzir o teor de sódio em carnes e produtos cárneos tornou-se uma tendência em ciência e tecnologia de alimentos (INGUGLIA et al., 2017), o que impulsionou diversos estudos envolvendo a substituição parcial do cloreto de sódio (NaCl) por outros sais de cloreto como o cloreto de potássio (KCl), cloreto de cálcio (CaCl_2) e cloreto de magnésio (MgCl_2) no processamento osmótico de carnes e produtos cárneos (BAMPI et al., 2016; VIDAL et al., 2020; 2019a; 2019b; ZHANG et al., 2020a; 2020b), para desenvolver produtos com teor de sódio reduzido.

III) Relacionados ao produto: estrutura, forma e tamanho das amostras;

Alguns fatores importantes, que estão relacionados ao produto e que podem afetar os fenômenos de transferência de massa, são a composição química (umidade, proteínas, gorduras), o pH e a orientação das fibras musculares da carne. Vestergaard et al. (2007) relataram que a carne é muito heterogênea, consistindo de miofibrilas de diferentes tamanhos e orientações, gordura entremeada, cartilagem, membranas etc. Além disso, com o cruzamento entre raças bovinas, a carne pode ser bastante diferente (SANCHES et al., 2020). Sobre a composição química, a literatura relata que a difusão de NaCl na carne é geralmente evitada pela gordura intramuscular (GOU et al., 2003; SIRÓ et al., 2009).

3. Isotermas de sorção

Conhecer o comportamento de sorção de água de um material em relação ao ambiente em que o mesmo se encontra é uma característica fundamental dos alimentos, que pode influenciar os processos de manuseio, processamento, estocagem e consumo (LABUZA, 1975). Esse comportamento pode ser estudado através das isotermas de sorção de água, que são curvas que relacionam a a_w e seu correspondente teor de umidade de equilíbrio (X_{eq}) de um alimento a uma dada temperatura (FREITAS et al., 2016).

3.1. Umidade de equilíbrio

O teor de umidade de equilíbrio é o teor de umidade na qual a pressão de vapor d'água no alimento é igual à do ar do ambiente, ou seja, não existe nenhum tipo de troca entre eles (YANG et al., 1996). A Figura 3 mostra o processo de equilíbrio entre o alimento e o ambiente. Na primeira parte (a) o alimento está carregado de moléculas de água. Em seguida, o mesmo é exposto em condições ambientais (b), em que o ar contém uma menor umidade relativa, em uma temperatura constante. Após um certo período, as moléculas de água que estavam no alimento, migram para o ar até atingir a umidade de equilíbrio.

Figura 3. Esquema de um processo de equilíbrio molecular entre o alimento e o ambiente.



Fonte: Adaptado de BECKER; SALLANS (1956).

Isso significa que a a_w do alimento é o conteúdo de umidade que está em equilíbrio com a umidade relativa do ambiente. A umidade de equilíbrio de um alimento depende de sua composição, estrutura e condições do ambiente como a temperatura. De forma geral, quanto maior for a diferença entre o conteúdo de umidade de equilíbrio e a umidade relativa do ambiente, maior vai ser a taxa de perda ou ganho de água.

3.2. Atividade de água

A água é o constituinte mais abundante dos alimentos frescos ou *in natura*. Possui várias funções no processamento de alimentos e impacta diretamente nas reações e na qualidade dos alimentos (AL-MUHTASEB et al., 2002). Nos alimentos, ela pode estar em sua forma ligada e/ou livre. Na forma ligada, a água encontra-se associada com solutos e outros constituintes não aquosos como proteínas e polissacarídeos, não se comportando como a água pura, apresentando mobilidade reduzida e que não congela a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, não está disponível para reações enzimáticas, nem para o crescimento de microrganismos (DAMODARAN et al., 2010). Ao contrário da água ligada, a água livre apresenta as mesmas propriedades que a água pura,

estando disponível para reações enzimáticas, crescimento de microrganismos (DAMODARAN et al., 2010).

O conteúdo total de água em um produto é conhecido como umidade. A quantidade de água livre disponível nos alimentos é medida através da atividade de água (a_w), que pode ser definida através da equação 1:

$$a_w = \frac{P}{P_0} \quad 1$$

Em que a_w é a atividade da água (adimensional); P é a pressão de vapor da água no alimento em uma dada temperatura; P_0 é a pressão de vapor da água pura a essa mesma temperatura.

Em condições de equilíbrio, existe uma relação entre a a_w do alimento e a umidade relativa de equilíbrio (URE) de um ambiente fechado (BASU et al., 2007), que pode ser expressa através da equação 2:

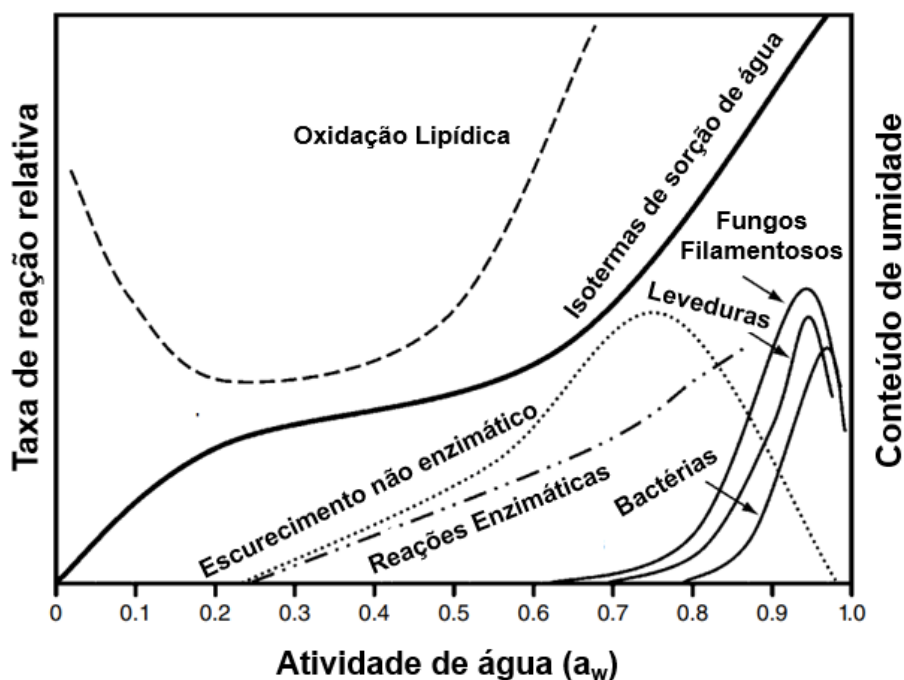
$$a_w = \frac{URE}{100} \quad 2$$

Essa relação entre a URE e a a_w permite prever quais alimentos irão ganhar ou perder umidade, quando forem expostos a uma atmosfera com determinada umidade.

Labuza em 1970 publicou uma revisão sobre a influência da atividade de água sobre as reações químicas nos alimentos. Desde então, vários estudos atuais (BARRETTO et al., 2018; BETIOL et al., 2020; ROSA et al., 2021; SÁNCHEZ-TORRES et al., 2021; SILVA et al., 2021) foram realizados com o intuito de descrever a forma que a água se encontra nos alimentos em diferentes condições de armazenamento e/ou secagem, visando avaliar a sua disponibilidade para atuar como solvente e participar em reações químicas ou bioquímicas (LABUZA, 1977).

Várias reações químicas (Figura 4) podem ocorrer nos alimentos, resultando na deterioração do produto e/ou matéria-prima em pouco tempo. A atividade de água dos alimentos influencia diretamente nessas reações, como a oxidação lipídica, reações de escurecimento enzimático e não-enzimático, degradação de vitaminas etc. Além disso, alterações específicas na cor, aroma, sabor, textura, estabilidade, e aceitabilidade de alimentos *in natura* e processados têm sido relacionadas com a a_w .

Figura 4. Mapa de estabilidade dos alimentos em função da atividade de água.



Fonte: Adaptado de BARBOSA-CÁNOVAS et al. (2020).

A Figura 4 mostra o comportamento de algumas reações que ocorrem nos alimentos, em função da atividade de água. Com exceção da oxidação lipídica, todas as outras taxas de reações têm sua velocidade reduzida com a redução da atividade de água até 0,2. Em níveis de atividade de água entre 0,2 e 0,5, a oxidação de lipídios apresenta uma taxa mínima de reação, sendo que abaixo de 0,2 e acima de 0,5 a taxa de reação da oxidação lipídica sofre uma rápida elevação. Dessa forma, caso o alimento seja susceptível a oxidação lipídica, valores muito baixos de atividade de água podem predispor o alimento a rancidez oxidativa. Entre as classes dos microrganismos, os fungos filamentosos são os mais resistentes em relação a redução da atividade de água, sendo os principais responsáveis pela deterioração de alimentos na faixa de atividade de água entre 0,61 – 0,70.

Em estudos com alimentos, um valor elevado de atividade de água significa que o alimento possui um alto teor de água livre na matriz. Dessa forma, os alimentos são classificados em função de sua atividade de água em três grupos: Alimentos com baixa umidade (atividade de água até 0,60); Alimentos com umidade intermediária (atividade de água entre 0,60 e 0,90); Alimentos com alta umidade (atividade de água acima de 0,90) (DAMODARAN et al., 2010).

As isotermas de sorção são consideradas ferramentas muito importantes para a indústria de alimentos, pois fornecem informações úteis para as operações unitárias

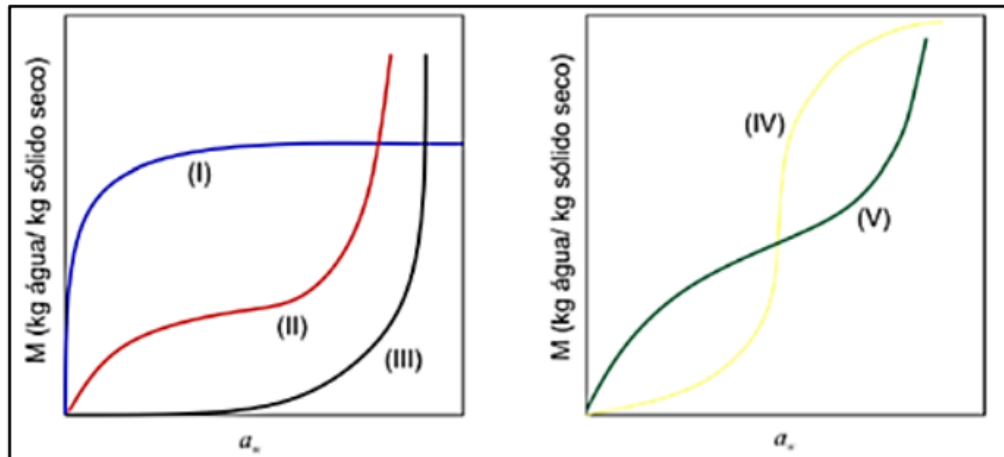
de concentração, secagem e hidratação de alimentos, visto que a facilidade de se retirar ou adicionar água está relacionado com a atividade de água do alimento. Elas também são essenciais durante a escolha da embalagem ideal e para acompanhar a estabilidade de produtos alimentícios durante o armazenamento. Essas condições ideais de processamento e armazenamento podem ser alcançadas através da compreensão do comportamento das isotermas de sorção de água de alimentos, em diferentes temperaturas (BARRETTO et al., 2018; SHARMA et al., 2018) evitando alterações indesejadas e aumentando a vida útil dos alimentos (STAUDT et al., 2013).

A relação entre a atividade de água do alimento e o teor de umidade de equilíbrio produz as curvas de isotermas de sorção de água para um alimento, em uma mesma temperatura. Essas curvas podem ser obtidas de três formas:

- **Isoterma de dessorção:** É obtida a partir de um material úmido, que é submetido a condições com umidade relativa menor que a do material.
- **Isoterma de adsorção:** É obtida a partir de um material completamente seco, que é submetido a condições com umidade relativa maior que a do material.
- **Isoterma de sorção:** Neste método, determina-se o conteúdo de umidade do material. Após, o material é submetido em diferentes ambientes de umidade relativa, de maneira que, abaixo de seu conteúdo inicial de umidade, a amostra vai sofrer dessorção, e, acima, adsorção.

Na maioria das curvas de isotermas de sorção de água dos alimentos, o comportamento de sorção de água ocorre de forma sigmóide ou não linear. Brunauer et al. (1940) classificam as isotermas de sorção de água nos alimentos com base na adsorção de gases de van der Waals em vários substratos sólidos. Na Figura 5, são apresentados os cinco tipos gerais de isotermas de adsorção. Pode-se observar a curva tipo I, que também é conhecida como isoterma de Langmuir. Essa isoterma mostra que existe uma quantidade máxima de moléculas de água adsorvidas, que não irá variar, não importa o quanto a atividade de água aumente. É limitada a poucas camadas moleculares, onde os poros excedem o diâmetro molecular do adsorvente.

Figura 5. Tipos de isotermas de sorção de Van Der Waals.



Fonte: Adaptado de BRUNAUER et al. (1940).

Nas isotermas de sorção do tipo II, a sorção de água ocorre de forma sigmóide, onde apresentam uma curvatura inicial voltada para cima, o que significa que as partículas adsorvidas estão formando uma monocamada na superfície do adsorvente. Assim que a monocamada estiver formada, as demais partículas serão adsorvidas sobre as primeiras, dando origem às multicamadas. Dessa forma, a água presente na monocamada será mais estável e durável do que a água presente na multicamada formada posteriormente.

As isotermas do tipo III, são características dos alimentos compostos principalmente de componentes cristalinos, como açúcares e sal. O ganho de umidade é muito baixo até o ponto em que os cristais começam a se dissolver na água absorvida na superfície do cristal. Este ponto é denominado ponto deliquescente (BARBOSA-CÁNOVAS et. al., 2020). As curvas tipo IV e V, a adsorção máxima ocorre a uma pressão inferior à pressão de vapor do ar (BARBOSA CÁNOVAS et. al., 2020).

A Tabela 2 reúne informações sobre as isotermas de sorção de água de vários alimentos, como carnes e produtos cárneos, grãos e cereais, frutas e vegetais, subprodutos agroindustriais e produtos em pó.

Tabela 2. Características de sorção de água dos alimentos.

Alimentos	Efeito estudado	Classificação	Temp. (°C)	Faixa URE (%)	Tipo de método	Tipo de Obtenção	Melhor modelo	Referência
Carnes e produtos cárneos								
Presunto curado	Efeito da temperatura e da composição química	Tipo III	7-27	6,25-96,15	Gravimétrico	Sorção	GAB	(Betiol et al., 2020)
Presunto cozido	Efeito da temperatura e da composição química	Tipo II	2-30	6,1-92	Gravimétrico	Sorção	GAB	(Barretto et al., 2018)
Fígado suíno	Efeito da temperatura	Tipo II	0-50	10,3-99,9	Higrométrico	Dessorção	GAB	(Sánchez-Torres et al., 2021)
Carne bovina	Efeito do teor de sal (0, 5, 10, 15 e 20 g / 100 g db)	Tipo II e III	25	***	Gravimétrico	Adsorção	BET	(Aykın-Dinçer & Erbaş, 2018)
Filetes de pirarucu	Efeito do teor de sal (10, 20, 30 e 40 g / 100 g db)	Tipo II e III	25	***	Gravimétrico	Adsorção e Dessorção	Halsey e GAB	(Martins et al., 2015)
Carne de tambaqui	Efeito do teor de cloreto de sódio e da temperatura	Tipo III	5-29	2-90	Gravimétrico	Sorção	Peleg	(Molina-Filho et al., 2006)
Couro bovino	Efeito da temperatura	Tipo II	30-70	5-100	Gravimétrico	Adsorção e Dessorção	GAB	(Fakhfakh et al., 2018)
Carne de jacaré	Efeito da temperatura	Tipo III	10-35	11-87	Gravimétrico	Sorção	GAB	(Lopes Filho et al., 2002)
Carne de frango	Efeito da temperatura	Tipo II	4-30	25.5-94.2	Gravimétrico	Dessorção	Ferro Fontan and GAB	(Delgado & Sun, 2002b)

Carne de cabra crua	Efeito da temperatura	Tipo II	10-50	19.5-93.2	Gravimétrico	Dessorção	Mizrahi e GAB	(Singh et al., 2006)
Carne suína	Efeito do teor de cloreto de sódio e da temperatura	***	5-26	11.2-94.6	Gravimétrico	Dessorção	***	(Comaposada et al., 2000)
Carne suína	Efeito do teor de cloreto de sódio e da temperatura		5-26	15-94.5	Gravimétrico	Dessorção	GAB	(Comaposada et al., 2007)
Carne bovina e suína	Efeito da temperatura e da composição	Tipo III	10-50	10-94	Gravimétrico	Dessorção	Iglesias e Chirife	(Delgado & Sun, 2002a)
Carne bovina liofilizada	Efeito da temperatura e do tipo de músculo	Tipo II	5-35	2-97	Gravimétrico	Adsorção	GAB	(Aykin & Erbaş, 2016)
Carne bovina previamente congelada	Efeito do cloreto de sódio, nitrito de sódio e temperatura	Tipo II	23-90	5-25	Gravimétrico	Dessorção	Halsey, Oswin e Peleg	(Kabil et al., 2012)

Grãos e Cereais

Malte de trigo	Efeito da temperatura	Tipo II	10-40	5,80–98,18	Gravimétrico	Sorção	Henderson e GAB	(Silva et al., 2021)
Farinha de mandioca modificada	Efeito da temperatura	Tipo II	27-50	5-84	Gravimétrico	Sorção	Henderson, Peleg e Chung-Pfost	(Hawa et al., 2020)
Amido de milho	Efeito da alta pressão (300 MPa por 5–60 min)	Tipo II	20	12-98	Gravimétrico	Adsorção e Dessorção	BET e GAB	(Santos et al., 2014)
Farinha de tapioca	***	Tipo II	25	22-92	Gravimétrico	Adsorção e Dessorção	Handerson e Smith	(Chisté et al., 2012)
Café	Efeito da temperatura		10-50	11-95	Gravimétrico	Dessorção	GAB	(Goneli et al., 2013)

Farinha de trigo integral	Efeito da temperatura	Tipo II	10-30	10-90	Gravimétrico	Adsorção	GAB e Caurie	(Martín-Santos et al., 2012)
Alimentos complementares à base de grãos de amaranto e sorgo	Efeito da temperatura	Tipo II	25-35	11-97	Gravimétrico	Sorção	GAB	(Gichau et al., 2020)
Extrudado de arroz infundido com antocianina	Efeito da temperatura	Tipo III	25-35	11.16-97.30	Gravimétrico	Sorção	Caurie e Peleg	(Das et al., 2021)
microencapsulada								
Grãos de Chironji	Efeito da temperatura	Tipo II	25-45	11.16-93.58	Gravimétrico	Sorção	GAB e Caurie	(Sahu et al., 2018)

Frutas e vegetais

Erva-mate verde e torrada	Efeito da temperatura	Tipo II	5-40	5,8-98	Gravimétrico	Adsorção	GAB	(Červenka et al., 2015)
Fatias de manga desidratada	Efeito da temperatura	Tipo III	25-35	8.3-97	Gravimétrico	Sorção	GAB	(Isaac et al., 2021)
Folhas de estêvia	Efeito da temperatura	Tipo II	35-55	5-92	Gravimétrico	Adsorção	GAB	(López-Vidaña et al., 2021)
Mirtilo	Efeito da temperatura	Tipo II e III	20-60	10-95	Gravimétrico	Adsorção e Dessorção	GAB, BET e Halsey	(Vega-Gálvez et al., 2009)

Queijos e derivados

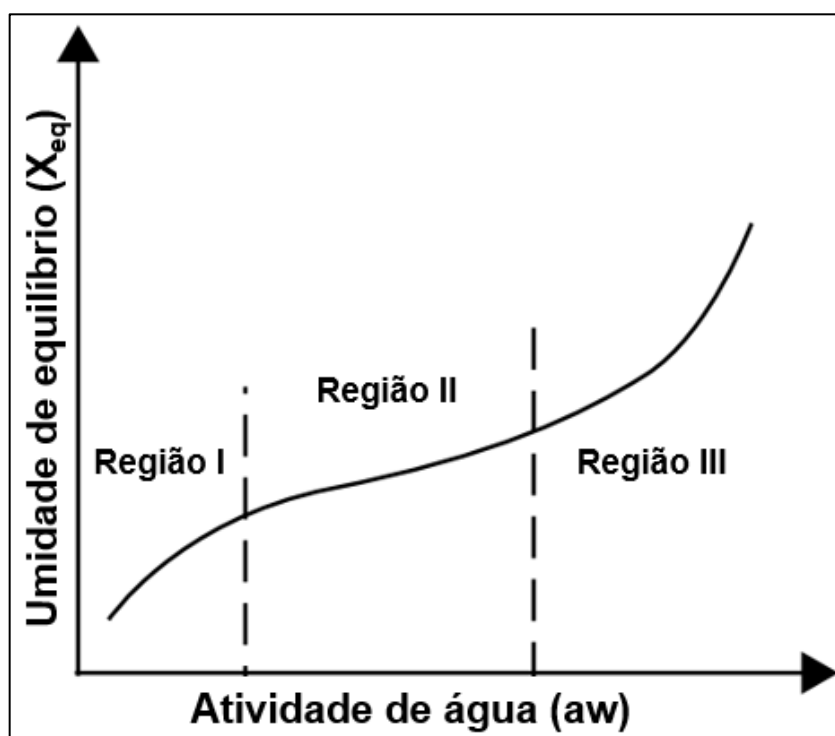
Queijo parmesão ralado	Efeito da temperatura	Tipo II	8-72	2-90	Gravimétrico	Sorção	GAB	(Freitas et al., 2016)
------------------------	-----------------------	---------	------	------	--------------	--------	-----	------------------------

Microcápsulas de oleorresina de pimenta-do-reino	Efeito da temperatura e do material de parede	Tipo II	25-45	11-85	Gravimétrico	Adsorção	GAB, BET e Condon	(Pineda et al., 2021)
Pós de misturas de manga	Efeito da temperatura e de auxiliares de secagem	Tipo II	20-50	5,9-90,7	Gravimétrico	Adsorção	GAB	(Cano-Higuaita et al., 2015)
Mel em pó	Efeito dos agentes carreadores: maltodextrina (MD), goma arábica (GA) e concentrado protéico de soro de leite (WPC)	Tipo II	25	11.3-84.3	Gravimétrico	Sorção	GAB	(Suhag et al., 2018)
Iogurte em pó	Efeito da temperatura	Tipo III	20-50	7-85	Gravimétrico	Sorção	Peleg	(Seth et al., 2018)
Cebola em pó	Efeito da temperatura e da germinação	Tipo II	20-50	11.1-85.1	Gravimétrico	Sorção	GAB	(Majid et al., 2018)
Abóbora em pó	***	Tipo III	25	10-90	Higrométrico	Adsorção e Dessorção	GAB e BET	(Al-Ghamdi et al., 2020)
Corantes naturais	Efeito do tipo de corante natural (antocianinas, betalaínas e curcumina)	Tipo II	25	11-97.3	Gravimétrico	Adsorção	BET	(Viana et al., 2019)
Folhas de coentro, salsa e aipo em pó	Efeito do método de secagem: microondas e vácuo (MWVD) e por convecção por ar quente (HACD)	Tipo II e III	20	***	Gravimétrico	Sorção	GAB, Peleg, Curie e Oswin	(Staniszewska et al., 2021)

*** Não informado no estudo.

O comportamento das isotermas também foi classificado de acordo com Brunauer et al. (1940). Dessa forma, o comportamento de sorção de água da maioria dos alimentos foi comumente observado como do tipo II e III. A Figura 6 mostra a isoterma de sorção de água de um alimento hipotético do tipo II.

Figura 6. Isoterma de sorção de água de um alimento hipotético do tipo II.



Fonte: Adaptado de HELDMAN e LUND (1992).

A distribuição da água nos alimentos pode ser dividida em três zonas: A região I, que representa a água fortemente ligada, também chamada de camada monomolecular de BET, com uma entalpia de vaporização consideravelmente maior do que a da água pura. Nesta região, a água está ligada aos grupos polares de certos compostos, especialmente NH_3^+ e COO^- das proteínas e OH^- dos amidos, assim como água de cristalização de açúcares e sais. O teor de umidade, teoricamente, representa a adsorção da primeira camada de moléculas de água (monocamada). Normalmente, as moléculas de água nesta região não são congeláveis e não estão disponíveis para reações químicas ou como plastificantes. A maioria dos produtos alimentícios secos exibem sua maior estabilidade em teores de umidade comparáveis ao teor de umidade de monocamada. Ela constitui uma quantidade muito pequena da água total do alimento e corresponde a uma atividade de água inferior a 0,3 (ORDÓÑEZ, 2005).

Na região II, a água se localiza em sítios remanescentes, formando várias camadas em torno dos grupos hidrofílicos, estando ligada por pontes de hidrogênio e interações dipolo-dipolo. Sua remoção é mais fácil, quando comparada à água da região I, entretanto, seu ponto de congelamento e sua capacidade de atuar como solvente encontram-se reduzidos em uma faixa de atividade de água entre 0,3 e 0,70.

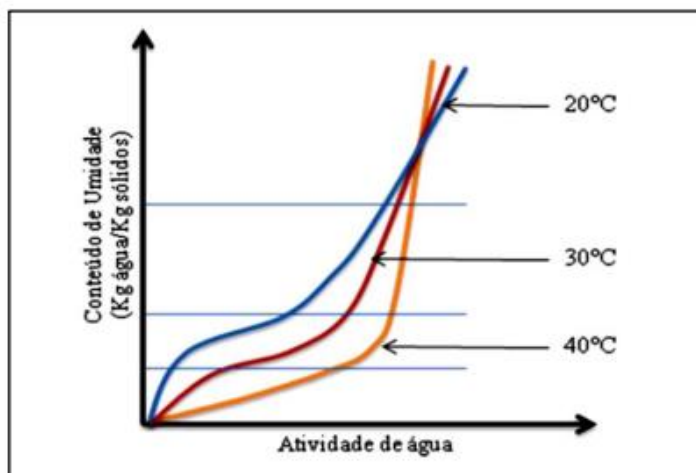
A região III corresponde à região onde a água se encontra fracamente ligada, disposta em macrocapilares e que estão disponíveis para reações químicas e microbiológicas. Sua retenção é determinada pelo pH e pelas forças iônicas. Apresenta-se em quantidade mais abundante e mais fácil de congelar e evaporar, sendo que sua eliminação reduz a atividade de água para 0,70.

Como o comportamento de sorção de água dos alimentos é influenciado pela temperatura, por sua composição química e pelo estado físico-químico de seus constituintes, as isotermas dos alimentos diferem consideravelmente entre si. Produtos com amido, incluindo os cereais, absorvem mais água a baixas atividades de água em comparação com produtos ricos em proteína, como a carne. Em relação ao estado físico dos constituintes, no estado amorfo, que é um estado termodinamicamente instável (comparado ao estado cristalino) e que carece de ordem molecular, os alimentos são mais higroscópicos que no estado cristalino (BARBOSA-CÁNOVAS et. al., 2020).

3.3. Efeito da temperatura nas isotermas de sorção

Levando em consideração que os alimentos são expostos a variações de temperatura durante o processamento e/ou armazenamento, o efeito da temperatura sobre as isotermas de sorção é de grande importância tecnológica, visto que a atividade de água dos alimentos é afetada pela temperatura (AL-MUHTASEB et. al., 2002). De forma geral, a figura 7 mostra a tendência das alterações na atividade de água de um alimento submetido diferentes temperaturas de processamento e/ou armazenamento.

Figura 7. Tendência das alterações na atividade de água de um alimento submetido diferentes temperaturas.



Fonte: Adaptado de BARBOSA-CÁNOVAS et al. (2007).

Em uma mesma atividade da água, o aumento da temperatura geralmente reduz a umidade de equilíbrio dos alimentos (BARBOSA-CÁNOVAS et. al., 2007). Esse comportamento pode estar relacionado ao aumento da energia cinética e do estado de excitação das moléculas de água com o aumento da temperatura, o que provoca a redução das forças de atração entre as moléculas de água, que se tornam menos estáveis e se separam facilmente dos locais de conexão da água (AL-MUHTASEB et al., 2002).

3.4. Efeito da composição química nas isotermas de sorção

De forma semelhante a temperatura, a composição química dos alimentos pode afetar a forma como as moléculas de água se ligam na matriz alimentar, resultando em alterações na atividade da água (a_w) e, conseqüentemente, na estabilidade dos alimentos (RIZVI, 2005). Essas alterações na atividade de água podem influenciar não só o desenvolvimento microbiano, mas também em reações enzimáticas, oxidativas e propriedades sensoriais como a textura dos alimentos.

Embora a composição química possa afetar as isotermas de sorção dos alimentos, poucos estudos foram realizados nesse sentido. Barretto et al. (2018) estudaram as Isotermas de sorção de água de presuntos cozidos conforme foram afetados pela temperatura e pela sua composição química. Os autores relataram que quanto menor for a relação umidade/proteína ou quanto menor for o teor de gordura, maior será a umidade de equilíbrio (X_{eq}) do presunto cozido. Levando em

consideração que o presunto cozido é um produto com alto teor de umidade, e que quando retirado da embalagem e fatiado durante a sua comercialização, pode ocorrer a liberação de fluidos, o que é uma característica indesejável para esse produto, essas informações podem ajudar a indústria de produtos cárneos a controlar a qualidade do presunto cozido, podendo auxiliar na redução da dessorção de água desse produto (BARRETTO et al., 2018).

Betiol et al. (2020) estudaram a Influência da temperatura e da composição química nas isotermas de sorção de água para presunto curado. Os autores relataram que presuntos curados com teor de sódio semelhante, porém com menor teor de proteínas e maior teor de gordura apresentaram maiores umidades de equilíbrio (x_{eq}), o que contraria alguns relatos (BARRETTO et al., 2018; ERBAŞ et al., 2016; IGLESIAS & CHIRIFE, 1982) da literatura. Os autores atribuíram esses resultados as diferentes alterações (desnaturação, reticulação e interação de proteínas nativas ou desnaturadas com lipídeos) que podem sofrer as proteínas do presunto curado durante os processos de salga e secagem, e que essas alterações podem levar a uma diminuição dos grupos polares disponíveis para ligação com a água no presunto curado.

Recentemente, Aykin-dinçer & Erbaş (2018) investigaram a influência de diferentes porcentagens de NaCl (0, 5, 10, 15 e 20%) sobre a cinética de secagem e nas isotermas de adsorção de fatias de carne bovina. Os autores relataram que as isotermas da carne seca com 0% de NaCl apresentaram um comportamento de sorção de água do Tipo II, em forma de sigmóide, de acordo com a classificação BET de isotermas de adsorção de Van der Waal (BRUNAUER et al., 1940), mas a adição de sal fez com que esse comportamento mudasse para o tipo III, especialmente para amostras com 15 e 20 g NaCl / 100 g (base seca). As isotermas do tipo III foram encontradas para produtos semelhantes como filé de pirarucu salgado (MARTINS et al., 2015), carne de tambaqui salgada (MOLINA-FILHO et al., 2006) e carne de jacaré salgada (LOPES-FILHO et al., 2002).

3.5. Modelagem matemática das isotermas de sorção

Para as indústrias de alimentos, especialmente na área de engenharia de processos, é essencial compreender as isotermas de sorção dos alimentos e/ou ingredientes para estabelecer o conteúdo crítico de umidade desses materiais em determinadas condições de secagem e/ou armazenamento. Dessa forma, existem

uma grande quantidade de modelos matemáticos que foram desenvolvidos para descrever as isotermas de sorção de água dos alimentos. Entretanto, nenhum desses modelos são capazes de fornecer resultados precisos para todos os alimentos em todas as faixas de atividade de água, devido ao fato da água está associada à matriz alimentar em diferentes regiões de atividade de água e por diferentes mecanismos. Os modelos matemáticos mais comumente utilizados para descrever as isotermas de sorção de água são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Modelos mais utilizados para ajustar as isotermas de sorção de água dos alimentos.

Modelo	Equação	Referência	
GAB	$X_{eq} = \frac{X_m \times C \times k \times aw}{(1 - k \times aw)(1 + (C - 1)k \times aw)}$	Lomauro et al. (1985)	(3)
Halsey	$X_{eq} = (-h_1 \times \ln(aw))^{-\frac{1}{h_2}}$	Halsey (1948)	(4)
Henderson	$X_{eq} = \left(-\frac{1}{H_1} \times \ln(1 - aw)\right)^{\frac{1}{H_2}}$	Boquet et al. (1978)	(5)
Iglesias & Chirife	$X_{eq} = A + B \times \frac{aw}{1 - aw}$	Chirife & Iglesias (1978)	(6)
Oswin	$X_{eq} = M \times \left(\frac{aw}{1 - aw}\right)^N$	Oswin (1946)	(7)
Peleg	$X_{eq} = k_1 \times aw^{n_1} + k_2 \times aw^{n_2}$	Peleg (1993)	(8)
Smith	$X_{eq} = A - B \times (\ln(1 - aw))$	Sormoli & Langrish (2015)	(9)
White & Eirring	$X_{eq} = \frac{1}{A + B \times aw}$	Sormoli & Langrish (2015)	(10)
BET	$X_{eq} = \frac{X_m \times C \times aw}{(1 - aw)(1 - aw + C \times aw)}$		(11)

A, B, C, k, k1, n1, k2, n2, M, N, h1, h2 H1 e H2 são constantes dos modelos, Xm representa o teor de umidade da monocamada, Xeq é o teor de umidade de equilíbrio e aw é a atividade de água.

Esses modelos propostos para predizer as isotermas de sorção de água dos alimentos são classificados como teóricos, semiempíricos e empíricos (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2007). Modelos como BET e GAB são baseados na umidade da monocamada e por isso são classificados como modelos teóricos. As constantes destes modelos, ao contrário dos modelos empíricos ou semiempíricos, fornecem informações sobre a umidade da monocamada. A umidade da monocamada, por sua vez, tem sido relatada como a faixa de umidade na qual os alimentos desidratados atingem sua estabilidade físico-química (TONON et al., 2009). As constantes obtidas do modelo de BET (X_m (kg/kg); C (adimensional)) são respectivamente, o teor de umidade da monocamada e a constante de energia. Entretanto, esse modelo se aplica a uma faixa de atividade de água restrita (0 a 0,55), sendo que, acima deste valor de a_w , o modelo resulta em uma variação não-linear muito grande quando se analisa graficamente a equação.

Referências

- AHMED, I.; QAZI, I. M.; JAMAL, S. Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 34, p. 29-43, 2016.
- AL-GHAMDI, S., HONG, Y. K., QU, Z., & SABLANI, S. S. State diagram, water sorption isotherms and color stability of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). **Journal of food Engineering**, v. 273, p. 109820, 2020.
- AL-MUHTASEB, A. H.; MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review. **Food and bioprocesses processing**, v. 80, n. 2, p. 118-128, 2002.
- ALAMATIAN, S.; MOHEBBI, M.; VARIDI, M.; & NEZHAD, M. M. Modeling of osmotic treatment of ostrich meat coated by tragacanth and salep. **Meat science**, v. 156, p. 231-239, 2019.
- Albarracín, W.; Sánchez, I. C.; Grau, R.; & Barat, J. M. Salt in food processing; usage and reduction: a review. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 46, n. 7, p. 1329-1336, 2011.
- Andreou, V.; Tsironi, T.; Dermesonlouoglou, E.; Katsaros, G.; & Taoukis, P. Combinatory effect of osmotic and high-pressure processing on shelf-life extension of

animal origin products—Application to chilled chicken breast fillets. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 15, p. 43-51, 2018.

ARSLAN-TONTUL, S. Moisture sorption isotherm, isosteric heat and adsorption surface area of whole chia seeds. **LWT - Food Science and Technology**, v. 119, p. 108859, 2020.

ASSIS, F. R.; MORAIS, R. M. S. C.; MORAIS, A. M. M. B. Mass transfer in osmotic dehydration of food products: comparison between mathematical models. **Food engineering reviews**, v. 8, n. 2, p. 116-133, 2016.

AYKIN-DINÇER, E. Application of ultrasound-assisted vacuum impregnation for improving the diffusion of salt in beef cubes. **Meat Science**, v. 176, p. 108469, 2021.

AYKIN-DINÇER, E.; ERBAŞ, M. Drying kinetics, adsorption isotherms and quality characteristics of vacuum-dried beef slices with different salt contents. **Meat science**, v. 145, p. 114-120, 2018.

AYKIN, E.; ERBAŞ, M. Quality properties and adsorption behavior of freeze-dried beef meat from the Biceps femoris and Semimembranosus muscles. **Meat science**, v. 121, p. 272-277, 2016.

BALDIN, J. C.; MICHELIN, E. C.; POLIZER, Y. J.; RODRIGUES, I.; DE GODOY, S. H. S.; FREGONESI, R. P.; & TRINDADE, M. A. Microencapsulated jabuticaba (*Myrciaria cauliflora*) extract added to fresh sausage as natural dye with antioxidant and antimicrobial activity. **Meat Science**, v. 118, p. 15-21, 2016.

BAMPI, M., DOMSCHKE, N. N., SCHMIDT, F. C., & LAURINDO, J. B. Influence of vacuum application, acid addition and partial replacement of NaCl by KCl on the mass transfer during salting of beef cuts. **LWT - Food Science and Technology**, v. 74, p. 26-33, 2016.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V., FONTANA JR, A. J., SCHMIDT, S. J., & LABUZA, T. P. **Water activity in foods: fundamentals and applications**. John Wiley & Sons, 2020.

BARRETTO, T. L.; POLACHINI, T. C.; BARRETTO, A. C. D. S.; & TELIS-ROMERO, J. Water sorption isotherms of cooked hams as affected by temperature and chemical composition. **Food Science and Technology**, 2018, 39: 677-683.

BASU, SANTANU; SHIVHARE, U. S.; MUJUMDAR, A. S. Models for sorption isotherms for foods: a review. **Drying technology**, 24.8: 917-930, 2006.

Betiol, L. F. L., Evangelista, R. R., Sanches, M. A. R., Basso, R. C., Gullón, B., Lorenzo, J. M., ... & Romero, J. T. Influence of temperature and chemical composition on water sorption isotherms for dry-cured ham. **LWT - Food Science and Technology**, v. 123, p. 109112, 2020.

BOGOEVA, ADELINA L.; DURAKOVA, ALBENA G. Sorption characteristics of full-fatted grape seeds flour of Bulgarian origin. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 2, p. 100026, 2020.

BRUNAUER, S.; DEMING, L. S.; DEMING, W. E.; & TELLER, E. On a theory of the van der Waals adsorption of gases. **Journal of the American Chemical society**, v. 62, n. 7, p. 1723-1732, 1940.

CANO-HIGUITA, D. M.; VILLA-VÉLEZ, H. A.; TELIS-ROMERO, J.; VÁQUIRO, H. A.; & TELIS, V. R. N. Influence of alternative drying aids on water sorption of spray dried mango mix powders: A thermodynamic approach. **Food and Bioproducts Processing**, v. 93, p. 19-28, 2015.

CANO-HIGUITA, D. M.; VILLA-VÉLEZ, H. A.; TELIS-ROMERO, J.; VÁQUIRO, H. A.; & TELIS, V. R. N. Influence of alternative drying aids on water sorption of spray dried mango mix powders: A thermodynamic approach. **Food and Bioproducts Processing**, v. 93, p. 19-28, 2015.

CÁRCEL, J. A.; GARCÍA-PÉREZ, J. V.; BENEDITO, J.; & MULET, A. Food process innovation through new technologies: Use of ultrasound. **Journal of Food Engineering**, v. 110, n. 2, p. 200-207, 2012.

LAVOYER, F. C. G., GABAS, A. L., OLIVEIRA, W. P., & TELIS-ROMERO, J. Study of adsorption isotherms of green coconut pulp. **Food Science and Technology**, v. 33, n. 1, p. 68-74, 2013.

CARVALHO, G. R., CHENLO, F., MOREIRA, R., & TELIS-ROMERO, J. Physicothermal properties of aqueous sodium chloride solutions. **Journal of Food Process Engineering**, v. 38, n. 3, p. 234-242, 2015.

CASALES, M. R., & YEANNES, M. I. Mass transfer modeling during marination of anchovy fillets in ternary and multicomponent solutions. **Journal of aquatic food product technology**, v. 25, n. 5, p. 760-769, 2016.

ČERVENKA, L., HLOUŠKOVÁ, L., & ŽABČÍKOVÁ, S. Moisture adsorption isotherms and thermodynamic properties of green and roasted Yerba mate (*Ilex paraguariensis*). **Food bioscience**, v. 12, p. 122-127, 2015.

CHIRIFE, J.; IGLESIAS, H. A. Equations for fitting water sorption isotherms of foods: Part 1 — a review. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 13, n. 3, p. 159–174, 1978.

CHISTÉ, R. C.; SILVA, P. A.; LOPES, A. S.; & DA SILVA PENA, R. Sorption isotherms of tapioca flour. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 47, n. 4, p. 870–874, 2012.

COMAPOSADA, J.; GOU, P.; PAKOWSKI, Z.; & ARNAU, J. (2000). Desorption isotherms for pork meat at different NaCl contents and temperatures. **Drying Technology**, v. 18, n. 3, p. 723-746, 2000.

COMAPOSADA, J.; GOU, P.; ARNAU, J. The effect of sodium chloride content and temperature on pork meat isotherms. **Meat Science**, v. 55, n. 3, p. 291–295, 2000.

DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L.; FENNEMA, O. R. **Química De Alimentos De Fennema**. Editorial Acribia, Espanha, 1258p, 2010.

DAS, A. B.; GOUD, V. V.; DAS, C. Influence of extrusion cooking on phytochemical, physical and sorption isotherm properties of rice extrudate infused with microencapsulated anthocyanin. **Food Science and Biotechnology**, v. 30, n. 1, p. 65–76, 2021.

DELGADO-PANDO, G., FISCHER, E., ALLEN, P., KERRY, J. P., O'SULLIVAN, M. G., & HAMILL, R. M. Salt content and minimum acceptable levels in whole-muscle cured meat products. **Meat Science**, v. 139, p. 179–186, 2018.

DELGADO, A. E.; SUN, D. W. Desorption isotherms for cooked and cured beef and pork. **Journal of Food Engineering**, v. 51, n. 2, p. 163–170, 2002a.

DELGADO, A. E.; SUN, D. W. Desorption isotherms and glass transition temperature for chicken meat. **Journal of Food Engineering**, v. 55, n. 1, p. 1–8, 2002b.

DERMESONLOUOGLOU, E. K., BIMPILAS, A., ANDREOU, V., KATSAROS, G. J., GIANNAKOUROU, M. C., & TAOUKIS, P. S. Process Optimization and Kinetic Modeling of Quality of Fresh-Cut Strawberry Cubes Pretreated by High Pressure and Osmosis. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 41, n. 5, p. e13137, 1 out. 2017.

DESMOND, E. Reducing salt: A challenge for the meat industry. **Meat Science**, v. 74, n. 1, p. 188–196, 2006.

DIMAKOPOULOU-PAPAZOGLU, D.; KATSANIDIS, E. Mass transfer kinetics during osmotic processing of beef meat using ternary solutions. **Food and Bioproducts Processing**, v. 100, p. 560–569, 2016.

DIMAKOPOULOU-PAPAZOGLU, D.; KATSANIDIS, E. Effect of Maltodextrin, Sodium Chloride, and Liquid Smoke on the Mass Transfer Kinetics and Storage Stability of Osmotically Dehydrated Beef Meat. **Food and Bioprocess Technology**, v. 10, n. 11, p. 2034–2045, 2017.

DIMAKOPOULOU-PAPAZOGLU, D.; KATSANIDIS, E. Diffusion coefficients and volume changes of beef meat during osmotic dehydration in binary and ternary solutions. **Food and Bioproducts Processing**, v. 116, p. 10–19, 2019a.

DIMAKOPOULOU-PAPAZOGLU, D.; KATSANIDIS, E. Osmotic Processing of Meat: Mathematical Modeling and Quality Parameters. **Food Engineering Reviews**, v. 12, n. 1, p. 32–47, 2019b.

DOYLE, M. E.; GLASS, K. A. Sodium Reduction and Its Effect on Food Safety, Food Quality, and Human Health. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 9, n. 1, p. 44–56, 2010.

ERBAŞ, M.; AYKIN, E.; ARSLAN, S.; & DURAK, A. N. Adsorption behaviour of bulgur. **Food Chemistry**, v. 195, p. 87–90, 2016.

FAKHFAKH, R.; MIHOUBI, D.; KECHAOU, N. Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of bovine leather. **Heat and Mass Transfer**, v. 54, n. 4, p. 1163–1176, 2018.

FILIPOVIĆ, I.; ĆURČIĆ, B.; FILIPOVIĆ, V.; NIĆETIN, M.; FILIPOVIĆ, J.; & KNEŽEVIĆ, V. The Effects of Technological Parameters on Chicken Meat Osmotic Dehydration

Process Efficiency. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 41, n. 1, p. e13116, 2017.

FREITAS, M. L. F.; POLACHINI, T. C.; DE SOUZA, A. C.; & TELIS-ROMERO, J. Sorption isotherms and thermodynamic properties of grated Parmesan cheese. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 51, n. 1, p. 250–259, 2016.

MARTINS, M. G., CHADA, P. S. N., & DA SILVA PENA, R. Application of pulsed-vacuum on the salt impregnation process of pirarucu fillet. **Food Research International**, v. 120, p. 407–414, 2019.

GICHAU, A. W.; OKOTH, J. K.; MAKOKHA, A. Moisture sorption isotherm and shelf-life prediction of complementary food based on amaranth–sorghum grains. **Journal of Food Science and Technology**, v. 57, n. 3, p. 962–970, 2020.

GONELI, A. L. D., CORRÊA, P. C., OLIVEIRA, G. D., & JÚNIOR, P. A. Water sorption properties of coffee fruits, pulped and green coffee. **LWT - Food Science and Technology**, v. 50, n. 2, p. 386–391, 2013.

GOU, P.; COMAPOSADA, J.; ARNAU, J. NaCl content and temperature effects on moisture diffusivity in the Gluteus medius muscle of pork ham. **Meat Science**, v. 63, n. 1, p. 29–34, 2003.

GRAIVER, N.; PINOTTI, A.; CALIFANO, A.; & ZARITZKY, N. Diffusion of sodium chloride in pork tissue. **Journal of Food Engineering**, v. 77, n. 4, p. 910–918, 2006.

HALSEY, G. Physical adsorption on non-uniform surfaces. **The Journal of Chemical Physics**, v. 16, n. 10, p. 931–937, 1948.

Hawa, L. C., Ubaidillah, U., Damayanti, R., & Hendrawan, Y. Moisture sorption isotherms of modified cassava flour during drying and storage. **Heat and Mass Transfer**, v. 56, n. 8, p. 2389-2396, 2020.

HE, F. J.; MACGREGOR, G. A. Reducing Population Salt Intake Worldwide: From Evidence to Implementation. **Progress in Cardiovascular Diseases**, v. 52, n. 5, p. 363–382, 2010.

HUFF-LONERGAN, E.; LONERGAN, S. M. Mechanisms of water-holding capacity of meat: The role of postmortem biochemical and structural changes. **Meat science**, v. 71, n. 1, p. 194-204, 2005.

IGLESIAS, Hector. **Handbook of food isotherms: Water sorption parameters for food and food components**. Elsevier, 2012.

INGUGLIA, E. S., ZHANG, Z., TIWARI, B. K., KERRY, J. P., & BURGESS, C. M. Salt reduction strategies in processed meat products – A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 59, p. 70–78, 2017.

ISAAC, N., OWINO, W., AMBUKO, J., & IMATHIU, S. Moisture sorption properties of two varieties of dehydrated mango slices as determined by gravimetric method using Guggenheim–Anderson–de Boer model. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 45, n. 1, p. e15041, 2021.

KABIL, E.; AKTAŞ, N.; BALCI, E. Effect of sodium chloride, sodium nitrite and temperature on desorption isotherms of previously frozen beef. **Meat Science**, v. 90, n. 4, p. 932–938, 2012.

KANG, D. C., WANG, A. R., ZHOU, G. H., ZHANG, W. G., XU, S. M., & GUO, G. P. Power ultrasonic on mass transport of beef: Effects of ultrasound intensity and NaCl concentration. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 35, p. 36–44, 2016.

KOOHMARAIE, M.; KENT, M. P.; SHACKELFORD, S. D.; VEISETH, E.; WHEELER, T. L. Meat tenderness and muscle growth: is there any relationship? **Meat Science**, v. 62, n. 3, p. 345–352, 2002.

LABUZA, Theodore P. Sorption phenomena in foods: theoretical and practical aspects. In: **Theory, determination and control of physical properties of food materials**. Springer, Dordrecht, 1975. p. 197-219.

LAWRIE, R.A. **Ciência da carne**. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2005. 384p.

LI, Y., FENG, T., SUN, J., GUO, L., WANG, B., HUANG, M., ... & HO, H. Physicochemical and microstructural attributes of marinated chicken breast influenced by breathing ultrasonic tumbling. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 64, p. 105022, 2020.

LOMAURO, C. J.; BAKSHI, A. S.; LABUZA, T. P. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations part I: Fruit, vegetable and meat products. **LWT - Food Science and Technology**, v. 18, n. 2, p. 111–117, 1985.

LOPES FILHO, J. F., ROMANELLI, P. F., BARBOZA, S. H. R., GABAS, A. L., & TELIS-ROMERO, J. Sorption isotherms of alligator's meat (*Caiman crocodilus yacare*). **Journal of Food Engineering**, v. 52, n. 2, p. 201–206, 2002.

LÓPEZ-VIDAÑA, E. C., CASTILLO TÉLLEZ, M., PILATOWSKY FIGUEROA, I., SANTIS ESPINOSA, L. F., & CASTILLO-TÉLLEZ, B. Moisture sorption isotherms, isosteric heat, and Gibbs free energy of stevia leaves. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 45, n. 1, p. e15016, 2021.

MAJID, I., HUSSAIN, S., & NANDA, V. Moisture sorption isotherms and quality characteristics of onion powder during storage as affected by sprouting. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 13, n. 1, p. 775–784, 2018.

MALLEK-AYADI, S.; BAHLOUL, N.; KECHAOU, N. Mathematical modelling of water sorption isotherms and thermodynamic properties of *Cucumis melo* L. seeds. **LWT - Food Science and Technology**, v. 131, p. 109727, 2020.

MARTÍN-SANTOS, J.; VIOQUE, M.; GÓMEZ, R. Thermodynamic properties of moisture adsorption of whole wheat flour. Calculation of net isosteric heat. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 47, n. 7, p. 1487–1495, 2012.

MARTINS, M. G.; MARTINS, D. E. G.; PENA, R. DA S. Drying kinetics and hygroscopic behavior of pirarucu (*Arapaima gigas*) fillet with different salt contents. **LWT - Food Science and Technology**, v. 62, n. 1, p. 144–151, 2015.

MERLO, T. C., DA CRUZ ANTONIO, J., SAVIAN, T. V., VILLEGAS, C., DARGELIO, M. D. B., DA SILVA PINTO, J. S., ... & CONTRERAS-CASTILLO, C. J. Effect of the smoking using Brazilian reforestation woods on volatile organic compounds, lipid oxidation, microbiological and hedonic quality of bacons during shelf life. **Meat Science**, v. 164, p. 108110, 2020.

MOLINA-FILHO, L., PEDRO, M. A. M., TELIS-ROMERO, J., & BARBOZA, S. H. R. Influência da temperatura e da concentração do cloreto de sódio (NaCl) nas isotermas

de sorção da carne de tambaqui (*Colossoma macroparum*). **Food Science and Technology**, v. 26, p. 453-458, 2006.

MUÑIZ-BECERÁ, S.; MÉNDEZ-LAGUNAS, L. L.; RODRÍGUEZ-RAMÍREZ, J. Solute Transfer in Osmotic Dehydration of Vegetable Foods: A Review. **Journal of Food Science**, v. 82, n. 10, p. 2251–2259, 2017.

TELIS, V. R. N., ROMANELLI, P. F., GABAS, A. L., & TELIS-ROMERO, J. Salting kinetics and salt diffusivities in farmed Pantanal caiman muscle. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 529-535, 2003.

OSWIN, C. R. The kinetics of package life. III. The isotherm. **Journal of the Society of Chemical Industry**, v. 65, n. 12, p. 419–421, 1946.

PINEDA, L. A. P.; CONTRERAS, Y. M.; GALARZA, M. D. L. A.; MORALES, M. C.; MARAÑÓN, A. H.; DÍAZ, M. P. R.; & ANDRADE, E. F. Clustering function and minimum change in spreading pressure as key factor to predict storage conditions for black pepper oleoresin encapsulated by spray drying. **Food Bioscience**, v. 42, p. 101215, 2021.

PELEG, M. Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms. **Journal of Food Process Engineering**, v. 16, n. 1, p. 21–37, 1993.

POLACHINI, T. C., BETIOL, L. F. L., LOPES-FILHO, J. F., & TELIS-ROMERO, J. Water adsorption isotherms and thermodynamic properties of cassava bagasse. **Thermochimica Acta**, v. 632, p. 79-85, 2016.

RASTOGI, N. K., RAGHAVARAO, K. S. M. S., NIRANJAN, K., & KNORR, D. Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer. **Trends in Food Science & Technology**, v. 13, n. 2, p. 48–59, 1 fev. 2002.

ROSA, D. P., EVANGELISTA, R. R., MACHADO, A. L. B., SANCHES, M. A. R., & TELIS-ROMERO, J. Water sorption properties of papaya seeds (*Carica papaya* L.) formosa variety: An assessment under storage and drying conditions. **LWT - Food Science and Technology**, v. 138, p. 110458, 1 mar. 2021.

ROSA, D. P.; VILLA-VÉLEZ, H. A.; TELIS-ROMERO, J. Study of the enthalpy-entropy mechanism from water sorption of orange seeds (*C. sinensis* cv. Brazilian) for the use

of agro-industrial residues as a possible source of vegetable oil production. **Food Science and Technology**, v. 33, n.1, p. 95–101, 2013.

SAHU, S. N.; TIWARI, A.; SAHU, J. K.; NAIK, S. N.; BAITHARU, I.; & KARIALI, E. Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of sorbed water of chironji (*Buchanania lanzan* Spreng.) kernels at different storage conditions. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 12, n. 4, p. 2626–2635, 2018.

SANCHES, M. A. R., SILVA, P. M. O. C., BARBOSA, R. D., ROMERO, J. T., & BARRETTO, A. C. D. S. Mass transfer in beef: Effect of crossbreeding and ultrasound application. **Scientia Agricola**, v. 78, n. 5, p. 1–9, 2020.

SANCHES, M. A. R., SILVA, P. M. O. C., BARRETTO, T. L., DARROS-BARBOSA, R., DA SILVA-BARRETTO, A. C., & TELIS-ROMERO, J. Technological and diffusion properties in the wet salting of beef assisted by ultrasound. **LWT - Food Science and Technology**, v. 149, p. 112036, 2021.

SANCHEZ-TORRES, E. A., ABRIL, B., BENEDITO, J., BON, J., & GARCIA-PEREZ, J. V. Water desorption isotherms of pork liver and thermodynamic properties. **LWT - Food Science and Technology**, v. 149, p. 111857, 2021.

SCHMIDT, F. C. **Desenvolvimento de um processo integrado de cozimento e resfriamento a vácuo aplicado a cortes de peito de frango**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Departamento de Engenharia Química e de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2010.

DOS SANTOS; J. M., IGNÁCIO, E. O.; BIS-SOUZA, C. V.; & DA SILVA-BARRETTO, A. C. Performance of reduced fat-reduced salt fermented sausage with added microcrystalline cellulose, resistant starch and oat fiber using the simplex design. **Meat Science**, v. 175, p. 108433, 1 maio 2021.

Santos, M. D., Ferreira, J., Fidalgo, L. G., Queirós, R. P., Delgadillo, I., & Saraiva, J. A. Changes in maize starch water sorption isotherms caused by high pressure. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 49, n. 1, p. 51–57, 2014.

SCHMIDT, F. C.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. Salting operational diagrams for chicken breast cuts: Hydration–dehydration. **Journal of Food Engineering**, v. 88, n. 1, p. 36–44, 2008.

SCHMIDT, F. C.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. Application of diffusive and empirical models to hydration, dehydration and salt gain during osmotic treatment of chicken breast cuts. **Journal of Food Engineering**, v. 91, n. 4, p. 553–559, 2009.

SETH, D., DASH, K. K., MISHRA, H. N., & DEKA, S. C. Thermodynamics of sorption isotherms and storage stability of spray dried sweetened yoghurt powder. **Journal of Food Science and Technology**, v. 55, n. 10, p. 4139–4147, 2018.

SHARMA, N., GOYAL, S. K., ALAM, T., FATMA, S., & NIRANJAN, K. Effect of Germination on the Functional and Moisture Sorption Properties of High–Pressure-Processed Foxtail Millet Grain Flour. **Food and Bioprocess Technology**, v. 11, n. 1, p. 209–222, 2018.

SHIMOKOMAKI, M., FRANCO, B. D. G. M., BISCONTINI, T. M., PINTO, M. F., TERRA, N. N., & ZORN, T. M. T. Charqui meats are hurdle technology meat products. **Food Reviews International**, v. 14, n. 4, p. 339–349, 1998.

SILVA, K. S., POLACHINI, T. C., LUNA-FLORES, M., LUNA-SOLANO, G., RESENDE, O., & TELIS-ROMERO, J. Sorption isotherms and thermodynamic properties of wheat malt under storage conditions. **Journal of Food Process Engineering**, p. e13784, 2021.

SINGH, R. R. B., RAO, K. H., ANJANEYULU, A. S. R., & PATIL, G. R. Water desorption characteristics of raw goat meat: Effect of temperature. **Journal of Food Engineering**, v. 75, n. 2, p. 228–236, 2006.

SIRÓ, I., VÉN, C., BALLA, C., JÓNÁS, G., ZEKE, I., & FRIEDRICH, L. Application of an ultrasonic assisted curing technique for improving the diffusion of sodium chloride in porcine meat. **Journal of Food Engineering**, v. 91, n. 2, p. 353–362, 2009.

SORMOLI, E. M.; LANGRISH, T. A. G. Moisture sorption isotherms and net isosteric heat of sorption for spray-dried pure orange juice powder. **LWT – Food Science and Technology**, v. 62, n. 1, p. 875–882, 2015.

STANISZEWSKA, I., DZADZ, L., NOWAK, K. W., & ZIELINSKA, M. Evaluation of storage stability of dried powdered coriander, parsley and celery leaves based on the moisture sorption isotherms and glass transition temperature. **LWT – Food Science and Technology**, v. 146, p. 111440, 2021.

STAUDT, P. B., TESSARO, I. C., MARCZAK, L. D. F., SOARES, R. D. P., & CARDOZO, N. S. M. A new method for predicting sorption isotherms at different temperatures: Extension to the GAB model. **Journal of Food Engineering**, v. 118, n. 3, p. 247–255, 2013.

SUHAG, Y.; NAYIK, G. A.; NANDA, V. Modelling of moisture sorption isotherms and glass transition temperature of spray-dried honey powder. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 12, n. 4, p. 2553–2560, 1 dez. 2018.

TALENS, C.; CASTRO-GIRALDEZ, M.; FITO, P. J. Effect of Microwave Power Coupled with Hot Air Drying on Sorption Isotherms and Microstructure of Orange Peel. **Food and Bioprocess Technology**, v. 11, n. 4, p. 723–734, 2018.

TEJADA-ORTIGOZA, V., GARCIA-AMEZQUITA, L. E., SERMENT-MORENO, V., TORRES, J. A., & WELTI-CHANES, J. Moisture sorption isotherms of high pressure treated fruit peels used as dietary fiber sources. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 43, p. 45–53, 2017.

TONON, R. V., BARONI, A. F., BRABET, C., GIBERT, O., PALLET, D., & HUBINGER, M. D. Water sorption and glass transition temperature of spray dried açai (*Euterpe oleracea* Mart.) juice. **Journal of Food Engineering**, v. 94, n. 3–4, p. 215–221, 2009.

TSIRONI, T. N.; TAOUKIS, P. S. Effect of storage temperature and osmotic pre-treatment with alternative solutes on the shelf-life of gilthead seabream (*Sparus aurata*) fillets. **Aquaculture and Fisheries**, v. 2, n. 1, p. 39–47, 2017.

VEGA-GÁLVEZ, A., LÓPEZ, J., MIRANDA, M., DI SCALA, K., YAGNAM, F., & URIBE, E. Mathematical modelling of moisture sorption isotherms and determination of isosteric heat of blueberry variety O'Neil. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 44, n. 10, p. 2033–2041, 2009.

VESTERGAARD, C.; ANDERSEN, B. L.; ADLER-NISSEN, J. Sodium diffusion in cured pork determined by ^{22}Na radiology. **Meat Science**, v. 76, n. 2, p. 258–265, 2007.

VIANA, K. W. C., OLIVEIRA, I. R. N. D., ROCHA, J. D. C. G., BARROS, F. A. R. D., & Stringheta, P. C. Study of adsorption isotherms and physicochemical characterization of natural food colourants. **Food Science and Technology**, v. 39, p. 74–80, 2019.

VIDAL, V. A., BIACHI, J. P., PAGLARINI, C. S., PINTON, M. B., CAMPAGNOL, P. C., ESMERINO, E. A., ... & POLLONIO, M. A. (2019). Reducing 50% sodium chloride in healthier jerked beef: An efficient design to ensure suitable stability, technological and sensory properties. **Meat Science**, 152, 49-57.

VIDAL, V. A., BERNARDINELLI, O. D., PAGLARINI, C. S., SABADINI, E., & POLLONIO, M. A. Understanding the effect of different chloride salts on the water behavior in the salted meat matrix along 180 days of shelf life. **Food Research International**, v. 125, 2019b.

VIDAL, V. A., SANTANA, J. B., PAGLARINI, C. S., DA SILVA, M. A., FREITAS, M. Q., ESMERINO, E. A., ... & POLLONIO, M. A. Adding lysine and yeast extract improves sensory properties of low sodium salted meat. **Meat Science**, v. 159, p. 107911, 2020.

YANG, W., SOKHANSANJ, S., CRERAR, W. J., & ROHANI, S. Size and shape related characteristics of alfalfa grind. **Canadian Agricultural Engineering**, 1996, 38.3: 201-206.

ZHANG, D., LI, H., WANG, Z., EMARA, A. M., & HE, Z. Effects of NaCl substitutes on physicochemical properties of salted pork. **Meat Science**, v. 169, p. 108205, 2020a.

ZHANG, D., LI, H., EMARA, A. M., WANG, Z., CHEN, X., & HE, Z. Study on the mechanism of KCl replacement of NaCl on the water retention of salted pork. **Food Chemistry**, v. 332, p. 127414, 2020b.

Capítulo II

Influence of temperature and chemical composition on water sorption isotherms for dry-cured ham

Betiol, L. F. L., Evangelista, R. R., Sanches, M. A. R., Basso, R. C., Gullón, B., Lorenzo, J. M., Barretto, A. C. S. & Romero, J. T. (2020). Influence of temperature and chemical composition on water sorption isotherms for dry-cured ham. **LWT – Food Science and Technology**, 123, 109112.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109112>

Artigo Original

Influence of temperature and chemical composition on water sorption isotherms for dry-cured ham

Lilian Fachin Leonardo Betiol^a, Rodrigo Rodrigues Evangelista^a, Marcio Augusto Ribeiro Sanches^a, Rodrigo Corrêa Basso^b, Beatriz Gullón^c, Jose M.Lorenzo^c, Andrea Carla da Silva Barretto^a, Javier Telis Romero^a

¹Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas (IBILCE), Universidade Estadual Paulista, Rua Cristóvão Colombo, 2265, Cep 15.054-000 São José do Rio Preto, SP, Brasil

²Universidade Federal de Alfenas – Unifal, Instituto de Ciência e Tecnologia, CEP 37715-400, Poços de Caldas-MG, Brasil

³Centro Tecnológico de la Carne de Galicia, Rúa Galicia Nº 4, Parque Tecnológico de 15 Galicia, San Cibrao das Viñas, 32900 Ourense, Spain

*Corresponding author. Tel: +34 988 548 277; fax: +34 988 548 276

E-mail address: jmlorenzo@ceteca.net; andrea.carla@unesp.br

Abstract

In this research, the sorption isotherms of seven brands of commercial dry-cured ham with different chemical composition were assessed simulating the conditions of storage at three temperatures. For this purpose, the dry-cured hams were chemically analyzed and their sorption isotherms were determined at 7, 17 and 27 °C through the static gravimetric method. The sorption isotherms corresponded to the characteristics of BET III type isotherm due to the high protein content and soluble compounds as salts present in the samples. The experimental data were fitted using GAB, Peleg, Oswin and Henderson models, being the GAB model the one which best described the isotherms of sorption since it presented the best adjustment ($R_{Adj}^2 \geq 0.999$ and $RMSE \leq 0.023$). The equilibrium moisture content of the dry-cured ham decreased with increasing temperature. The different chemical composition of the samples, mostly in terms of the sodium chloride content affected the moisture sorption isotherms. The results indicated that at a given water activity, equilibrium moisture content increased when the NaCl content increased at all temperatures evaluated.

Keywords

Mathematical modelling; Equilibrium moisture; Water activity; Sodium chloride content

2. Introduction

Dry-cured ham is greatly consumed by many countries, being highly appreciated by Mediterranean consumers due to its nutritional and sensorial and qualities (Coll-Brasas et al., 2019; Petričević, Marušić Radovčić, Lukić, Listeš, & Medić, 2018). Its process of production involves salting the back leg of the pig, followed by post-salting, drying and a long ripening period (Bermúdez, Franco, Carballo, Sentandreu, & Lorenzo, 2014; Pérez-Santaescolástica et al., 2019). During these stages, complex proteolysis and lipolysis reactions take place contributing to the development of sensory attributes of the final product (Toldrá, 2006). Therefore, the control of each stage is necessary to obtain a highly tasty and safe product (Pérez-Santaescolástica et al., 2019). For example, the temperature and relative humidity affects enzymatic and chemical processes that occur during the drying–ripening stages (Toldrá, 2006). The salt is a key ingredient in the manufacture of dry-cured ham since it is involved in proteolysis reactions, water-holding capacity (WHC) and organoleptic characteristics. The salt also decreases water activity (a_w) contributing to the stability of the final product (Pérez-Santaescolástica et al., 2019; Taormina, 2010). In general, the a_w of the dry-cured meats affects microbial growth and the activity of specific enzymes responsible for proteolytic reactions that contribute to the development of the characteristic texture, flavour and aroma of these products (Armenteros, Aristoy, Barat, & Toldrá, 2012; Toldrá, Aristoy, & Flores, 2000; Toldrá & Flores, 1998). However, water content alone does not allow to predict and evaluate the biochemical changes that occur during the manufacturing process of dry-cured meat products. For this reason, the understanding of the interactions between water and the components of the food matrix is a more suitable indicator to predict the microbial or physicochemical stability of this type of meat product (Clemente, Bon, Benedito, & Mulet, 2009). In this sense, the knowledge of water sorption characteristics is of interest as it provides information about the stability of food products. The sorption isotherms relate the a_w and its corresponding equilibrium moisture content (X_{eq}) of a food material at a given temperature (Freitas, Polachini, Souza, & Telis-Romero, 2016).

Various models have been proposed as part of attempts to explain mathematically the sorption isotherms of food products. The most widely reported models in the literature are GAB, Oswin, Henderson, Peleg, BET, Halsey, Caurie, and Lewicki. The GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) model was suggested by the European Project Cost 90 and has been widely applied for food. This model presents some advantages over the others since it provides information about the interactions between the sorbent-sorbate, as well as the multilayer-monolayer moisture. The empirical model developed by Peleg based on an equation of four-parameter provided a better suitability than the GAB model. Whereas, the Henderson model although it has been commonly used to represent the sorption isotherms of different food matrices, does not give precise information on the physical state of water (Aykın-Dinçer & Erbaş, 2018; Delgado and Sun, 2002).

The modelling of moisture sorption isotherms is fundamental for the design of drying operations, packaging, studies of shelf-life, and evaluating physicochemical alterations of dried foods during storage conditions (Aykın-Dinçer & Erbaş, 2018). Therefore, a good modelling strategy guarantees economic profitability and optimal quality of the final product (Clemente et al., 2009).

Several research papers have been reported on the sorption isotherms in function of the temperature of processed meat products, however few studies evaluated the simultaneous effect of temperature and chemical composition on the equilibrium sorption properties of dry-cured ham. At the sight of this situation, the goal of present research was to assess the influence of chemical composition on water sorption isotherms of seven brands of dry-cured ham at different storage temperatures. In addition, the experimental data were fitted to four adsorption isotherm models.

2. Material and methods

2.1. Sample preparation

Seven different samples of dry-cured ham imported from European countries (Spain, Italy and Portugal) were acquired from a local market in São Paulo (Brazil), and they were stored at 5 °C (± 2 °C) for the analysis. For each brand, five individual hams were purchase. Due to confidentially reasons, the name of the trademarks has been changed by codes. The five trademarks were coded as S1, S2, S3, S4, S5, S6 and S7. The samples were selected based on their different chemical composition.

2.2. Chemical composition

The chemical composition of each brand of dry-cured ham was done in five replicates according to the procedures recommended by Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2007). The moisture (method 950.46) was quantified by the gravimetric method, protein content (method 981.10) by micro-Kjeldahl, ash content (method 920.153) by incineration and lipid content was estimated using the method proposed by Bligh and Dyer (1959). The sodium content was analyzed by dry digestion according to Barretto, Polachini, Barretto, and Telis-Romero (2018).

2.3. Determination of the sorption isotherms

The static gravimetric method was employed to establish the water sorption isotherms of dry-cured ham samples at different temperatures (7, 17 and 27 °C) according to Ahmat, Bruneau, Kuitche, and Aregba (2014). Different saturated saline solutions were chosen to reach a relative humidity interval between 6.25% and 96.15% (Supplementary Table S1) (Freitas et al., 2016). The presence of a little fraction of undissolved salts on the bottom of flask guaranteed the saturation of the solution.

Dry-cured ham samples of approximately 1 g (± 0.1 mg) in triplicate were weighed in containers of 80 mL and they were placed into desiccators containing the different salt solutions. The desiccators were kept in a BOD chamber (TE-391, Tecnal, Piracicaba, Brazil) with control of temperature at 7, 17 and 27 °C to simulate the possible storage temperatures of this type of product. The samples were weighed using an analytical balance (AUY220, Shimadzu, Kyoto, Japan) with an accuracy of 0.1 mg, till attaining a constant weight (approximately 54 days at 7 °C, 44 days at 17 °C and 33 days at 27 °C). The equilibrium moisture content of each condition was measured through the difference in weight with respect to the initial moisture. The values of X_{eq} at each temperature against the a_w were plotted to obtain the sorption isotherms graphs for the dry-cured ham samples.

2.4. Modelling of sorption isotherms

Table 1 shows the four mathematical models (theoretical, empirical and semi-empirical) considered to describe the sorption isotherms. The adjustment of the experimental data to these mathematical models was carried out by applying nonlinear

regressions using the software OriginPro 8.0 (OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA).

Table 1 – Models used to fit sorption isotherm data from dry-cured ham.

Model	Equation	
GAB	$X_{eq} = \frac{X_m C k a_w}{(1 - k a_w)(1 + (C - 1) k a_w)}$	(1)
Peleg	$X_{eq} = k_1 a_w^{n_1} + k_2 a_w^{n_2}$	(2)
Oswin	$X_{eq} = M \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^N$	(3)
Henderson	$X_{eq} = \left(-\frac{1}{H_1} \ln(1 - a_w) \right)^{\frac{1}{H_2}}$	(4)

$C, k, k_1, n_1, k_2, n_2, M, N, H_1$ e H_2 are parameters of the mathematical models used, a_w is the water activity (relative humidity of salt solutions, decimal), X_{eq} is the equilibrium moisture content (dry basis) e X_m is the monolayer moisture content (dry basis).

2.5. Statistical analysis

The results of the chemical composition and the parameters of GAB model were presented as mean values $\pm$ standard error of 5 replicates. The data were analyzed using the generalized linear model (GLM) followed by Tukey's test using Statistica 7.0 software (Statsoft Inc., USA). The statistical tests were performed for a significance level of $p \leq 0.05$.

The goodness of fit of each model was assessed based on the coefficient of determination (R^2_{Adj}), Root Mean Squared Error (RMSE) and residual distribution. Values of R^2_{Adj} greater than 0.98 and RMSE close to zero suggest a high degree of correlation between the experimental and calculated values by the model.

The residual distribution enables to check the randomness between predicted values and the experimental data (Pagano & Mascheroni, 2005). The sample S1 was used to evaluate the residual distribution of the models studied since it presented the lowest R^2_{adj} and highest RMSE.

3. Results and discussion

3.1. Chemical composition

The results of the chemical composition of the dry-cured ham are listed in Table 2. There are many factors that contribute the nutritional and sensory attributes of dry-cured ham, including pig breed, animal production practices, animal age, as well as production methods (Jiménez-Colmenero, Ventanas, & Toldrá, 2010).

Table 2 – Chemical composition of seven different samples of dry-cured ham.

	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	SEM*	p Value
Protein (g/100g)	26.39 ^e	28.21 ^c	38.96 ^a	32.65 ^b	38.95 ^a	27.07 ^d	25.98 ^f	0.914	<0.01
Lipid (g/100g)	21.13 ^a	14.81 ^d	8.94 ^f	11.10 ^e	10.33 ^f	15.45 ^c	16.20 ^b	0.667	<0.01
Moisture (g/100g)	44.84 ^d	51.72 ^a	44.51 ^{de}	47.78 ^c	43.94 ^e	50.65 ^b	50.49 ^b	0.525	<0.01
Ash (g/100g)	5.30 ^{bc}	5.12 ^{bc}	5.78 ^a	5.81 ^a	4.54 ^d	5.51 ^{ab}	4.92 ^{cd}	0.080	<0.01
Sodium (mg/100g)	1994 ^d	2795 ^a	1646 ^f	1901 ^e	1641 ^f	2614 ^b	2386 ^c	0.073	<0.01

Means followed by the same letter in the same row did not show significant differences in the Tukey test ($p \leq 0.05$). * Standard error of mean.

The protein content of the different brands ranged from 25.98 to 38.95 g/100 g presenting significant differences for all samples except between S3 and S5. These differences can be attributed to the extent of drying and the fat content (Radovčić, Vidaček, Janči, & Medić, 2016). These values are consistent with those reported by Lorigo, Hort, Estévez, and Ventanas (2016) for Iberian dry-cured hams. Dry-cured ham contains proteins of high biological value and essential amino acids (Jiménez-Colmenero et al., 2010). Concerning the fat content, the values varied between 8.94 and 21.13 g/100 g. Several authors suggested that the fat content of dry-cured ham depending mainly on the pig breed and the feed type (Jiménez-Colmenero et al., 2010; Radovčić et al., 2016). For example, the fat percentage of Spanish Serrano dry-cured ham was 12% (Gilles, 2009), while San Daniele dry-cured ham presented a higher content (23%) (D'Evoli et al., 2009). It is important to highlight that the fat content is key for the development of the quality traits of cured hams since it affects attributes

such as the appearance, texture or flavor, determining the acceptability of these products by the consumer (Jiménez-Colmenero et al., 2010).

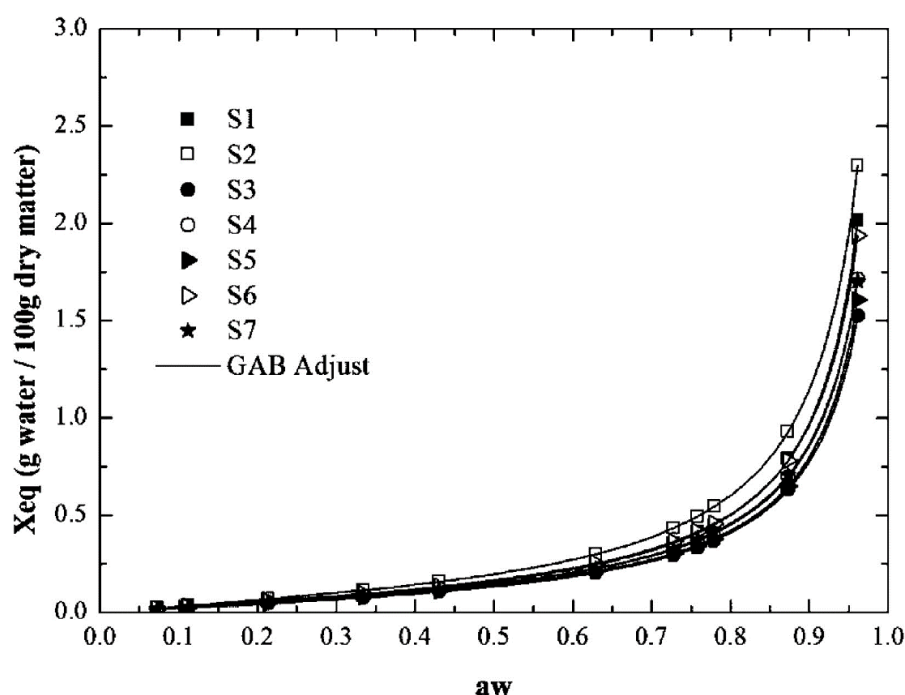
The moisture content ranged from 43.94 to 51.72 g/100 g with no significant differences between samples S6 and S7. Similar findings were reported by Radovčić et al. (2016) for Dalmatian smoked dry-cured hams and by Laureati et al. (2014) for Italian Parma, San Daniele and Toscano dry-cured hams. In contrast to these types of ham, Iberian dry-cured hams had a lower moisture content (36.68–38.60 g/100 g).

The sodium content ranged from 1641 to 2795 mg/100 g dry sample and it is in agreement with those reported by Armentero et al. (2012) and Lorigo et al. (2016). For the ash content, the results were between 4.54 and 5.81%, with significant statistical differences for all samples except for S3 and S4.

3.2. Sorption isotherms

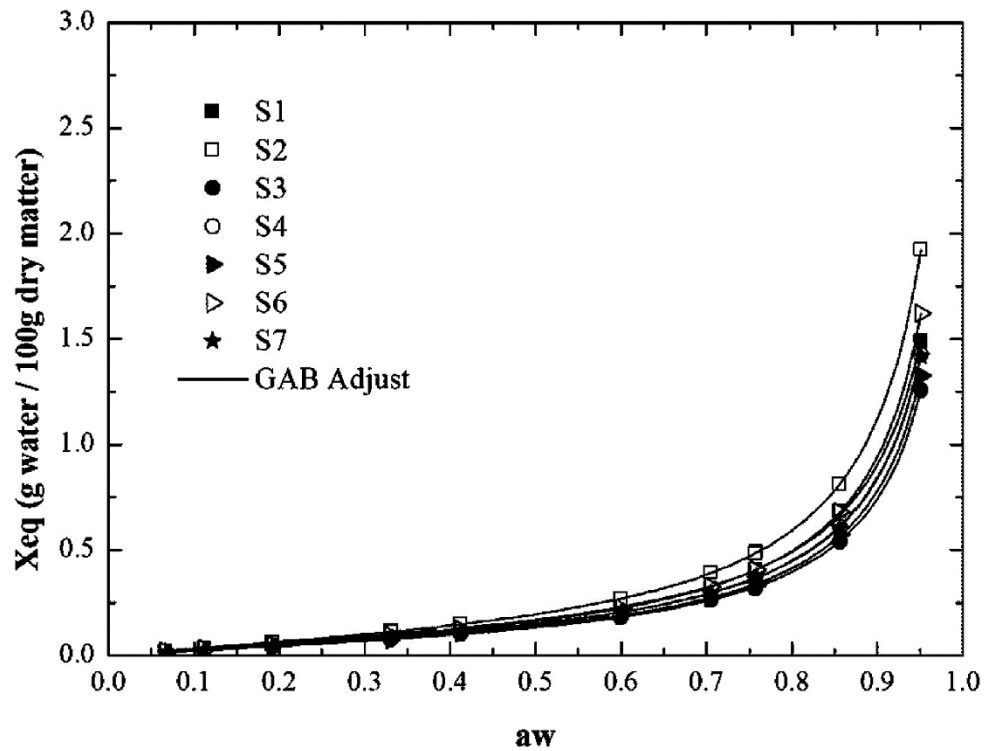
Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3 display the evolution in equilibrium humidity content of the seven samples of dry-cured ham as a function of water activity at three different temperatures (7, 17 and 27 °C) as fitted by GAB model. At a constant temperature, the results showed that X_{eq} increased with a_w , ranging from 0.013 to 2.30 g water/100 g dry matter.

Fig. 1. Sorption isotherms at 7 °C of seven samples of dry-cured ham fitted to the GAB model.



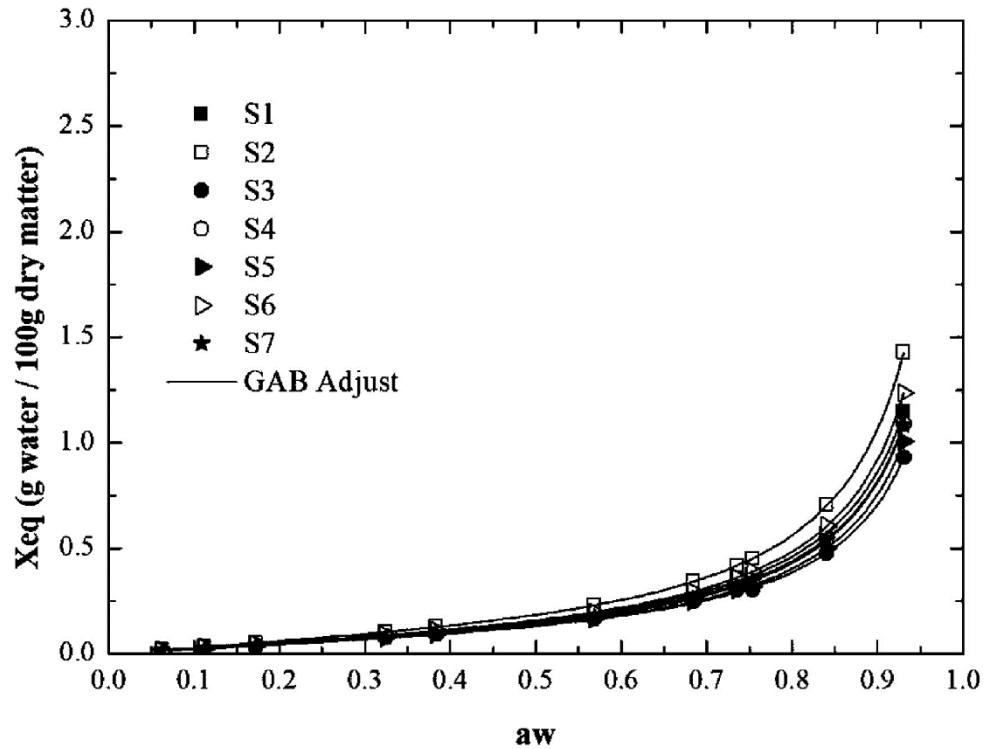
Fonte: elaborado pelo autor.

Fig. 2. Sorption isotherms at 17 °C of seven samples of dry-cured ham fitted to the GAB model.



Fonte: elaborado pelo autor

Fig. 3. Sorption isotherms at 27 °C of seven samples of dry-cured ham fitted to the GAB model.



Fonte: elaborado pelo autor

According to the classification of Brunauer, Deming, Deming, and Teller (1940) the sorption isotherms obtained correspond to the characteristics of BET III type isotherm, which is the typical isotherm of food products with high protein content or salts (Erbaş, Aykin, Arslan, & Durak, 2016). This kind of isotherms is commonly observed in many salted meat products like as pirarucu fillet (*Arapaima gigas*) (Martins, Martins, & Pena, 2015), tambaqui meat (*Colossoma macroparum*) (Molina-Filho, Pedro, Telis-Romero, & Romeiro Barboza, 2006), pork meat (Comaposada, Gou, & Arnau, 2000) and beef (Aykin-Dinçer & Erbaş, 2018).

At low and middle water activities (<0.75) a constant linear increase in X_{eq} was observed, however at high a_w values, equilibrium humidity content sharply increased. This behavior can be explained due to the NaCl below this a_w value is in crystallized form, absorbing little or no water. Above an a_w of 0.75 (its saturation point), water sorption increases rapidly for small increases in this parameter. This trend is reflected in the form of the isotherms that presented a breaking point around $a_w = 0.75$. The same observations were stated by Comaposada et al. (2000) and Kabil, Aktaş, and Balci (2012).

3.3. Effect of temperature on sorption isotherms of dry-cured ham

The shape of the sorption isotherms of dried meat products depends on several factors. Among these factors, the temperature has been widely reported to affect the characteristics of these curves (Comaposada et al., 2000). The influence of temperature on the sorption isotherms is key due to foodstuff are exposed to different temperatures during the manufacturing process and storage, besides the a_w varies with temperature (Al-Muhtaseb, McMinn, & Magee, 2002). Overall, the equilibrium moisture content of the samples decreased significantly as the absorption temperature increased at a given water activity. This tendency is explained by the increase in the mobility of water molecules with the increase in temperature, which results in a decrease of active water binding sites (Al-Muhtaseb et al., 2002; Cordeiro, Raghavan, & Oliveira, 2006; Kapsalis, 1987; Puri & Khamrui, 2015; Siripatrawan & Jantawat, 2006). On the other hand, the water binds to polar amino groups of proteins present in food via hydrogen bonding, favoring an increase in monolayer moisture (Barretto et al., 2018; Erbaş et al., 2016). However, an increase in the temperature reduces the formation of hydrogen bonds, resulting in a decrease in bound water (Ahmat et al., 2014; Erbaş et al., 2016). These findings are consistent with results that have been

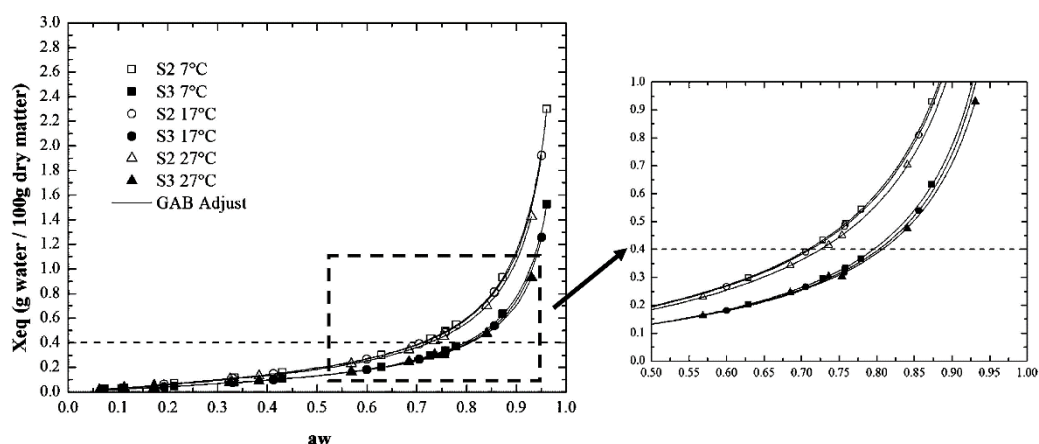
observed by other authors, mainly for high-protein foods (Barretto et al., 2018; Clemente et al., 2009; Singh, Rao, Anjaneyulu, & Patil, 2006).

3.4. Effect of chemical composition on sorption isotherms of dry-cured ham

In addition to the effect of temperature, the sorption isotherms also depend on the composition and presence of solutes like salts. The role of NaCl on sorption isotherms of meat products has been reported by some authors who observed a linear relationship between a_w and NaCl content in the aqueous phase of meat (Demeyer (1979); Palmia (1982), Mujica, Martinez, Bercovich, Bonino, and Alzamora (1989). In the present work, the influence of NaCl content on sorption isotherms of dry-cured ham has also been considered.

Fig. 4 shows the sorption isotherms of two samples (S2 and S3) with different sodium content the temperatures evaluated. The results indicated that at a given water activity, X_{eq} increased when the NaCl content increased, at all temperatures evaluated. The salt in solution gives rise Na^+ and Cl^- increasing the cohesive interactions between water and these ions; these linkages decrease the vapour pressure of water explaining the effect on NaCl content on the X_{eq} (Aykın-Dinçer & Erbaş, 2018). This behavior involves that in the presence of salt, for the same water vapour pressure, it is necessary a high water content in the foodstuff to achieve a high X_{eq} with the same a_w .

Fig. 4. Sorption isotherms of samples S2 and S3 of dry-cured ham in different temperatures.



Fonte: elaborado pelo autor.

A similar effect of NaCl on equilibrium moisture content has been found by Comaposada et al. (2000) in pork meat experiments. More recently, Ayk n-Dinçer and Erba  (2018) investigated the influence of different NaCl percentages (0, 5, 10, 15 and 20%) on the drying kinetics and adsorption isotherms of beef slices. The authors found that the duration of the drying stage was shorter when the salt content was higher. This result can be directly related to a greater loss of water and greater protein denaturation of the meat product as the salt concentration in the drying process increases. Therefore, the denaturation of the proteins and the WHC may have been reduced.

Salt is an essential ingredient in the elaboration of dry-cured ham since it delays the microbial growth through the reduction of *a_w*, controls the action of enzymes, facilitates the solubilization of proteins, increases water-holding capacity, contributes to salty taste and enhances product texture (Andr s, Cava, Ventanas, Muriel, & Ruiz, 2004; Toldrá & Flores, 1998). However, the salt used may have a pro-oxidant effect in this type of products. The NaCl promotes the oxidation reactions since it disrupts the structural integrity of membranes enabling the access of oxidizing agents to lipid substrates, reduces the activity of antioxidant enzymes and is involved in the formation of hypervalent ferrylmyoglobin which promotes the protein carbonylation (Soladoye, Juárez, Aalhus, Shand, & Estévez, 2015; Souza et al., 2013).

In addition to the role of NaCl on the equilibrium sorption properties, the chemical composition in terms of protein and fat content also affect the features of sorption isotherms of dry-cured ham samples. Based on the results presented we observed that for those samples with similar sodium content (S1 and S4) but with a different chemical composition, the equilibrium moisture content increased with decreasing protein content and increasing fat content, being this behavior more pronounced at 7  C. Our findings are contrary to those found in the literature. Several authors highlighted that the protein content positively affected the sorption values, due to the great capacity of the water to bind to the polar groups of the proteins (Erba  et al., 2016). Our results could be attributed to different alterations that may suffer the proteins of cured ham like denaturation, crosslinking and interaction of native or denaturated proteins with lipids during the salting and drying processes. These alterations could lead to a decrease of available polar groups for water binding in dry-cured ham samples (Akta ; Gürses, 2005).

During the drying stage of meat products, the relative humidity of the air normally varies between 60 and 80% and the water activity around 0.75. This leads to an

important reduction in water content on the surface of the product, with a small decrease in the relative humidity of the air. In products such as dry-cured ham, this decrease is more pronounced after the salting, since the salt amount on the surface of the product is maximum, which could result in the salt crystallization when the a_w is below 0.75 (Comaposada et al., 2000).

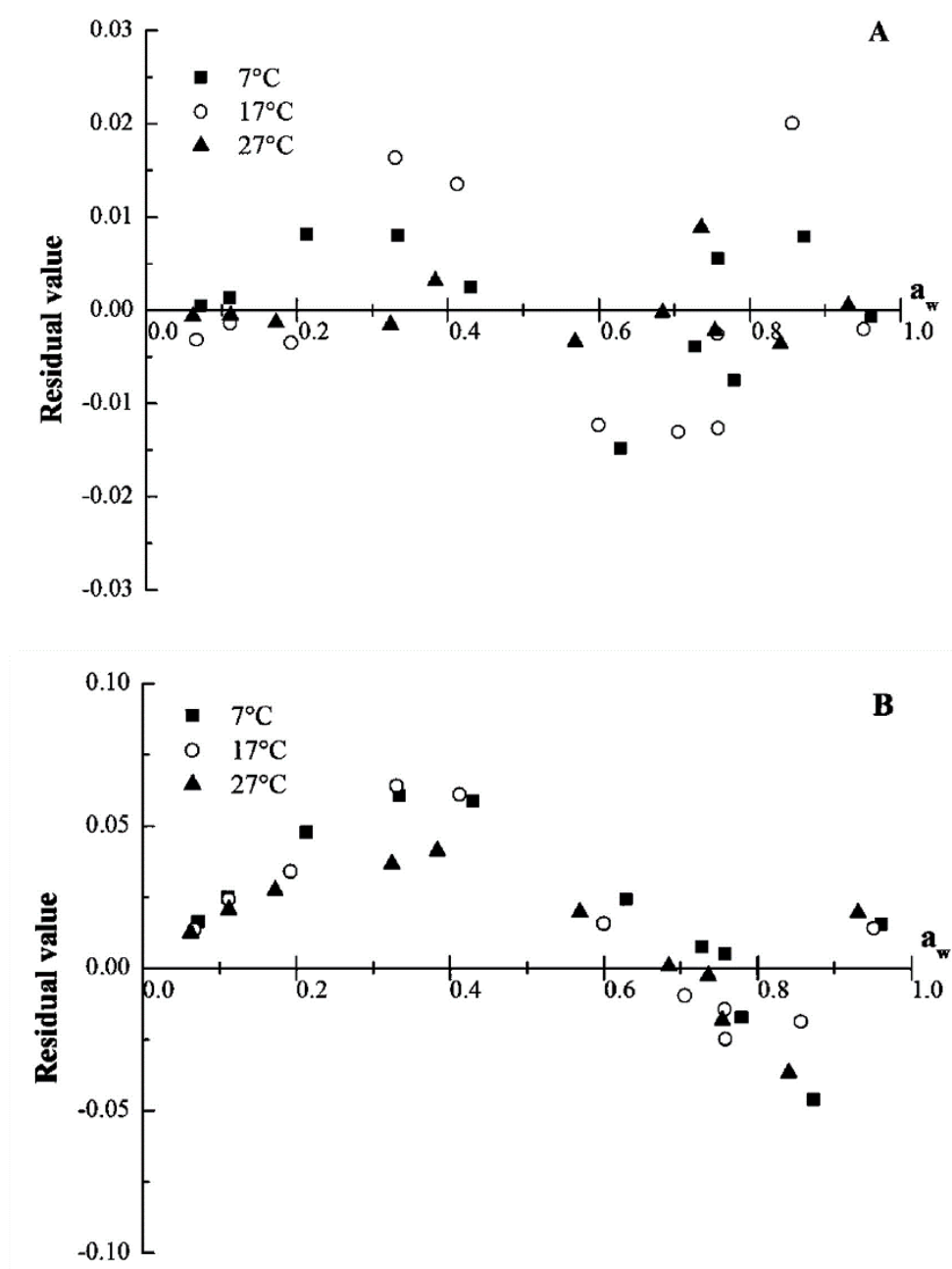
It is important to highlight that both the microbiological quality and the sensory attributes of dry-cured meat products are considerably influenced by water activity and water content (Aykın-Dinçer & Erbaş, 2018). Taking into account the above, the knowledge of the equilibrium moisture at different levels of water activity is key to the proper design of the drying process, transport, storage conditions and prediction of the shelf-life of the dry-cured ham.

3. Modelling of sorption isotherms of dry-cured ham

The experimental moisture sorption data of the dry-cured ham samples at 7, 17 and 27 °C were fitted to four adsorption isotherm models (see equations 1-4 in Table 1) using nonlinear regression analysis. Based on the adjustment parameters, all models successfully described the sorption isotherms, presenting R^2_{Adj} values above 0.992 and RSME values below 0.0432. The GAB model showed the best fit for whatever the temperature considered, followed in order, by Peleg, Oswin and Henderson models. Table 3 displays the values of estimated GAB model parameters for each sample at the three temperatures evaluated, as well as the statistical parameters that indicate the goodness of fit of the sorption data.

Fig. 5 depicts the residual graph of the GAB (A) and Henderson (B) models for the sample S1 that presented the lowest R^2_{Adj} and highest RSME values. The residual distribution for the GAB model varied from -0.015 and 0.020, while for the Henderson model the residual values ranged from -0.046 and 0.064, indicating that the GAB model represents more accurately the mechanism of the sorption isotherms in comparison with the Henderson model.

Fig. 5. Residual plot distributions of modelling isotherms for: (A) GAB equation at all temperatures referring to sample S1; (B) Henderson equation at all temperatures referring to sample S1.



Fonte: elaborado pelo autor.

Table 3. Fitting parameters of the GAB model for all dry-cured ham samples at different temperatures.

Temperature (°C)	<i>X_m</i>								
	Samples							² p Value	³ SEM
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇		
7	0.12486 ^B	0.15040 ^A	0.10448 ^C	0.11246 ^{BC}	0.10430 ^C	0.12619 ^B	0.11714 ^{BC}	< 0.001	0.003
17	0.12425 ^B	0.14817 ^A	0.09894 ^E	0.11306 ^{CD}	0.10397 ^{DE}	0.12322 ^{BC}	0.11244 ^{CD}	< 0.001	0.003
27	0.11701 ^{BC}	0.14077 ^A	0.09950 ^C	0.11143 ^{BC}	0.10141 ^C	0.12104 ^B	0.10960 ^{BC}	< 0.001	0.003
¹ p Value	0.226	0.373	0.345	0.936	0.764	0.59	0.094		
<i>C</i>									
7	1.95666	2.12964	1.98165	2.17898	2.22788	2.16920	1.93114	0.319	0.042
17	2.46081	2.18734	2.32363	2.22755	2.20519	2.16765	2.23331	0.290	0.035
27	2.19887	2.20085	2.38196	2.19864	2.29353	2.14463	2.02086	0.844	0.059
¹ p Value	0.063	0.943	0.184	0.931	0.918	0.987	0.121		
<i>k</i>									
7	0.97763 ^a	0.97407	0.97118	0.97386	0.97446	0.97435	0.97103	0.451	0.001
17	0.96692 ^b	0.97328	0.97153	0.97102	0.97193	0.97435	0.97112	0.414	0.001
27	0.96961 ^{ab}	0.97347	0.96477	0.96953	0.97115	0.9739	0.97109	0.172	0.001
¹ p Value	0.029	0.974	0.059	0.545	0.590	0.988	0.999		

^{1, 2} Different upper-case letters in the same row and different lower-case letters in the same column indicate significant differences according to Analysis of Variance and post-hoc Tukey's test ($\alpha = 0.05$).

³ SEM: standard error of mean.

According to several authors, the GAB model is the most appropriate to describe the sorption isotherms of meat and meat products (Ahmat et al., 2014; Barretto et al., 2018; Barretto et al., 2018; Clemente et al., 2009; Lopes Filho, Romanelli, Barboza, Gabas, & Telis-Romero, 2002; Polachini, Betiol, Lopes-Filho, & Telis-Romero, 2016; Trujillo, Yeow, & Pham, 2003).

The main advantage of this model theoretical over empiric and semi-empiric models is the fact that their parameters have physical meaning (Staudt, Tessaro, Marczak, Soares, & Cardozo, 2013; Telis, Gabas, Menegalli, & Telis-Romero, 2000). Another interesting feature is that the GAB equation includes the concept of the monolayer moisture content (X_m) which provides information about the water state in the product (Staudt et al., 2013). This parameter is of particular importance because it is related to the stability of the foodstuffs during their processing and storage (Yan et al., 2012).

As shown in Table 3, the X_m values calculated by the GAB model presented a tendency to decrease with increasing temperature. This behavior can be explained by the reduction in the number of active sites as consequence of temperature-induced physicochemical changes. According to Blahovec (2004), the values of constants (C and k) obtained from the GAB equation correspond with type III isotherms from Brunauer classification.

Overall, the values of X_m , C and k obtained in this work are similar to those found by other authors for different food products (Ahmat et al., 2014; Delgado & Sun, 2002; Freitas et al., 2016; Polachini et al., 2016).

4. Conclusion

The sorption isotherms of the dry-cured ham samples exhibited features of type III isotherms. Among the sorption models evaluated, GAB model was the more suitable describing experimental sorption data at different temperatures of storage. The sorption capacity of dry-cured ham samples was temperature-dependent, observing a decrease in equilibrium moisture content as the temperature increases. Moreover, the NaCl content also affected significantly the sorption isotherms.

Acknowledgements

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001. Jose M. Lorenzo is member of the HealthyMeat network, funded by CYTED (ref. 119RT0568).

References

- Ahmat, T., Bruneau, D., Kuitche, A., & Aregba, A. W. (2014). Desorption isotherms for fresh beef: An experimental and modeling approach. **Meat Science**, 96(4), 1417–1424. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2013.12.009>
- Aktaş, N., & Gürses, A. (2005). Moisture adsorption properties and adsorption isosteric heat of dehydrated slices of Pastirma (Turkish dry meat product). **Meat science**, 71(3), 571-576. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.04.042>
- Al-Muhtaseb, A. H., McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (2002). Moisture Sorption Isotherm Characteristics of Food Products: A Review. **Food and Bioproducts Processing**, 80(2), 118–128. <https://doi.org/10.1205/09603080252938753>
- Andrés, A. I., Cava, R., Ventanas, J., Muriel, E., & Ruiz, J. (2004). Lipid oxidative changes throughout the ripening of dry-cured Iberian hams with different salt contents and processing conditions. **Food Chemistry**, 84(3), 375–381. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(03\)00243-7](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(03)00243-7)
- Armenteros, Mónica, Aristoy, M.-C., Barat, J. M., & Toldrá, F. (2012). Biochemical and sensory changes in dry-cured ham salted with partial replacements of NaCl by other chloride salts. **Meat Science**, 90(2), 361–367. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2011.07.023>
- AOAC. (2005). **Association of Official Analytical Chemistry** (18th ed.). Gaithersburg.
- Aykin-Dinçer, E., & Erbaş, M. (2018). Drying kinetics, adsorption isotherms and quality characteristics of vacuum-dried beef slices with different salt contents. **Meat Science**, 145(June), 114–120. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.06.007>

Barretto, T. L., Polachini, T. C., Barretto, A. C. da S., & Telis-Romero, J. (2018). Water sorption isotherms of cooked hams as affected by temperature and chemical composition. **Food Science and Technology**.

<https://doi.org/10.1590/fst.04218>

Bermúdez, R., Franco, D., Carballo, J., Sentandreu, M. Á., & Lorenzo, J. M. (2014). Influence of muscle type on the evolution of free amino acids and sarcoplasmic and myofibrillar proteins through the manufacturing process of Celta dry-cured ham. **Food Research International**, 56, 226-235.

Blahovec, Jiří. (2004). Sorption isotherms in materials of biological origin mathematical and physical approach. **Journal of Food Engineering**, 65(4), 489–495. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2004.02.012>

Bligh, E. G., & Dyer, W. J. (1959). A rapid method of total lipid extraction and purification. **Canadian Journal of Biochemistry and Physiology**, 37(8), 911–917.

Brunauer, S., Deming, L. S., Deming, W. E., & Teller, E. (1940). On the theory of the van der Waals adsorption of gases. **Journal of the American Chemical Society**, 62(7), 1723–1732.

Clemente, G., Bon, J., Benedito, J., & Mulet, A. (2009). Desorption isotherms and isosteric heat of desorption of previously frozen raw pork meat. **Meat Science**, 82(4), 413–418. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2009.02.020>

Coll-Brasas, E., Arnau, J., Gou, P., Lorenzo, J. M., García-Pérez, J. V., & Fulladosa, E. (2019). Effect of high-pressure processing temperature on dry-cured hams with different textural characteristics. **Meat Science**, 152, 127–133. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2019.02.014>

Comaposada, J., Gou, P., & Arnau, J. (2000). The effect of sodium chloride content and temperature on pork meat isotherms. **Meat Science**, 55(3), 291–295. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(99\)00154-0](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(99)00154-0)

Cordeiro, D. S., Raghavan, G. S. V., & Oliveira, W. P. (2006). Equilibrium Moisture Content Models for Maytenus ilicifolia Leaves. **Biosystems Engineering**, 94(2), 221–228.

<https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2006.03.004>

Delgado, A. E., & Sun, D. W. (2002). Desorption isotherms for cooked and cured beef and pork. **Journal of food engineering**, 51(2), 163-170.
[https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00053-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00053-X)

Demeyer, D. (1979). Comparison between calculated and measured values of water activity in dry sausage. **Fleischwirtschaft**, 59, 973–974.

D'Evoli, L., Lucarini, M., Nicoli, S., Aguzzi, A., Gabrielli, P., & Lombardi-Boccia, G. (2009, May). **Nutritional profile of traditional Italian hams**. In Proceeding of 5th world congress of dry-cured ham, Aracena, Spain (Vol. 8).

Erbaş, M., Aykin, E., Arslan, S., & Durak, A. N. (2016). Adsorption behaviour of bulgur. **Food Chemistry**, 195, 87–90.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.06.050>

Freitas, M. L. F., Polachini, T. C., de Souza, A. C., & Telis-Romero, J. (2016). Sorption isotherms and thermodynamic properties of grated P armesan cheese. **International Journal of Food Science & Technology**, 51(1), 250-259.

Gilles, G. (2009). Dry cured ham quality as related to lipid quality of raw material and lipid changes during processing: a review. **Grasas y aceites**, 60(3), 297-307.

Jiménez-Colmenero, F., Ventanas, J., & Toldra, F. (2010). Nutritional composition of dry-cured ham and its role in a healthy diet. **Meat Science**, 84(4), 585-593.

Kabil, E., Aktaş, N., & Balcı, E. (2012). Effect of sodium chloride, sodium nitrite and temperature on desorption isotherms of previously frozen beef. **Meat science**, 90(4), 932-938.

Kapsalis, J. G. (2017). **Influences of hysteresis and temperature on moisture sorption isotherms**. In Water activity: theory and applications to food (pp. 173-213). Routledge.

Laureati, M., Buratti, S., Giovanelli, G., Corazzin, M., Fiego, D. P. L., & Pagliarini, E. (2014). Characterization and differentiation of Italian Parma, San Daniele and Toscano dry-cured hams: a multi-disciplinary approach. **Meat Science**, 96(1), 288-294.

Lopes Filho, J. F., Romanelli, P. F., Barboza, S. H. R., Gabas, A. L., & Telis-Romero, J. (2002). Sorption isotherms of alligator's meat (*Caiman crocodilus yacare*). **Journal of Food Engineering**, 52(2), 201–206. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00105-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00105-4)

Lorido, L., Pizarro, E., Estévez, M., & Ventanas, S. (2019). Emotional responses to the consumption of dry-cured hams by Spanish consumers: A temporal approach. **Meat Science**, 149, 126–133.

<https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2018.11.015>

Martins, M. G., Martins, D. E. G., & Pena, R. da S. (2015). Drying kinetics and hygroscopic behavior of pirarucu (*Arapaima gigas*) fillet with different salt contents. **LWT – Food Science and Technology**, 62(1), 144–151. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.01.010>

Molina-Filho, L., M. Pedro, M. A., Telis-Romero, J., & Romeiro Barboza, S. H. (2006). Influência da temperatura e da concentração do cloreto de sódio (NaCl) nas isothermas de sorção da carne de tambaqui (*Colossoma Macroparum*). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, 26(2), 453–458.

Mujica, F. J., Martinez, E. J., Bercovich, F. C., Bonino, N. B., & Alzamora, S. M. (1989). Sorption properties of dry cured ham. **LWT – Food Science and Technology**, 22, 89–92.

Pagano, A. M., & Mascheroni, R. H. (2005). Sorption isotherms for amaranth grains. **Journal of Food Engineering**, 67(4), 441–450. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2004.05.012>

Palmia, F. (1982). **Determinazione dell'attività Á dell'acqua (Aw) di prosciutti crudi stagionati in funzione del contenuto di acqua e sale**. *Industria Conserve*, 57, 69–72.

Pérez-Santaescolástica, C., Fraeye, I., Barba, F. J., Gómez, B., Tomasevic, I., Romero, A., ... Lorenzo, J. M. (2019). Application of non-invasive technologies in dry-cured ham: An overview. **Trends in Food Science & Technology**, 86, 360–374. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2019.02.011>

Petričević, S., Marušić Radovčić, N., Lukić, K., Listeš, E., & Medić, H. (2018). Differentiation of dry-cured hams from different processing methods by means of volatile compounds, physico-chemical and sensory analysis. **Meat Science**, 137, 217–227. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2017.12.001>

Polachini, T. C., Betiol, L. F. L., Lopes-Filho, J. F., & Telis-Romero, J. (2016). Water adsorption isotherms and thermodynamic properties of cassava bagasse. **Thermochimica Acta**, 632, 79–85. <https://doi.org/10.1016/J.TCA.2016.03.032>

Puri, R., & Khamrui, K. (2016). Effect of Temperature on Sorption Isotherms and Thermodynamics of Intermediate Moisture Category Indian Milk Product Cham-cham. **Journal of Food Processing and Preservation**, 40(5), 999-1009.

Radovčić, N. M., Vidaček, S., Janči, T., & Medić, H. (2016). Characterization of volatile compounds, physico-chemical and sensory characteristics of smoked dry-cured ham. **Journal of food science and technology**, 53(11), 4093-4105.

Singh, R. R. B., Rao, K. H., Anjaneyulu, A. S. R., & Patil, G. R. (2006). Water desorption characteristics of raw goat meat: Effect of temperature. **Journal of Food Engineering**, 75(2), 228–236.
<https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2005.04.013>

Siripatrawan, U., & Jantawat, P. (2006). Determination of Moisture Sorption Isotherms of Jasmine Rice Crackers Using BET and GAB Models. **Food Science and Technology International**, 12(6), 459–465.
<https://doi.org/10.1177/1082013206072622>

Soladoye, O. P., Juárez, M. L., Aalhus, J. L., Shand, P., & Estévez, M. (2015). Protein Oxidation in Processed Meat: Mechanisms and Potential Implications on Human Health. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 14(2), 106–122. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12127>

Souza, M. A. A., Visentainer, J. V., Carvalho, R. H., Garcia, F., Ida, E. I., & Shimokomaki, M. (2013). Lipid and protein oxidation in charqui meat and jerked beef. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, 56(1), 107–112.
<https://doi.org/10.1590/S1516-89132013000100014>

Staudt, P. B., Tessaro, I. C., Marczak, L. D. F., Soares, R. de P., & Cardozo, N. S. M. (2013). A new method for predicting sorption isotherms at different temperatures: Extension to the GAB model. **Journal of Food Engineering**, 118(3), 247–255. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2013.04.013>

Taormina, P. J. (2010). Implications of Salt and Sodium Reduction on Microbial Food Safety. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, 50(3), 209–227. <https://doi.org/10.1080/10408391003626207>

Telis, V. R. N., Gabas, A. L., Menegalli, F. C., & Telis-Romero, J. (2000). Water sorption thermodynamic properties applied to persimmon skin and pulp. **Thermochimica Acta**, 343(1–2), 49–56. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(99\)00379-2](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(99)00379-2)

Toldrá, F. (2006). The role of muscle enzymes in dry-cured meat products with different drying conditions. **Trends in Food Science & Technology**, 17(4), 164–168.

Toldrá, F., Aristoy, M.-C., & Flores, M. (2000). Contribution of muscle aminopeptidases to flavor development in dry-cured ham. **Food Research International**, 33(3–4), 181–185. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(00\)00032-6](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(00)00032-6)

Toldrá, F., & Flores, M. (1998). The Role of Muscle Proteases and Lipases in Flavor Development During the Processing of Dry-Cured Ham. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, 38(4), 331–352. <https://doi.org/10.1080/10408699891274237>

Trujillo, F. J., Yeow, P. C., & Pham, Q. T. (2003). Moisture sorption isotherm of fresh lean beef and external beef fat. **Journal of Food Engineering**, 60(4), 357–366. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00058-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00058-X)

Yan, H., Cai, B., Cheng, Y., Guo, G., Li, D., Yao, X., ... & Jiang, F. (2012). Mechanism of lowering water activity of konjac glucomannan and its derivatives. **Food Hydrocolloids**, 26(2), 383–388.

CAPÍTULO III

Difusão de sais de cloreto na salga úmida de carne suína: um estudo sobre os sais substitutos do NaCl

Betiol, L. F. L.; Sanches, M. A. R.; Laurindo, J. B.; Telis-Romero, J.

Manuscrito a ser submetido ao Periódico “International Journal of Heat and Mass Transfer” ISSN: 0017-9310 (Será elaborada uma versão em inglês para submissão ao periódico).

Difusão de sais de cloreto na salga úmida de carne suína: um estudo sobre os sais substitutos do NaCl

Lilian Fachin Leonardo Betiol ^{a, b}, Marcio Augusto Ribeiro Sanches ^a, João Borges Laurindo ^c, Javier Telis-Romero ^{a*}

^a State University of São Paulo – UNESP, Institute of Biosciences, Humanities and Exacts Sciences – IBILCE, Campus São José do Rio Preto, Food Engineering and Technology Department – Cristovão Colombo St. 2265, Zip Code 15.054-000 São José do Rio Preto, São Paulo, Brazil

^b JBS – Friboi, Av. Central S/N, Barretos, São Paulo, Brazil

^c Department of Chemical and Food Engineering, Federal University of Santa Catarina – UFSC, 88040-900, Florianópolis, SC, Brazil

*Autor a quem a correspondência pode ser endereçada. E-mail: javier.romero@unesp.br (Javier Telis Romero).

RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi estudar a cinética de difusão do cloreto de potássio (KCl), cloreto de cálcio (CaCl_2), cloreto de magnésio (MgCl_2) e cloreto de sódio (NaCl) durante a salga úmida de carne suína, até condições de equilíbrio. Para isso, filés de alcatra suína foram submetidos à salga úmida em salmouras saturadas de: NaCl; KCl; MgCl_2 ; CaCl_2 , em duas temperaturas (1 e 15 °C). Três modelos foram usados para simular a perda de água (PA) e o ganho de sal (GS) durante a salga úmida de carne suína até condições de equilíbrio: dois empíricos (Peleg e Weibull) e um teórico (difusional). Durante a salga úmida, o conteúdo de água da carne diminuiu enquanto o conteúdo de sal aumentou. O aumento da temperatura de processo aumentou a PA, o GS e os coeficientes de difusão de água e de sal na carne de suína. O modelo Weibull conseguiu prever mais satisfatoriamente as taxas de PA e GS até as condições de equilíbrio. Os modelos de Peleg e Weibull apresentaram maiores taxas de PA e GS para o KCl, quando comparado aos outros sais estudados. O modelo de Fick apresentou maiores coeficientes de difusão de água e de sal para o KCl. Além disso, o CaCl e MgCl causaram um maior GS em condições de equilíbrio, quando comparados ao NaCl e o KCl. Esses achados podem ajudar a indústria da carne a melhorar o gerenciamento do processo de salga úmida usando diferentes sais com o objetivo de desenvolver produtos cárneos com teor de sódio reduzido.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem; Transferência de massa; Cloreto de potássio; Cloreto de magnésio; Cloreto de cálcio.

5. INTRODUÇÃO

A salga é um dos métodos mais antigos usados para conservação de alimentos. Ela é uma das principais etapas envolvidas no preparo de carnes e produtos cárneos salgados (Bampi et al., 2016; Sanches et al., 2021; Sanches et al., 2020), visando obter produtos com características sensoriais específicas (Liu et al., 2014; Vidal et al., 2020), aumentar a vida útil do produto e a segurança dos alimentos (Delgado-Pando et al., 2018; Inguglia et al., 2017).

O cloreto de sódio (NaCl) é um ingrediente que afeta a capacidade de retenção de água, aumenta a força iônica, a estabilidade microbiológica, podendo afetar a textura, reduz a atividade de água e promove o gosto salgado na carne e em produtos cárneos (Delgado-Pando et al., 2018; Desmond, 2006). Entretanto, o excesso de sódio pode aumentar o risco de algumas doenças crônicas não transmissíveis como a pressão arterial, podendo levar a mortalidade cardiovascular, câncer gástrico e doença renal (Doyle & Glass, 2010; He & MacGregor, 2010). Assim, reduzir o teor de sódio na produção de alimentos tornou-se uma tendência em ciência e tecnologia de alimentos (Inguglia et al., 2017), o que impulsionou as pesquisas por diferentes estratégias e por substitutos do NaCl para desenvolver produtos com teor de sódio reduzido (Barretto et al., 2018, 2020; Vidal et al., 2020; Vidal et al., 2019).

As propriedades tecnológicas e de qualidade dos produtos cárneos salgados são afetadas por diferentes sais, considerados como substitutos do NaCl. Em um estudo recente, Zhang et al. (2020) avaliou a substituição de NaCl por KCl na retenção de água em carne suína salgada. Os autores relataram que a substituição parcial do NaCl por KCl promoveu a oxidação e a degradação de proteínas da carne e que essas mudanças nas proteínas relaxaram a estrutura da fibra muscular, influenciaram a distribuição e o estado da água, a microestrutura, e as propriedades físico-químicas da carne suína salgada. Essas modificações relatadas por Zhang et al. (2020) podem apoiar a hipótese deste estudo de que a velocidade do processo de transferência de massa de diferentes sais como o cloreto de potássio (KCl), cloreto de cálcio (CaCl_2) e cloreto de magnésio (MgCl_2) podem ser diferentes, quando comparados ao cloreto de sódio (NaCl).

Uma maneira de estudar os processos que envolvem transferência de massa é usando modelos matemáticos, que podem prever o processo, explicar os dados observados e simular o comportamento desses dados em diferentes condições (Assis et al., 2016; Gómez et al., 2015; Mulet, 1994). O modelo difusivo é frequentemente utilizado (Dimakopoulou-Papazoglou & Katsanidis, 2019; Kang et al., 2016) para fornecer os coeficientes de difusão de água e de sal. Entretanto, para geometrias não clássicas, a solução analítica deste modelo requer o uso de técnicas numéricas (Schmidt et al., 2009), tornando o problema não trivial. Desta forma, o uso de modelos empíricos é de grande interesse para cientistas e engenheiros. Modelos empíricos simples como o modelo de Peleg (1988), modelo de Azuara (1992) e modelo Weibull (1951), que não possuem restrições geométricas para sua aplicação foram amplamente usados e considerados viáveis para descrever os fenômenos de transferência de massa durante a salga de carnes (Alamatian et al., 2019; Aykın-Dinçer, 2021; Schmidt et al., 2009).

A novidade do presente estudo é a avaliação do comportamento difusivo do cloreto de potássio (KCl), cloreto de cálcio (CaCl_2), cloreto de magnésio (MgCl_2) e cloreto de sódio (NaCl) durante a salga úmida de carne suína até condições de equilíbrio. Como mencionado anteriormente, devido ao aumento do interesse sobre a redução do NaCl em produtos cárneos (Stollewerk et al., 2012), é importante conhecer o comportamento dos diferentes sais isoladamente durante o processo de salga úmida, para melhor compreender o processo de difusão de uma mistura de sais. Portanto, o objetivo deste estudo foi estudar a cinética de difusão do KCl, CaCl_2 , MgCl_2 e do NaCl durante a salga úmida de carne suína usando soluções saturadas em diferentes temperaturas de processo, até condições de equilíbrio.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Matéria-prima

Cortes de alcatra suína (*Semimembranosus*) (68,14% umidade, 21,29% proteína, 8,79% gordura e 1,01% de cinzas) foram adquiridos no comércio local de São José do Rio Preto – SP. Para minimizar a heterogeneidade da matéria prima, os cortes de carne foram selecionados usando o critério dos valores de pH entre 5,4 a 5,8. A matéria-prima congelada ($-18\text{ }^{\circ}\text{C}$) foi transportada em gelo seco até o Laboratório de Engenharia de Processos da Universidade Estadual Paulista “Júlio de

Mesquita Filho” (São José do Rio Preto – São Paulo, Brasil), sendo mantidas congeladas à temperatura de -18 ± 1 °C, até a realização dos experimentos.

2.2. Preparo das amostras e da salmoura

As amostras foram descongeladas lentamente durante 24 horas antes dos experimentos à 4°C em uma câmara refrigerada. Após, foram cortadas em formato de placa (8,2 cm de comprimento, 8,2 cm de largura e 1,0 cm de espessura). A gordura subcutânea e tecido conjuntivo foram removidos antes da etapa de salga úmida.

Os solutos empregados para a preparação das salmouras foram: Cloreto de sódio – NaCl, Cloreto de potássio – KCl, Cloreto de magnésio – $MgCl_2$ e Cloreto de cálcio – $CaCl_2$. Todos os solutos utilizados eram de grau analítico (Vetec, Brasil). Quatro tratamentos foram realizados: T1 – NaCl: Salmoura saturada de cloreto de sódio; T2 – KCl: Salmoura saturada de cloreto de potássio; T3 – $MgCl_2$: Salmoura saturada de cloreto de magnésio; T4 – $CaCl_2$: Salmoura saturada de cloreto de cálcio.

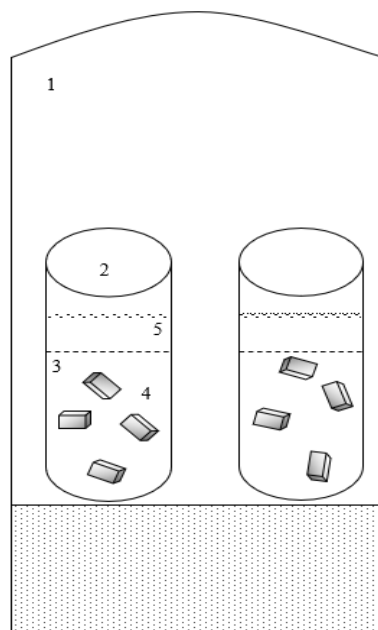
As soluções saturadas utilizadas nos quatro tratamentos foram preparadas com base nos dados de solubilidade de cada soluto de acordo com Alves-Junior et al. (2021). Os solutos foram pesados em balança analítica com precisão de 0,01 g (AUX220, Shimadzu, Japão) e adicionados à água destilada. As soluções saturadas foram mantidas sob agitação magnética (C-MAG HS 7, IKA, EUA) nas temperaturas estudadas (1 e 15 °C) até a dissolução completa do sal.

2.3. Tratamento por salga úmida

Os experimentos de salga úmida foram planejados de acordo com um Delineamento em Blocos Casualizados (DBC). Amostras de carne cortadas em formato de placa foram divididas aleatoriamente em 4 tratamentos: T1 – NaCl: Salga úmida em salmoura saturada de cloreto de sódio; T2 – KCl: Salga úmida em salmoura saturada de cloreto de potássio; T3 – $MgCl_2$: Salga úmida em salmoura saturada de cloreto de magnésio; T4 – $CaCl_2$: Salga úmida em salmoura saturada de cloreto de cálcio.

Os experimentos de salga úmida de filés de alcatra suína foram realizados em um sistema que consistia em quatro cubas cilíndricas de aço inoxidável e duas incubadoras B.O.D. (Marconi, modelo MA 415) para controlar a temperatura do processo de salga úmida. Em cada incubadora B.O.D. (Marconi, modelo MA 415) foram inseridas duas cubas cilíndricas, como é mostrado na Figura 1.

Figura 1. Esboço do dispositivo experimental.



Fonte: elaborado pelo autor. 1 = BOD; 2 = Cuba de salga úmida; 3 = Retentor de amostras; 4 = Amostras de Carne; 5 = Nível de 94 % de salmoura.

Cada cuba era um dispositivo com as dimensões: 21 cm de diâmetro e 42 cm de altura. Inicialmente as salmouras e os filés de alcatra suína foram pré-condicionados à temperatura do processo antes do experimento. Em seguida, a salmoura e os filés de alcatra foram adicionados ao sistema experimental. Os experimentos foram realizados separadamente para cada temperatura estudada (1 e 15 °C). Para evitar mudanças significativas da concentração de sal na solução osmótica durante o ensaio, utilizou-se uma razão mássica de 1:50 (massa/volume) de carne/salmoura (Schmidt et al., 2009).

Uma amostra (≈71.2 g) foi usada para quantificar a PA e GS em cada tempo de amostragem (0, 1, 3, 5, 8, 11, 15, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 e 168 horas). Todos os grupos foram compostos por 15 amostras de carne (1 amostra × 15 tempos de amostragem) e um total de 120 amostras de carne (15 amostras × 2 temperaturas × 4 tratamentos) foram salgados para cada lote. Três lotes independentes foram preparados em dias diferentes, totalizando 360 amostras analisadas. Todas as determinações analíticas foram realizadas em triplicata.

2.4. Determinações analíticas após a salga úmida

As amostras de carne foram retiradas do recipiente de acordo com os tempos de amostragem (0, 1, 3, 5, 8, 11, 15, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 e 168 horas), sendo suavemente enxugadas com papel de filtro para a remoção do excesso de salmoura. Após, o conteúdo de água foi determinado pela secagem das amostras a 105 °C em estufa até massa constante (AOAC, 2007) e o conteúdo de cloretos determinado pela quantificação dos cloretos de acordo com o método de Möhr (AOAC, 2007).

A perda de água (PA) e o ganho de sal (GS) foram calculados pelas equações (1) e (2), respectivamente, e apresentados em gramas por 100 g de amostra (g / 100 g de amostra).

$$WL = \frac{W_0 - W_t}{W_0} \quad (1)$$

$$SG = S_t - S_0 \quad (2)$$

Em que PA é a perda de água (% base úmida); W_t é o conteúdo de água (% base úmida) após o tempo de salga úmida; W_0 é o conteúdo de água (% base úmida) da carne no início do processo ($t=0$); GS é o ganho de sal (% base úmida); S_t é o conteúdo de sal (% base úmida) após o tempo de salga úmida; S_0 é o conteúdo de sal (% base úmida) na carne no início do processo ($t=0$). O valor S_0 da carne foi considerado como insignificante ($S_0 = 0$), pois foi considerado muito baixo ($\leq 0,01\%$) na análise de cloretos.

2.5. Modelagem matemática da PA e GS após a salga úmida

2.5.1. Modelo de Peleg

Peleg (1988) propôs um modelo empírico para descrever a cinética de transferência de massa até condições de equilíbrio. Neste estudo, o modelo foi usado para prever as curvas cinéticas de PA e GS do processo de salga úmida até condições de equilíbrio. A adequação deste modelo para o presente estudo é dada pelas Equações. (3) e (4):

$$WL = \pm \frac{t}{k_{w1} + k_{w2}t} \quad (3)$$

$$SG = \pm \frac{t}{k_{s1} + k_{s2}t} \quad (4)$$

PA é a perda de água (%); GS é o ganho de sal (%) ao longo do processo; t é o tempo de salga. Nas equações anteriores, “ $\pm$ ” “se torna, “+” se o processo é a desidratação (perda de água) ou ganho de sal (salga), e “-” se o processo é a hidratação ou perda de sólidos (dessalga).

De acordo com esse modelo, os valores de k_{w1} e K_{s1} representam respectivamente as taxas iniciais ($t=0$) de perda de água (PA) e ganho de sal (GS) (Eq. (5) e (6)).

$$\left. \frac{d(WL)}{dt} \right|_{t=0} = \pm \frac{1}{k_{w1}} \quad (5)$$

$$\left. \frac{d(SG)}{dt} \right|_{t=0} = \pm \frac{1}{k_{s1}} \quad (6)$$

Os valores das constantes k_{w2} e K_{s2} possibilitam determinar, respectivamente a perda de água (PA) e o ganho de sal (GS) em ‘situação de equilíbrio’, ou seja, quando $t \rightarrow \infty$ (Eq. (7) e (8)).

$$WL^{\infty} = \pm \frac{1}{k_{w2}} \quad (7)$$

$$SG^{\infty} = \pm \frac{1}{k_{s2}} \quad (8)$$

2.5.2. Modelo Weibull

O modelo Weibull é um modelo empírico, simples e geralmente promove a descrição de processos de transferência de massa como é o caso da salga de carnes (Aykın-Dinçer, 2021; Schmidt et al., 2009). A adequação deste modelo para o presente trabalho é dada pelas Equações. (9) e (10):

$$WL = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\beta} \right)^{\alpha} \right] * WL^{\infty} \quad (9)$$

$$SG = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\beta} \right)^{\alpha} \right] * SG^{\infty} \quad (10)$$

2.5.3. Modelo de difusão

A segunda lei de Fick tem sido frequentemente utilizada para descrever os fenômenos de transferência de massa durante a salga úmida de carnes (Alamatian et al., 2019; Aykın-Dinçer, 2021; D. C. Kang et al., 2016; Schmidt et al., 2009). Como as

amostras de carne tinham dimensões de 1,0 cm de espessura, 8,2 cm de comprimento e 8,2 cm de largura $\left(\text{Comprimento} > 16 \cdot \frac{\text{espessura}}{2}\right)$, pode-se considerar que a geometria utilizada foi a de uma placa plana infinita (Cremasco, 2016), permitindo que a transferência de massa fosse considerada unidimensional no sentido da menor dimensão. Assumindo que: 1) a resistência externa à transferência de massa é insignificante em relação à resistência interna; 2) a concentração da salmoura permaneceu constante ao longo do processo; 3) o volume da amostra permaneceu constante; 4) a matriz cárnea é homogênea com umidade e sólidos uniforme; e 5) o processo de difusão envolveu apenas o transporte de água e sal; Partindo dessas condições de contorno, o modelo matemático baseado na lei de Fick pode ser usado para determinar os coeficientes de difusão nas amostras após a salga úmida (Crank, 1979; Dimakopoulou-Papazoglou & Katsanidis, 2019b). Os coeficientes de difusão de água e de sal foram calculados por meio das equações (11) e (12) a partir dos conteúdos determinados analiticamente em função do tempo de tratamento. A perda de água (PA^∞) e o ganho de sal (GS^∞) em situações de equilíbrio foram obtidos através da média aritmética dos resultados experimentais após 120, 140 e 168 horas da cinética de perda de água e ganho de sal para cada temperatura estudada.

$$\frac{C_{w,t} - C_{w,eq}}{C_{w,0} - C_{w,eq}} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} e^{\left(\frac{-D_w(2n+1)^2 \pi^2 t}{L^2}\right)} \quad (11)$$

$$\frac{C_{s,t} - C_{s,eq}}{C_{s,0} - C_{s,eq}} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} e^{\left(\frac{-D_s(2n+1)^2 \pi^2 t}{L^2}\right)} \quad (12)$$

onde $C_{w,t}$ e $C_{s,t}$ representam respectivamente o conteúdo de água (%) e o conteúdo de sal (%) em determinado tempo de salga úmida t (s); $C_{s,0}$ e $C_{w,0}$ são o conteúdo inicial de sal e de água na carne; $C_{w,eq}$ e $C_{s,eq}$ correspondem ao conteúdo de água (%) e conteúdo de sal (%) em situação de equilíbrio; L é a espessura da carne (m); D_s e D_w representam respectivamente os coeficiente de difusão efetivo de sal e de água (m^2/s); n é o número de termos da série.

2.6. Análise Estatística

O ajuste dos modelos aos dados experimentais de perda de água (PA) e ganho de sal (GS) foram realizados por meio de um procedimento de estimativa não-linear

usando o software Statistica (Statistica, versão 7.0). O coeficiente de determinação R^2 e a raiz quadrada do erro médio (RMSE) (Equação 13) foram usados para avaliar a precisão do ajuste dos modelos aos dados experimentais. O modelo baseado na lei de Fick (modelo de difusão) foi ajustado aos dados experimentais utilizando os doze primeiros termos da série.

$$RMSE = \frac{1}{n} \left[\sum n (C_{pred} - C_{exp})^2 \right]^{0,5} \quad (13)$$

Onde C_{exp} e C_{pred} são, respectivamente, as concentrações experimentais e as previstas pelo modelo e n o número de valores experimentais. Todos os resultados foram expressos como média $\pm$ desvio padrão, sendo analisados estatisticamente usando a análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0.05$).

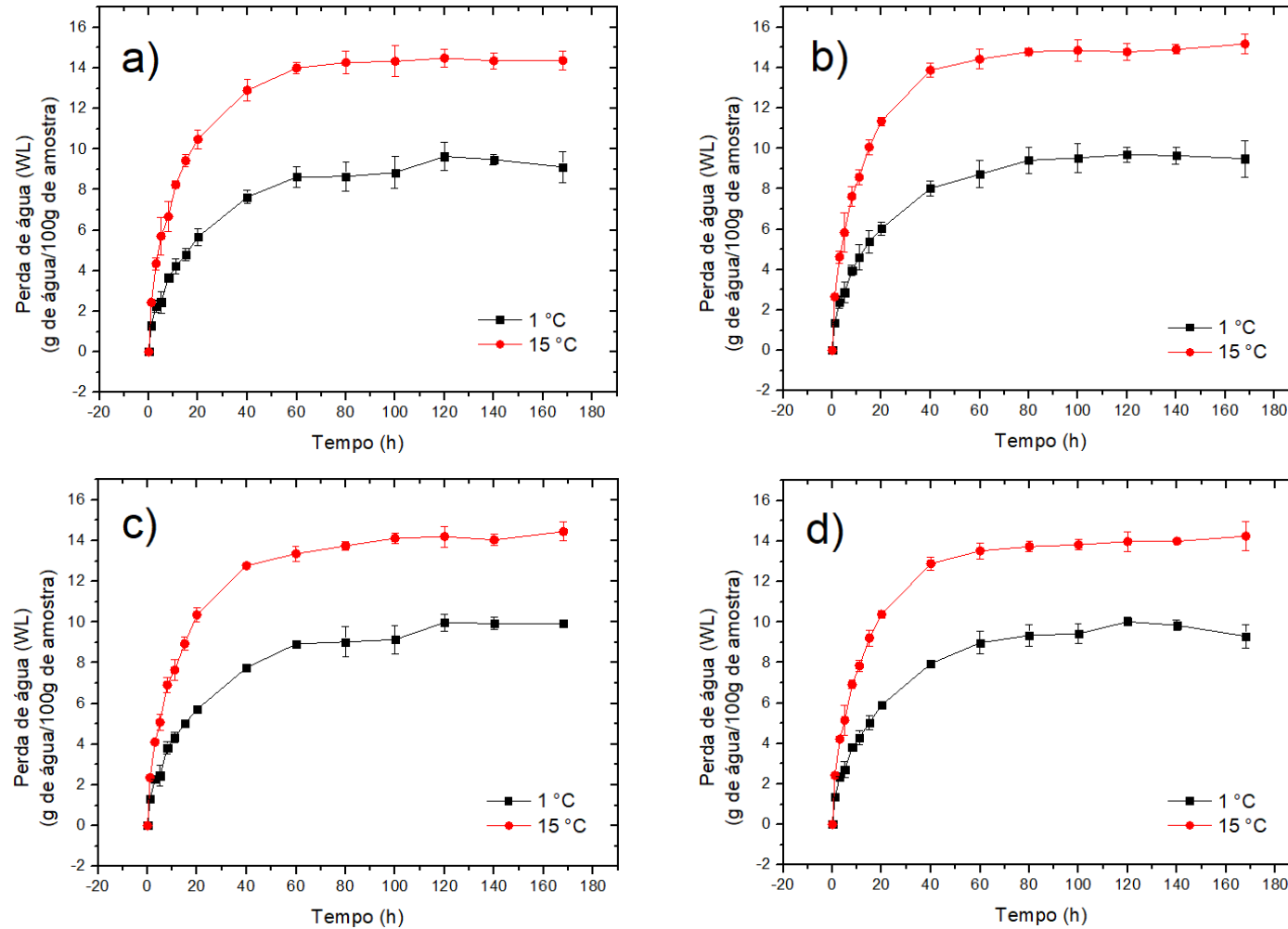
3. Resultados e Discussões

3.1. Perda de água (PA)

Neste estudo, a umidade inicial da carne suína após o descongelamento era de 67.88 ± 0.38 g de água/100g de amostra. A Figura 2 mostra a perda de água em carne suína tratada em salmouras saturadas de a) NaCl, b) KCl, c) $MgCl_2$ e d) $CaCl_2$. Todos os tratamentos apresentaram um comportamento semelhante durante a cinética de PA, que aumentou ($P < 0.05$) com o aumento do tempo de salga úmida até cerca de 40 horas de processo, em que houve a passagem da fase dinâmica para a fase de equilíbrio, que é quando a taxa líquida de transporte de massa torna-se insignificante (Erikson et al., 2004; Martins et al., 2015).

Taxas mais rápidas de perda de água foram observadas em todos os tratamentos nos estágios iniciais do processo, diminuindo gradualmente ao longo do tempo. Essa rápida difusão de água no início do processo pode ser atribuída ao maior gradiente de concentração entre a salmoura e a carne suína (Siró et al., 2009). Além disso, com o aumento do tempo de salga úmida, existe uma tendência de acúmulo de sólidos na superfície da carne, criando uma resistência externa sobre a perda de água da carne para a solução (Andreou et al., 2018).

Figura 2. Perda de água (PA) em carne suína tratada em salmouras saturadas de a) NaCl, b) KCl, c) $MgCl_2$ e d) $CaCl_2$.



Fonte: elaborado pelo autor.

Com relação as duas temperaturas (1 e 15 °C) usadas durante a salga úmida da carne suína, o aumento da temperatura aumentou ($P < 0.05$) a PA em todos os tratamentos estudados. Todos os tratamentos conduzidos a 15 °C apresentaram a maior ($P < 0.05$) PA. Os resultados indicam que o aumento da temperatura aumentou a taxa de difusão das moléculas de água causada por uma maior troca de líquidos ocluídos nos poros internos para a fase líquida externa da carne (Martins et al., 2019; Telis et al., 2003), aumentando a PA. Além disso, o aumento da temperatura pode causar a redução da viscosidade do meio osmótico, pode alterar as propriedades viscoelásticas da carne, aumentando a permeabilidade da matriz cárnea; e pode também induzir a desnaturação de proteínas (Dimakopoulou-Papazoglou & Katsanidis, 2019^a), reduzindo a capacidade de retenção de água da carne, o que pode ter contribuído para uma maior perda de água.

3.1.1. Modelagem matemática da perda de água (PA)

3.1.1.1. Modelo de Peleg

A Tabela 1 mostra os parâmetros do Modelo de Peleg (Eq. (3)). Com base neste modelo, a PA de todos os tratamentos nas temperaturas de 1 e 15 °C tiveram um $R^2_{adj} > 0.968$ e $RMSE < 0.182$, apresentando alta precisão na predição dos dados experimentais. Com relação as constantes do modelo de peleg, os valores de k_{w1} são representativos da transferência de massa (Peleg, 1988). O inverso desse parâmetro ($1/k_{w1}$) fornece informações sobre a taxa inicial de PA. Dessa forma, menores valores de k_{w1} indicam taxas iniciais mais altas de perda de água (Peleg, 1988). De acordo com os resultados da Tabela 1, as maiores ($P < 0.05$) taxas iniciais de perda de água foram obtidas na temperatura de 15 °C ($k_{w1} = 0.481 - 0.629 \text{ h} \cdot (\text{g}/100\text{g})^{-1}$); e as menores ($P < 0.05$) taxas iniciais foram obtidas na temperatura de 1 °C ($k_{w1} = 1.224 - 1.476 \text{ h} \cdot (\text{g}/100\text{g})^{-1}$). O comportamento de k_{w1} está em concordância com o efeito da temperatura sobre a cinética de PA.

Avaliando os resultados de k_{w1} em relação a temperatura de 1 °C, houve diferença significativa ($p < 0,05$) entre os tratamentos. Os resultados do modelo de Peleg (Tabela 1) apresentaram maiores ($P < 0.05$) taxas iniciais de perda de água para o tratamento T – KCl, principalmente quando comparado ao tratamento T – NaCl. Entretanto, o tratamento T – CaCl_2 não se difere ($P > 0.05$) do tratamento T – MgCl_2 .

Tabela 1. Constantes do modelo de Peleg para perda de água (PA) e ganho de sal (GS) durante o tratamento osmótico da carne.

Temp. (°C)	T	k_{w1} $\left(h \cdot \frac{100 \text{ g de amostra}}{\text{g de água}}\right)$	k_{w2} $\left(\frac{100 \text{ g de amostra}}{\text{g de água}}\right)$	R ²	RMSE	k_{s1} $\left(h \cdot \frac{100 \text{ g de amostra}}{\text{g de sal}}\right)$	k_{s2} $\left(\frac{100 \text{ g de amostra}}{\text{g de sal}}\right)$	R ²	RMSE
1	NaCl	1,476 ± 0,027 ^{a A}	0,096 ± 0,004 ^{a A}	0,977	0,117	3,167 ± 0,038 ^{a A}	0,275 ± 0,003 ^{a A}	0,990	0,027
	KCl	1,224 ± 0,032 ^{c A}	0,086 ± 0,004 ^{b A}	0,974	0,142	2,295 ± 0,072 ^{c A}	0,222 ± 0,005 ^{b A}	0,978	0,052
	CaCl ₂	1,330 ± 0,048 ^{b A}	0,088 ± 0,002 ^{b A}	0,968	0,162	2,436 ± 0,068 ^{b A}	0,196 ± 0,003 ^{c A}	0,973	0,065
	MgCl ₂	1,350 ± 0,033 ^{b A}	0,087 ± 0,003 ^{b A}	0,977	0,139	2,465 ± 0,019 ^{b A}	0,198 ± 0,003 ^{c A}	0,977	0,061
15	NaCl	0,588 ± 0,041 ^{a B}	0,069 ± 0,002 ^{a B}	0,987	0,134	0,722 ± 0,015 ^{a B}	0,105 ± 0,005 ^{a B}	0,989	0,073
	KCl	0,481 ± 0,026 ^{b B}	0,060 ± 0,003 ^{b B}	0,982	0,182	0,572 ± 0,009 ^{c B}	0,092 ± 0,006 ^{b B}	0,985	0,105
	CaCl ₂	0,596 ± 0,022 ^{a B}	0,063 ± 0,002 ^{b B}	0,982	0,169	0,594 ± 0,008 ^{b B}	0,082 ± 0,004 ^{c B}	0,986	0,115
	MgCl ₂	0,629 ± 0,040 ^{a B}	0,063 ± 0,002 ^{b B}	0,984	0,159	0,599 ± 0,005 ^{b B}	0,082 ± 0,005 ^{c B}	0,986	0,117

Os valores são apresentados como média ± desvio padrão. A-d Letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa entre os tratamentos considerando a mesma temperatura ($p \leq 0.05$). A-B Letras maiúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa para o mesmo tratamento em temperaturas diferentes ($p \leq 0.05$). T = Tratamento.

O tratamento T – NaCl apresentou a menor ($P < 0.05$) taxa inicial de PA. Em temperatura de processo mais alta (15 °C), o modelo de Peleg (Tabela 1) apresentou maiores ($P < 0.05$) taxas iniciais de perda de água para o tratamento T – KCl, sem diferença significativa ($P > 0.05$) entre os tratamentos T – NaCl, T – $MgCl_2$ e T – $CaCl_2$.

A Tabela 1 também mostra a constante de capacidade (k_{w2}) do modelo de Peleg para os quatro tratamentos. De acordo com a Eq. (7), a perda de água em equilíbrio (PA^∞) foi estimada através de $1/k_{w2}$. Desse modo, o menor valor de k_{w2} significa uma maior PA^∞ (Peleg, 1988). Analisando os resultados de PA^∞ de cada tratamento em diferentes temperaturas, houve diferença significativa entre os tratamentos. As menores ($P < 0.05$) PA^∞ foram obtidas na temperatura de 1 °C ($k_{w2} = 0.086 - 0.096$ (g de água/100g de amostra)⁻¹) e as maiores ($P < 0.05$) PA^∞ foram obtidas na temperatura de 15 °C ($k_{w2} = 0.060 - 0.069$ (g de água/100g de amostra)⁻¹). Os resultados de PA^∞ estão em concordância com o comportamento da cinética experimental de PA, conforme foram afetados pela temperatura.

Avaliando os resultados de PA^∞ ($1/k_{w2}$) em relação a mesma temperatura de processo, houve diferença significativa ($p < 0,05$) entre os tratamentos. Nas duas temperaturas estudadas (1 e 15 °C), o tratamento T – NaCl apresentou a menor ($p \leq 0.05$) PA^∞ , quando comparado aos demais tratamentos. A PA^∞ dos tratamentos T – KCl, T – $MgCl_2$ e T – $CaCl_2$ não se diferem entre si ($p \geq 0,05$). Os resultados do modelo sugerem que o KCl causou uma maior taxa de perda de água na carne, e que em condições de equilíbrio, o NaCl causou uma menor perda de água na carne. De acordo com Barat et al. (2011), o KCl possui um maior coeficiente de difusão, quando comparado ao NaCl. Isso pode ter levado a uma maior difusão deste sal, favorecendo a perda de água.

3.1.1.2. Modelo Weibull

A Tabela 2 apresenta os parâmetros do Modelo Exponencial (Eq. (9)).

Com base neste modelo, a perda de água de todos os tratamentos apresentou um $R^2_{adj} > 0.973$ e $RMSE < 0.138$. Embora o modelo exponencial apresente coeficientes de determinação ajustados (R^2_{adj}) ligeiramente superiores e erro quadrático médio ($RMSE$) ligeiramente inferior quando comparado ao modelo de Peleg, ambos os modelos apresentaram alta precisão na predição dos dados experimentais.

Com relação as constantes do modelo, os valores do parâmetro de forma α_w para a PA podem estar relacionados aos mecanismos de migração da água do centro para fora da carne. Valores de α_w abaixo de 1 indicam que a migração da água é governada pela resistência interna à transferência de massa (Cunha et al., 2001). Como todos os valores de α variaram de 0,729 a 0,870, isso indica que resistência externa à transferência de água é muito menor do que a interna neste caso. Entretanto, o inverso desse parâmetro ($1/\alpha_w$) também fornece informações sobre a taxa inicial de perda de água. Dessa forma, valores menores de α_w indicam taxas iniciais mais altas de PA (Cunha et al., 2001). Em relação aos resultados da Tabela 2, as maiores ($P<0.05$) taxas iniciais de PA foram obtidas na temperatura de 15 °C ($\alpha = 0.629 - 0.786$); e as menores ($P<0.05$) foram obtidas na temperatura de 1 °C ($\alpha = 0.723 - 0.870$). Esses resultados estão de acordo com os resultados da cinética de PA, que aumentou com o aumento da temperatura de proceso.

Avaliando os resultados de α_w dos diferentes sais em relação a mesma temperatura de processo, houve diferença significativa ($p<0,05$) entre os parâmetros do modelo. Nas duas temperaturas estudadas (1 e 15 °C), os resultados do modelo exponencial (Tabela 2) apresentaram maiores ($P<0.05$) taxas iniciais de perda de água para o tratamento T – KCl, sem diferenças significativas ($P>0.05$) entre os tratamentos T – NaCl, T – MgCl₂ e T – CaCl₂.

Em relação ao β_w (Tabela 2), parâmetro de escala de tempo, que neste caso representa o tempo (h) necessário para atingir 63% da umidade de equilíbrio, houve diferença significativa ($P<0.05$) entre o mesmo tratamento em diferentes temperaturas de processo. Os valores de β_w diminuíram ($P<0.05$) com o aumento da temperatura do processo de salga úmida, estando em concordância com os resultados apresentados na cinética de PA (Fig. 2). Essa redução nos valores de β_w está relacionada ao aumento da mobilidade da água com o aumento da temperatura (Dimakopoulou-Papazoglou & Katsanidis, 2019a).

Avaliando os resultados de β_w em relação a uma mesma temperatura de processo, houve diferença significativa ($p<0,05$) entre os tratamentos. Nas temperaturas de 1 e 15 °C, os valores de β_w foram os menores ($P<0.05$) para T – KCl.

Tabela 2. Constantes do modelo exponencial para perda de água (PA) e ganho de sal (GS) durante o tratamento osmótico da carne.

		Perda de água (PA)				Ganho de sal (GS)			
Temp. (°C)	T	α_w	B_w	R^2	RMSE	α_s	β_s	R^2	RMSE
1	NaCl	$0,835 \pm 0,029^{aA}$	$19,301 \pm 0,518^{aA}$	0,987	0,088	$0,810 \pm 0,029^{aA}$	$16,772 \pm 0,544^{aA}$	0,994	0,018
	KCl	$0,723 \pm 0,045^{bA}$	$18,028 \pm 0,584^{bA}$	0,975	0,119	$0,751 \pm 0,030^{bA}$	$15,029 \pm 0,529^{bA}$	0,983	0,040
	CaCl ₂	$0,870 \pm 0,048^{aA}$	$19,14 \pm 0,324^{aA}$	0,973	0,131	$0,815 \pm 0,050^{aA}$	$16,302 \pm 0,374^{aA}$	0,981	0,047
	MgCl ₂	$0,861 \pm 0,043^{aA}$	$20,18 \pm 0,709^{aA}$	0,977	0,123	$0,852 \pm 0,035^{aA}$	$16,468 \pm 0,540^{aA}$	0,975	0,053
15	NaCl	$0,779 \pm 0,070^{aB}$	$14,524 \pm 0,715^{aB}$	0,988	0,113	$0,780 \pm 0,012^{aB}$	$10,665 \pm 0,304^{aB}$	0,992	0,046
	KCl	$0,629 \pm 0,048^{bB}$	$12,54 \pm 0,643^{bB}$	0,984	0,138	$0,684 \pm 0,013^{bB}$	$09,536 \pm 0,189^{bB}$	0,991	0,064
	CaCl ₂	$0,786 \pm 0,053^{aB}$	$13,33 \pm 0,391^{aB}$	0,985	0,127	$0,775 \pm 0,010^{aB}$	$10,326 \pm 0,191^{aB}$	0,991	0,074
	MgCl ₂	$0,777 \pm 0,021^{aB}$	$14,22 \pm 0,962^{aB}$	0,987	0,120	$0,781 \pm 0,008^{aB}$	$10,763 \pm 0,147^{aB}$	0,992	0,071

Os valores são apresentados como média $\pm$ desvio padrão. A-d Letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa entre os tratamentos considerando a mesma temperatura ($p \leq 0.05$). A-B Letras maiúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa para o mesmo tratamento em temperaturas diferentes ($p \leq 0.05$). T = Tratamento.

Os menores resultados de β_w para o tratamento T – KCl indicam que o KCl pode ter apresentado uma difusão mais rápida quando comparado aos demais sais, reduzindo os valores de β_w , ou seja, o tempo (h) necessário para atingir 63% da umidade de equilíbrio na carne. Barat et al. (2011) também relataram que o KCl apresentou uma difusão mais rápida, quando comparado ao NaCl e atribuíram esse fato a uma menor densidade de carga do K^+ quando comparada aos íons Na^+ , o que resulta em uma menor interação eletrostática do K^+ com as proteínas da carne e facilita sua difusão.

3.2. Ganho de sal (GS)

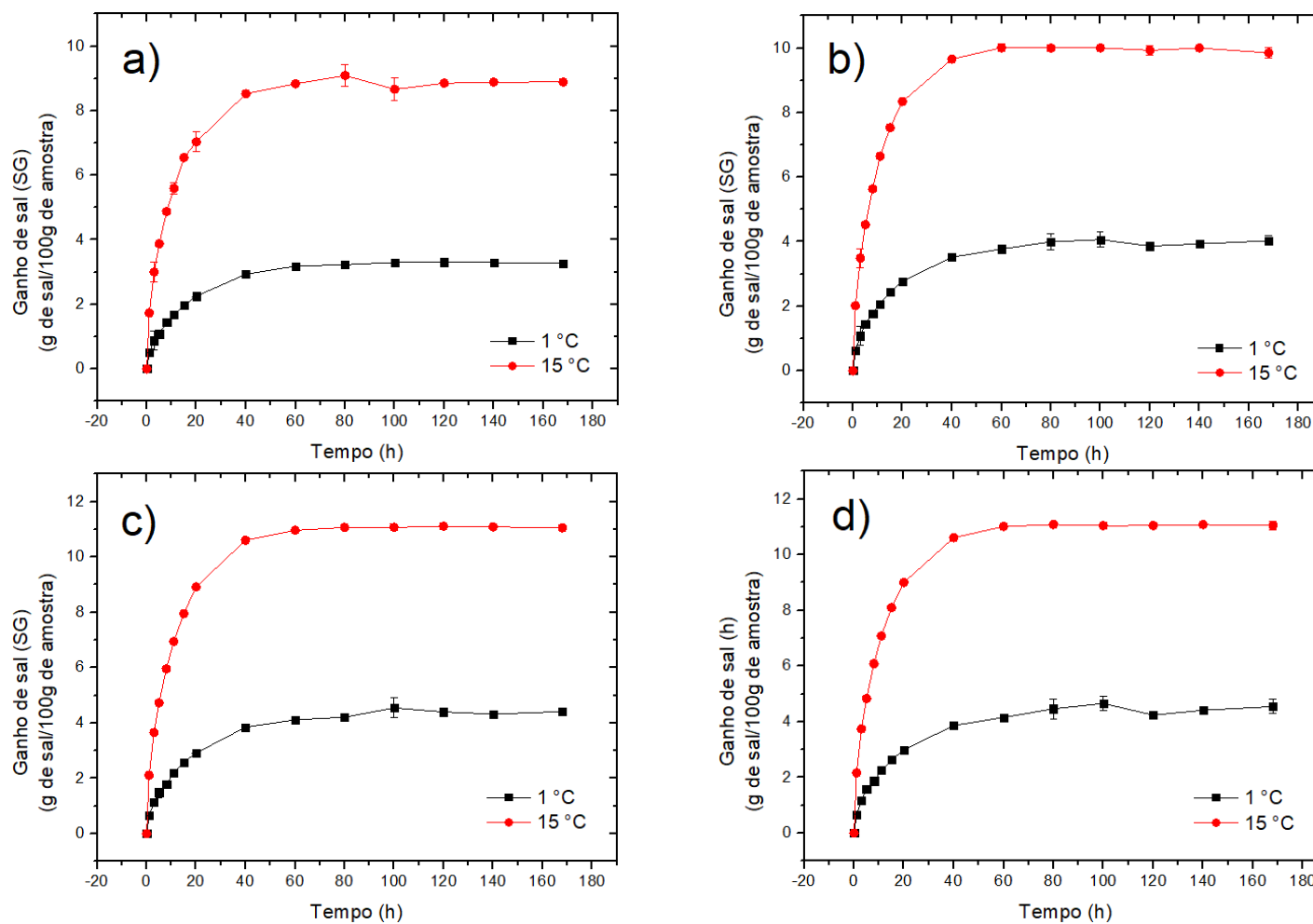
Após a análise de cloretos, o teor inicial de cloretos na carne suína foi considerado como insignificante ($S_0 = 0$), pois apresentou um conteúdo muito baixo ($\leq 0,01\%$). A Figura 3 apresenta o GS durante a salga úmida de carne suína tratada em salmouras saturadas de a) NaCl, b) KCl, c) $MgCl_2$ e d) $CaCl_2$.

Todos os tratamentos apresentaram um comportamento semelhante durante a cinética de GS, que aumentou ($P < 0.05$) com o aumento do tempo de salga úmida até cerca de 40 horas de processo. Após esse período, houve a passagem da fase dinâmica para a fase de equilíbrio, que é quando a taxa líquida de transporte de massa torna-se insignificante (Erikson et al., 2004; Martins et al., 2015).

Taxas mais rápidas de SG foram observadas em todos os tratamentos nos estágios iniciais do processo, de forma semelhante a WL, diminuindo gradualmente ao longo do tempo. Essa rápida difusão do sal no início do processo seguido da redução gradual pode ser atribuída respectivamente ao maior gradiente de concentração entre a salmoura e a carne suína (Siró et al., 2009); e devido a tendência de acúmulo de sólidos na superfície da carne com o aumento do tempo de salga úmida, criando uma resistência externa na superfície da carne, dificultando a difusão da salmoura para a carne (Andreou et al., 2018).

Com relação as temperaturas estudadas durante a salga úmida da carne suína, o aumento da temperatura aumentou ($P < 0.05$) o GS em todos os tratamentos estudados. Todos os tratamentos conduzidos a 15 °C apresentaram o maior ($P < 0.05$) GS, quando comparados ao GS dos tratamentos conduzidos a 1 °C. O aumento da temperatura provavelmente aumentou a mobilidade das moléculas de sal presentes na salmoura (Martins et al., 2019) para a superfície da carne, aumentando o GS.

Figura 3. Ganho de sal (GS) em carne suína tratada em salmouras saturadas de a) NaCl, b) KCl, c) $MgCl_2$ e d) $CaCl_2$.



Fonte: elaborado pelo autor.

Além disso, como relatado anteriormente, o aumento da temperatura pode causar a redução da viscosidade da salmoura e pode também alterar as propriedades viscoelásticas da carne, o que pode ter contribuído para um aumento da permeabilidade da matriz cárnea (Dimakopoulou-Papazoglou & Katsanidis, 2019^a), favorecendo a difusão do sal.

3.2.1. Modelagem Matemática do ganho de sal (GS)

3.2.1.1. Modelo de Peleg

A Tabela 1 mostra os parâmetros do Modelo de Peleg (Eq. (4)) para o GS. Para este modelo, o GS para todos os tratamentos nas temperaturas de 1 e 15 °C tiveram um $R^2_{adj} \geq 0.973$ e $RMSE \leq 0.117$, apresentando alta precisão na predição dos dados experimentais. Com relação as constantes do modelo de peleg, os valores de k_{s1} são representativos da transferência de massa (Peleg, 1988). O inverso desse parâmetro ($1/k_{s1}$) fornece informações sobre a taxa inicial de GS. Dessa modo, menores valores de k_{s1} indicam taxas iniciais mais altas de GS (Peleg, 1988). De acordo com a Tabela 1, as menores ($P < 0.05$) taxas iniciais de GS foram obtidas na temperatura de 1 °C ($k_{s1} = 2.295 - 3.167 \text{ h} \cdot (\text{g}/100\text{g})^{-1}$) e as maiores taxas iniciais de GS foram obtidas na temperatura de 15 °C ($k_{s1} = 0.572 - 0.722 \text{ h} \cdot (\text{g}/100\text{g})^{-1}$). Os resultados de k_{s1} seguiram a mesma tendência da cinética de GS, conforme foram afetados pela temperatura de processo.

Avaliando os resultados de k_{s1} em relação a mesma temperatura de processo, houve diferença significativa ($p < 0,05$) entre os tratamentos. Nas temperaturas de 1 e 15 °C, o tratamento T – NaCl apresentou as menores ($p < 0,05$) taxas iniciais de ganho de sal, quando comparado aos demais tratamentos. Em contraste, o tratamento T – KCl apresentou as maiores ($p < 0,05$) taxas iniciais de ganho de sal. As taxas iniciais de ganho de sal são as mesmas ($P > 0.05$) para os tratamentos T – CaCl_2 e T – MgCl_2 .

A Tabela 1 mostra a constante de capacidade (k_{s2}) do modelo de Peleg para os quatro tratamentos. De acordo com a Eq. (8), o ganho de sal em equilíbrio (GS^∞) foi estimado através de $1/k_{s2}$. Desse modo, o menor valor de k_{s2} significa um maior GS^∞ (Peleg, 1988). Analisando os resultados de GS^∞ para o mesmo tratamento em diferentes temperaturas, houve diferença significativa entre os tratamentos. Os maiores ($P < 0.05$) GS^∞ foram obtidos na temperatura de 15 °C e os menores ($P < 0.05$) GS^∞ foram obtidos na temperatura de 1 °C. Esse comportamento está em

concordância com o comportamento da cinética experimental de GS, conforme foram afetados pela temperatura.

Avaliando os resultados de GS^∞ ($1/k_{S2}$) em relação a mesma temperatura de processo, houve diferença significativa ($p < 0,05$) entre os tratamentos. Nas temperaturas de 1 e 15 °C, os tratamentos T – $MgCl_2$ e T – $CaCl_2$ apresentaram os maiores ($P < 0,05$) GS^∞ , seguido do tratamento T – KCl. O tratamento T – NaCl apresentou o menor ($P < 0,05$) GS^∞ . Os valores de k_{S2} apontam que nas duas temperaturas estudadas o T – $MgCl_2$ e o T – $CaCl_2$ podem ter causado um maior ganho de sal na carne. Os resultados de k_{S2} seguiram a mesma tendência da cinética de GS, conforme foram afetados pela temperatura de processo e pelo tipo de sal.

3.2.1.2. Modelo Weibull

A Tabela 2 apresenta os parâmetros do Modelo Exponencial (Eq. (10)). Com base neste modelo, o GS de todos os tratamentos apresentou um $R^2_{adj} \geq 0.975$ e $RMSE \leq 0.074$. Apesar do modelo exponencial apresentar coeficientes de determinação ajustados (R^2_{adj}) ligeiramente superiores e erro quadrático médio ($RMSE$) ligeiramente inferior para o GS, quando comparado ao modelo de Peleg, ambos os modelos apresentaram alta precisão na predição dos dados experimentais de GS.

Sobre as constantes do modelo, os valores do parâmetro de forma α_S abaixo de 1 indicam que a difusão de sal também é governada pela resistência interna à transferência de massa (Cunha et al., 2001). Entretanto, o inverso desse parâmetro ($1/\alpha_S$) também fornece informações sobre a taxa inicial de GS. Dessa forma, valores menores de α_S indicam taxas iniciais mais altas de GS (Cunha et al., 2001). Em relação aos resultados da Tabela 2, as maiores ($P < 0,05$) taxas iniciais de GS foram obtidas na temperatura de 15 °C ($\alpha_S = 0.684 - 0.781$); e as menores ($P < 0,05$) foram obtidas na temperatura de 1 °C ($\alpha_S = 0.751 - 0.852$). Esses resultados estão de acordo com os resultados da cinética de GS, que aumentou devido ao aumento da temperatura de proceso.

Avaliando os resultados de β_S em relação a uma mesma temperatura de processo, houve diferença significativa ($p < 0,05$) entre os tratamentos. Nas duas temperaturas estudadas (1 e 15 °C), apenas os valores de β_S do tratamento T – KCl foram menores ($P < 0,05$) que os demais tratamentos. De maneira semelhante aos valores de β_w , os valores de β_S para o tratamento T – KCl sempre foram menores

($p < 0,05$), quando comparados aos resultados dos demais tratamentos, em todas as temperaturas. Esses resultados levam a crer que o KCl pode ter provocado uma difusão mais rápida de água e de sal quando comparado aos demais sais, reduzindo ($p < 0,05$) os valores de β_w e β_s , ou seja, levando um menor tempo (h) necessário para atingir 63% da umidade de equilíbrio e do ganho de sal em equilíbrio na carne. Barat et al. (2011) atribuiu a uma possível razão para essa difusão mais rápida do K^+ estar relacionada a sua menor densidade de carga quando comparada aos íons Na^+ , o que resulta em uma menor interação eletrostática do K^+ com as proteínas da carne e facilita sua difusão.

3.3. Perda de água (PA^∞) e ganho de sal (GS^∞) em situações de equilíbrio

A Tabela 3 apresenta a perda de água em situação de equilíbrio (PA^∞) e o ganho de sal em equilíbrio (GS^∞) dos diferentes tratamentos, obtidas experimentalmente e a partir dos modelos de Peleg e Weibull. A PA^∞ obtida de forma experimental variou de 9.41 a 14.96%. Já a PA^∞ predita através do modelo de Peleg variou entre 10.40 a 16.45%, enquanto a predita pelo modelo Weibull variou entre 9.58 a 15.26%. Para o ganho de sal em condições de equilíbrio (GS^∞), os dados obtidos experimentalmente variaram de 3.28 a 11.08%. Já o ganho de sal em condições de equilíbrio (GS^∞) predito através do modelo de Peleg variou entre 3.62 a 12.17%, enquanto a predita pelo modelo Exponencial variou entre 3.35 a 11.28%.

Para todos os tratamentos, as PA^∞ e o GS^∞ obtidos experimentalmente e a partir dos modelos de Peleg e Exponencial aumentaram ($P < 0.05$) com a elevação da temperatura de processo. Como relatado anteriormente, o aumento da temperatura provavelmente aumentou a taxa de difusão das moléculas de água e dos diferentes sais (Martins et al., 2019; Telis et al., 2003), aumentando a PA^∞ e o GS^∞ . Além disso, o aumento da temperatura pode causar a redução da viscosidade do meio osmótico e alterar as propriedades viscoelásticas da carne, o que pode ter contribuído para um aumento da permeabilidade da matriz cárnea (Dimakopoulou-Papazoglou & Katsanidis, 2019^a), favorecendo a PA^∞ e o GS^∞ .

Em relação a qualidade preditiva dos modelos em relação a PA^∞ e o GS^∞ , ambos os modelos apresentaram alta precisão na predição dos dados experimentais. Entretanto, os resultados de PA^∞ e o GS^∞ obtidos para todos os tratamentos a partir do modelo exponencial são estatisticamente mais próximos dos resultados de PA^∞ e o GS^∞ obtidos experimentalmente.

Tabela 3. Perda de água em equilíbrio (PA^∞) e ganho de sal em equilíbrio (GS^∞) obtidos experimentalmente e a partir dos modelos de Peleg e Weibull.

Temp. (°C)	T	Perda de água em equilíbrio (PA^∞)		
		PA^∞ - Experimental	PA^∞ - Modelo Peleg	PA^∞ - Modelo Weibull
1	NaCl	09,41±0,63 ^{b A}	10,40±0,42 ^{a B}	09,58±0,37 ^{b B}
	KCl	09,61±0,60 ^{b A}	11,23±0,26 ^{a A}	10,28±0,26 ^{b A}
	CaCl ₂	09,72±0,46 ^{b A}	11,27±0,24 ^{a A}	09,95±0,21 ^{b A}
	MgCl ₂	09,83±0,28 ^{b A}	11,48±0,29 ^{a A}	10,09±0,18 ^{b A}
15	NaCl	14,40±0,22 ^{b B}	15,35±0,44 ^{a B}	14,58±0,17 ^{b B}
	KCl	14,96±0,30 ^{b A}	16,45±0,29 ^{a A}	15,26±0,24 ^{b A}
	CaCl ₂	14,17±0,40 ^{b B}	15,74±0,35 ^{a B}	14,61±0,27 ^{b B}
	MgCl ₂	14,22±0,34 ^{b B}	15,85±0,38 ^{a B}	14,69±0,18 ^{b B}
Temp. (°C)	T	Ganho de sal em equilíbrio (GS^∞)		
		GS^∞ - Experimental	GS^∞ - Modelo Peleg	GS^∞ - Modelo Weibull
1	NaCl	3,288 ± 0,044 ^{c C}	3,628 ± 0,043 ^{a C}	3,356 ± 0,022 ^{b C}
	KCl	3,939 ± 0,110 ^{c B}	4,494 ± 0,106 ^{a B}	4,078 ± 0,088 ^{b B}
	CaCl ₂	4,397 ± 0,110 ^{c A}	5,083 ± 0,078 ^{a A}	4,596 ± 0,088 ^{b A}
	MgCl ₂	4,376 ± 0,023 ^{c A}	5,033 ± 0,088 ^{a A}	4,507 ± 0,091 ^{b A}
15	NaCl	8,873 ± 0,018 ^{c C}	9,493 ± 0,021 ^{a C}	8,961 ± 0,016 ^{b C}
	KCl	9,925 ± 0,052 ^{c B}	10,860 ± 0,045 ^{a B}	10,112 ± 0,050 ^{b B}
	CaCl ₂	11,062 ± 0,062 ^{c A}	12,119 ± 0,033 ^{a A}	11,257 ± 0,038 ^{b A}
	MgCl ₂	11,085 ± 0,066 ^{c A}	12,177 ± 0,054 ^{a A}	11,280 ± 0,053 ^{b A}

Os valores são apresentados como média ± desvio padrão. A-c Letras minúsculas diferentes na mesma linha indicam diferença significativa ($p \leq 0.05$). A-C Letras maiúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa entre os tratamentos considerando a mesma temperatura ($p \leq 0.05$). T = Tratamento.

O alto desempenho do modelo exponencial para predição da umidade e do ganho de sal em situação de equilíbrio pode estar relacionado aos seus três parâmetros, enquanto o modelo de Peleg possui apenas dois (Schmidt et al., 2009). Esses resultados demonstram a qualidade do modelo exponencial para prever a cinética do processo e obter parâmetros importantes para controlar os processos envolvendo transferência de massa na indústria de alimentos, como é o caso da salga úmida, possuindo grande importância tecnológica. Casales & Yeannes (2016) e Schmidt et al. (2009) também relataram em seus estudos que o modelo de Peleg superestimou os dados experimentais em condições de equilíbrio.

Em relação aos diferentes sais, houve diferença significativa ($P < 0.05$) entre o ganho de sal em condições de equilíbrio (GS^∞) dos tratamentos. Nas duas temperaturas estudadas (1 e 15 °C), os tratamentos T – $CaCl_2$ e T – $MgCl_2$ apresentaram os maiores ($P < 0.05$) GS^∞ , sem diferença ($P > 0.05$) entre eles, seguido do T – KCl que apresentou um menor GS^∞ , quando comparado aos tratamentos T – $CaCl_2$ e T – $MgCl_2$. O tratamento T – NaCl apresentou o menor ($P < 0.05$) GS^∞ .

Comparando o GS^∞ , os tratamentos T – $CaCl_2$ e T – $MgCl_2$ apresentaram um GS^∞ superior (aproximadamente 1%) quando comparado ao tratamento T – NaCl na temperatura de 1 °C, e essas diferenças são ainda maiores ($\geq 2\%$) na temperatura de 15 °C. Esses resultados provavelmente estão relacionados ao pH das diferentes salmouras (T – NaCl (pH de 6.6); T – KCl (pH de 6.4); T – $CaCl_2$ (pH de 10.6); T – $MgCl_2$ (pH de 10.7)) que são diferentes e que podem ter alterado o pH da carne, afetando a sua capacidade de retenção de água (CRA). O pH próximo de 5,2 a 5,3, ponto isoelétrico (pI) da maior parte das proteínas musculares, influencia para uma baixa CRA. No entanto, valores de pH acima do pI, ocorre o desaparecimento de cargas positivas ocasionando o excesso de cargas negativas, que determinam a repulsão dos filamentos, deixando mais espaço para as moléculas de água (Lawrie, 2005) aumentando a CRA, o que pode ter contribuído para o aumento do GS dos tratamentos T – $CaCl_2$ e T – $MgCl_2$.

Em relação a perda de água em situação de equilíbrio (PA^∞), houve diferença significativa ($p \leq 0.05$) entre os tratamentos. Na temperatura de 1 °C, não houve diferença na PA^∞ ($p \geq 0.05$) entre os tratamentos. Entretanto, na temperatura de 15 °C, a PA^∞ para o tratamento T – KCl foi maior ($p \leq 0.05$) que a PA^∞ dos demais tratamentos. Esse fato provavelmente está relacionado ao maior coeficiente de difusão encontrado para o T – KCl (Tabela 4).

Zhang et al. (2020) analisaram os efeitos da substituição do NaCl pelo KCl na microestrutura da carne suína usando Microscopia eletrônica de varredura. Os autores relataram que a lacuna entre as fibras musculares aumentou relativamente quando a taxa de substituição de KCl excedeu 70% ou atingiu até 100%. O efeito do K^+ no teor de água da carne de porco salgada deve-se ao fato de que K^+ promove mudanças nas proteínas (Gan et al., 2019; Ge et al., 2020), e a degradação oxidativa de proteínas altera as propriedades físico-químicas e aumenta a lacuna entre as fibras musculares da carne porco salgada, o que pode ter contribuído para o aumento da PA. Martínez-Alvarez & Gómez-Guillén (2013) também relataram que a adição de KCl na salmoura aumentou a perda de água, a absorção de sal e a dureza dos filetes de bacalhau.

3.4. Coeficientes de difusão de água e de sal

Por meio das Equações 11 e 12 os coeficientes de difusão efetivo para a água e para os diferentes sais foram calculados e são apresentados na Tabela 4. Para realizar a modelagem matemática do processo, várias hipóteses foram adotadas no modelo de difusão a fim de descrever os fenômenos de transferência de massa. Apesar das hipóteses adotadas, alcançou-se boa concordância entre os dados preditos e os dados experimentais, apresentando coeficientes de determinação (R^2_{adj}) acima de 0.977 e baixos erros (RMSE) ≤ 0.012 demonstrando que o modelo matemático baseado na lei de Fick foi capaz de prever os coeficientes efetivos de difusão de água e dos sais durante o processo de salga úmida.

Em relação aos coeficientes de difusão para a água, houve efeito ($p \leq 0.05$) da temperatura de processo. Na temperatura de 1 °C, os coeficientes de difusão de água variaram entre $0.902 \cdot 10^{-10}$ a $1.27 \cdot 10^{-10}$, sendo todos inferiores ($p \leq 0.05$) aos coeficientes de difusão de água encontrados para os processos conduzidos a 15 °C ($1.48 \cdot 10^{-10}$ a $1.78 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$). Isso indica que o aumento da temperatura resultou em um aumento ($p \leq 0.05$) dos coeficientes de difusão de água.

Em relação aos coeficientes de difusão de sal, houve efeito ($p \leq 0.05$) da temperatura de processo. Todos os tratamentos apresentaram um aumento ($p \leq 0.05$) dos coeficientes de difusão de sal, com o aumento da temperatura. Os maiores coeficientes de difusão de sal foram encontrados nas amostras tratadas a 15 °C ($1.99 \cdot 10^{-10}$ a $2.33 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$), quando comparados as amostras tratadas a 1 °C ($1.33 \cdot 10^{-10}$ a $1.54 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$).

Tabela 4. Coeficiente de difusão para perda de água (PA) e para o ganho de sal (GS) durante o tratamento osmótico da carne.

Temp. (°C)	T	D _{ef} água (E ⁻¹⁰)	R ²	RMSE	D _{ef} sal (E ⁻¹⁰)	R ²	RMSE
1	NaCl	0.98 ± 0.15 ^{b B}	0.977	0.011	1.33 ± 0.03 ^{b B}	0.996	0.004
	KCl	1.27 ± 0.09 ^{a B}	0.980	0.012	1.54 ± 0.09 ^{a B}	0.987	0.010
	CaCl ₂	1.03 ± 0.09 ^{b B}	0.988	0.010	1.34 ± 0.14 ^{b B}	0.980	0.012
	MgCl ₂	0.90 ± 0.08 ^{b B}	0.988	0.008	1.33 ± 0.13 ^{b B}	0.985	0.010
15	NaCl	1.57 ± 0.09 ^{b A}	0.990	0.006	2.04 ± 0.05 ^{b A}	0.994	0.011
	KCl	1.78 ± 0.08 ^{a A}	0.991	0.008	2.33 ± 0.07 ^{a A}	0.996	0.005
	CaCl ₂	1.58 ± 0.08 ^{b A}	0.994	0.006	2.09 ± 0.03 ^{b A}	0.999	0.002
	MgCl ₂	1.48 ± 0.12 ^{b A}	0.995	0.006	1.99 ± 0.05 ^{b A}	0.999	0.002

Os valores são apresentados como média ± desvio padrão. A-d Letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa entre os tratamentos considerando a mesma temperatura ($p \leq 0,05$). A-B Letras maiúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa para o mesmo tratamento em temperaturas diferentes ($p \leq 0,05$). T = Tratamento.

O aumento dos coeficientes de difusão de água e dos diferentes sais com o aumento da temperatura podem estar relacionados com as propriedades viscoelásticas da carne, que podem ter sofrido um aumento da permeabilidade das membranas celulares com o aumento da temperatura, promovendo a difusão de água e de sólidos (Poligné et al., 2005).

Aliado a isso, a viscosidade da solução osmótica tende a diminuir com o aumento na temperatura, e isso reduz a resistência externa à transferência de massa na superfície do produto, o que favorece o processo de transferência de massa. O efeito da temperatura também foi relatado por outros autores que estudaram a difusividade efetiva de diferentes solutos como: sais de nitrito de sódio (Gómez et al., 2015, 2017, 2019), cloreto de sódio (Telis et al., 2003), sacarose e glicerol (Prithani & Dash, 2020), NaCl e KCl (Bampi et al., 2016; Barat et al., 2011), maltodextrina e NaCl (Andreou et al., 2018; Dimakopoulou-Papazoglou & Katsanidis, 2016) em diferentes carnes. Além disso, esse efeito também foi observado sobre a difusividade efetiva da água nas matrizes estudadas.

Avaliando os efeitos dos diferentes sais em relação à mesma temperatura, houve diferença significativa entre os tratamentos. Os coeficientes de difusão de água e de sal para o tratamento T – KCl foram maiores ($p \leq 0.05$) que os demais tratamentos. Entretanto, não houve diferença significativa ($p \geq 0.05$) entre os coeficientes de difusão de água e de sal para os tratamentos T – CaCl_2 , T – MgCl_2 e T – NaCl. De acordo com Barat et al. (2011), uma possível razão para essa difusão mais rápida do K^+ é sua menor densidade de carga quando comparada aos íons Na^+ , o que resulta em uma menor interação eletrostática do K^+ com as proteínas da carne e facilita sua difusão.

Zhang et al. (2020) em seu estudo sobre o mecanismo de substituição do NaCl pelo KCl na retenção de água em carne de porco salgada relataram que ao usar a mesma proporção de teor de sal (NaCl ou KCl) na salmoura, a concentração molar de íons K^+ na carne de porco salgada aumenta mais do que a de Na^+ .

Esses achados são importantes para a indústria de carnes e precisam ser levados em consideração para o controle do tempo de salga úmida de carnes e produtos cárneos, uma vez que o KCl é aparentemente o sal que apresenta o maior potencial para a substituição parcial do NaCl em formulações de produtos cárneos com teor de sódio reduzido (Barretto et al., 2018, 2020; Vidal et al., 2019a; 2019b; 2020). Entretanto, alguns estudos mostraram que, dependendo da quantidade, o KCl

pode diminuir a aceitação sensorial de produtos cárneos, pois promove amargor, adstringência e um sabor metálico (Armenteros et al., 2012; dos Santos et al., 2021; Gelabert et al., 2003; Hu et al., 2020; Inguglia et al., 2017; Wen et al., 2019) que pode ser aumentado pela penetração do KCl devido à sua difusão mais rápida em comparação com o outros sais. Nesse contexto, o tempo de salga utilizando o KCl em formulações de salga de carnes e produtos cárneos devem ser controlados considerando a impregnação mais rápida do KCl.

4. Conclusões

Fenômenos de transferência de água e sal durante a salga úmida de bifes de alcatra foram estudados usando salmouras saturadas de NaCl, KCl, CaCl e MgCl a 1 °C e 15 °C. Durante a salga, o teor de água da carne diminui enquanto o teor de sal aumenta em taxas que dependem da temperatura e da solução salina. A 15 °C, a perda de água (PA), ganho de sal (GS) e os coeficientes de difusão para água (D_w) e sais (D_s) nas amostras de carne suína foram maiores. Além disso, CaCl e MgCl causaram maior ganho de sal em condições de equilíbrio em comparação com NaCl e KCl.

Os modelos de Peleg, Weibull e Fick representaram adequadamente os dados experimentais de WL e SG. No entanto, o modelo Weibull representa melhor as taxas de WL e SG até condições de equilíbrio. Os modelos de Peleg e Weibull calculam maiores taxas de WL e SG para KCl, o que não ocorre para os demais sais estudados. O modelo de Fick mostra que os maiores coeficientes de difusão de água e sal são para o processo de salga com KCl.

Os modelos de Peleg, Weibull e Fick podem ser usados para prever variáveis de salga úmida apenas para as condições experimentais estudadas (tipo e tamanho do corte, solução salina, pH, agitação). No entanto, apesar de seu caráter empírico, podem ser úteis para entender a cinética de difusão de água e sal em amostras com geometrias não clássicas, evitando o uso de modelos matemáticos complexos e simulações numéricas.

Essas descobertas podem ajudar a indústria a planejar processos de salga úmida com diferentes sais para desenvolver produtos com teor reduzido de sódio.

Agradecimentos

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001.

Referências

Alamatian, S., Mohebbi, M., Varidi, M., & Momen Nezhad, M. (2019). Modeling of osmotic treatment of ostrich meat coated by tragacanth and salep. **Meat Science**, 156, 231–239. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.05.031>

Alves Junior, C. A., Martins, M. J. N., Betiol, L. F. L., Silva-Barretto, A. C., Telis-Romero, J. Solubilidade de cloreto de sódio e seus sais substitutos para utilização na indústria de alimentos. In: CORDEIRO, C. A. M., SILVA, E. M., SILVA, B. A. (org.). **Ciência e tecnologia de alimentos: Pesquisa e práticas contemporâneas**. Guarujá: Editora Científica, 2021. p. 551-557. DOI: 10.37885/210303747

Andreou, V., Tsironi, T., Dermesonlouoglou, E., Katsaros, G., & Taoukis, P. (2018). Combinatory effect of osmotic and high-pressure processing on shelf life extension of animal origin products – Application to chilled chicken breast fillets. **Food Packaging and Shelf Life**, 15, 43–51.

<https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2017.11.002>

AOAC. (2007). **Association of Official Analytical Chemistry**. In In: Official methods of analysis to AOAC International. (18th ed.).

Armenteros, M., Aristoy, M. C., Barat, J. M., & Toldrá, F. (2012). Biochemical and sensory changes in dry-cured ham salted with partial replacements of NaCl by other chloride salts. **Meat Science**, 90(2), 361–367.

<https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2011.07.023>

Assis, F. R., Morais, R. M. S. C., & Morais, A. M. M. B. (2015). Mass Transfer in Osmotic Dehydration of Food Products: Comparison Between Mathematical Models. **Food Engineering Reviews** 2015 8:2, 8(2), 116–133.

<https://doi.org/10.1007/S12393-015-9123-1>

Aykın-Dinçer, E. (2021). Application of ultrasound-assisted vacuum impregnation for improving the diffusion of salt in beef cubes. **Meat Science**, 176, 108469. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108469>

Azuara, E., Beritain, C. I., & Garcia, H. S. (1992). Development of a mathematical model to predict kinetics of osmotic dehydration. **Journal of Food Science and Technology** (Mysore), 29(4), 239-242.

Bampi, M., Domschke, N. N., Schmidt, F. C., & Laurindo, J. B. (2016). Influence of vacuum application, acid addition and partial replacement of NaCl by KCl on the mass transfer during salting of beef cuts. **LWT – Food Science and Technology**, 74, 26–33. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2016.07.009>

Barat, J. M., Baigts, D., Aliño, M., Fernández, F. J., & Pérez-García, V. M. (2011). Kinetics studies during NaCl and KCl pork meat brining. **Journal of Food Engineering**, 106(1), 102–110. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2011.04.022>

Barretto, T. L., Bellucci, E. R. B., Barbosa, R. D., Pollonio, M. A. R., Romero, J. T., & da Silva Barretto, A. C. (2020). Impact of ultrasound and potassium chloride on the physicochemical and sensory properties in low sodium restructured cooked ham. **Meat Science**, 165, 108130. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108130>

Barretto, T. L., Pollonio, M. A. R., Telis-Romero, J., & da Silva Barretto, A. C. (2018). Improving sensory acceptance and physicochemical properties by ultrasound application to restructured cooked ham with salt (NaCl) reduction. **Meat Science**, 145, 55–62. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2018.05.023>

Casales, M. R., & Yeannes, M. I. (2016). Mass transfer modeling during marination of anchovy fillets in ternary and multicomponent solutions. **Journal of aquatic food product technology**, 25(5), 760-769. <https://doi.org/10.1080/10498850.2014.924168>

Cunha, L. M., Oliveira, F. A. R., Aboim, A. P., Frias, J. M., & Pinheiro-Torres, A. (2001). Stochastic approach to the modelling of water losses during osmotic dehydration and improved parameter estimation. **International Journal of Food Science and Technology**, 36(3), 253–262. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2001.t01-1-00447.x>

Cremasco, M. A. **Fundamentos de transferência de massa**. Editora Blucher, 2016.

Delgado-Pando, G., Fischer, E., Allen, P., Kerry, J. P., O'Sullivan, M. G., & Hamill, R. M. (2018). Salt content and minimum acceptable levels in whole-muscle cured meat products. **Meat Science**, 139, 179–186.

<https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2018.01.025>

Desmond, E. (2006). Reducing salt: A challenge for the meat industry. **Meat Science**, 74(1), 188–196. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2006.04.014>

Dimakopoulou-Papazoglou, D., & Katsanidis, E. (2016). Mass transfer kinetics during osmotic processing of beef meat using ternary solutions. **Food and Bioprocess Processing**, 100, 560–569.

<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.09.001>

Dimakopoulou-Papazoglou, D., & Katsanidis, E. (2019). Diffusion coefficients and volume changes of beef meat during osmotic dehydration in binary and ternary solutions. **Food and Bioprocess Processing**, 116, 10–19.

<https://doi.org/10.1016/J.FBP.2019.04.007>

dos Santos, E. A., Ribeiro, A. E. C., Oliveira, A. R., Monteiro, M. L. G., Mársico, E. T., Morgano, M., Caliari, M., & Soares Júnior, M. S. (2021). Sodium reduction in “spam-like” product elaborated with mechanically separated tilapia meat. **LWT - Food Science and Technology**, 148, 111676.

<https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.111676>

Doyle, M. E., & Glass, K. A. (2010). Sodium Reduction and Its Effect on Food Safety, Food Quality, and Human Health. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 9(1), 44–56. <https://doi.org/10.1111/J.1541-4337.2009.00096.X>

Erikson, U., Veliyulin, E., Singstad, T. E., & Aursand, M. (2004). Salting and Desalting of Fresh and Frozen-thawed Cod (*Gadus morhua*) Fillets: A Comparative Study Using ²³Na NMR, ²³Na MRI, Low-field ¹H NMR, and Physicochemical Analytical Methods. **Journal of Food Science**, 69(3), FEP107–FEP114. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2621.2004.TB13362.X>

Martins, M. G., Nunes Chada, P. S., & da Silva Pena, R. (2019). Application of pulsed-vacuum on the salt impregnation process of pirarucu fillet. **Food Research International**, 120, 407–414.

<https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2019.03.016>

- Gan, X., Li, H., Wang, Z., Emara, A. M., Zhang, D., & He, Z. (2019). Does protein oxidation affect proteolysis in low sodium Chinese traditional bacon processing? **Meat Science**, 150, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.10.007>
- Ge, G., Han, Y., Zheng, J., Zhao, M., & Sun, W. (2020). Physicochemical characteristics and gel-forming properties of myofibrillar protein in an oxidative system affected by partial substitution of NaCl with KCl, MgCl₂ or CaCl₂. **Food Chemistry**, 309, 125614. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2019.125614>
- Gelabert, J., Gou, P., Guerrero, L., & Arnau, J. (2003). Effect of sodium chloride replacement on some characteristics of fermented sausages. **Meat Science**, 65(2), 833–839. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(02\)00288-7](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(02)00288-7)
- Gómez, J., Sanjuán, N., Arnau, J., Bon, J., & Clemente, G. (2017). Diffusion of nitrate and water in pork meat: Effect of the direction of the meat fiber. **Journal of Food Engineering**, 214, 69–78. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2017.06.028>
- Gómez, J., Sanjuán, N., Arnau, J., Bon, J., & Clemente, G. (2019). Modeling of sodium nitrite and water transport in pork meat. **Journal of Food Engineering**, 249, 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.01.008>
- Gómez, J., Sanjuán, N., Bon, J., Arnau, J., & Clemente, G. (2015). Effect of temperature on nitrite and water diffusion in pork meat. **Journal of Food Engineering**, 149, 188–194. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2014.10.008>
- He, F. J., & MacGregor, G. A. (2010). Reducing Population Salt Intake Worldwide: From Evidence to Implementation. **Progress in Cardiovascular Diseases**, 52(5), 363–382. <https://doi.org/10.1016/J.PCAD.2009.12.006>
- Hu, Y., Zhang, L., Zhang, H., Wang, Y., Chen, Q., & Kong, B. (2020). Physicochemical properties and flavour profile of fermented dry sausages with a reduction of sodium chloride. **LWT - Food Science and Technology**, 124, 109061. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2020.109061>
- Inguglia, E. S., Zhang, Z., Tiwari, B. K., Kerry, J. P., & Burgess, C. M. (2017). Salt reduction strategies in processed meat products – A review. **Trends in Food Science & Technology**, 59, 70–78. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2016.10.016>

Kang, D. C., Wang, A. R., Zhou, G. H., Zhang, W. G., Xu, S. M., & Guo, G. P. (2016). Power ultrasonic on mass transport of beef: Effects of ultrasound intensity and NaCl concentration. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, 35, 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.03.009>

Lawrie, R.A. **Ciência da carne**. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2005. 384p.

Liu, D., Pu, H., Sun, D. W., Wang, L., & Zeng, X. A. (2014). Combination of spectra and texture data of hyperspectral imaging for prediction of pH in salted meat. **Food Chemistry**, 160, 330–337. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2014.03.096>

Sanches, M. A. R., Colombo-Silva, P. M. O, Barretto, T. L., Darros-Barbosa, R., Silva-Barretto, A. C. da, & Telis-Romero, J. (2021). Technological and diffusion properties in the wet salting of beef assisted by ultrasound. **LWT - Food Science and Technology**, 149, 112036. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.112036>

Martínez-Alvarez, O., & Gómez-Guillén, C. (2013). Influence of mono- and divalent salts on water loss and properties of dry salted cod fillets. **LWT - Food Science and Technology**, 53(2), 387–394. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2013.04.013>

Martins, M. G., Martins, D. E. G., & Pena, R. da S. (2015). Drying kinetics and hygroscopic behavior of pirarucu (*Arapaima gigas*) fillet with different salt contents. **LWT - Food Science and Technology**, 62(1), 144–151. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2015.01.010>

Mulet, A. (1994). Drying modelling and water diffusivity in carrots and potatoes. **Journal of Food Engineering**, 22(1–4), 329–348. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)90038-8](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)90038-8)

Peleg, M. (1988). An Empirical Model for the Description of Moisture Sorption Curves. **Journal of Food Science**, 53(4), 1216–1217. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1988.tb13565.x>

Poligné, I., Collignan, A., & Trystram, G. (2005). Processing smoked pork belly by immersion in a complex solution at high temperature. **Journal of Food Engineering**, 66(2), 155–169. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2004.03.002>

Prithani, R., & Dash, K. K. (2020). Mass transfer modelling in ultrasound assisted osmotic dehydration of kiwi fruit. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 64, 102407. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2020.102407>

Telis, V. R. N., Romanelli, P. F., Gabas, A. L., & Telis-Romero, J. (2003). Salting kinetics and salt diffusivities in farmed Pantanal caiman muscle. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 38, 529-535.

<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003000400012>

Sanches, M. A. R., Silva, P. M. O. C., Barbosa, R. D., Romero, J. T., & Barretto, A. C. da S. (2020). Mass transfer in beef: Effect of crossbreeding and ultrasound application. **Scientia Agricola**, 78(5), 1–9. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2019-0335>

Schmidt, F. C., Carciofi, B. A. M., & Laurindo, J. B. (2009). Application of diffusive and empirical models to hydration, dehydration and salt gain during osmotic treatment of chicken breast cuts. **Journal of Food Engineering**, 91(4), 553–559. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2008.10.003>

Siró, I., Vén, C., Balla, C., Jónás, G., Zeke, I., & Friedrich, L. (2009). Application of an ultrasonic assisted curing technique for improving the diffusion of sodium chloride in porcine meat. **Journal of Food Engineering**, 91(2), 353–362. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2008.09.015>

Stollewerk, K., Jofré, A., Comaposada, J., Arnau, J., & Garriga, M. (2012). The effect of NaCl-free processing and high pressure on the fate of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* on sliced smoked dry-cured ham. **Meat Science**, 90(2), 472–477. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2011.09.009>

Vidal, V. A. S., Bernardinelli, O. D., Paglarini, C. S., Sabadini, E., & Pollonio, M. A. R. (2019a). Understanding the effect of different chloride salts on the water behavior in the salted meat matrix along 180 days of shelf life. **Food Research International**, 125. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108634>

Vidal, V. A. S., Biachi, J. P., Paglarini, C. S., Pinton, M. B., Campagnol, P. C. B., Esmerino, E. A., da Cruz, A. G., Morgano, M. A., & Pollonio, M. A. R. (2019b). Reducing 50% sodium chloride in healthier jerked beef: An efficient design to ensure suitable stability, technological and sensory properties. **Meat Science**, 152, 49–57. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2019.02.005>

Vidal, V. A. S., Santana, J. B., Paglarini, C. S., da Silva, M. A. A. P., Freitas, M. Q., Esmerino, E. A., Cruz, A. G., & Pollonio, M. A. R. (2020). Adding lysine and yeast extract improves sensory properties of low sodium salted meat. **Meat Science**, 159, 107911. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2019.107911>

Weibull, W. (1951). A statistical distribution function of wide applicability. **Journal of applied mechanics**, 18(3), 293-297.

Wen, R., Hu, Y., Zhang, L., Wang, Y., Chen, Q., & Kong, B. (2019). Effect of NaCl substitutes on lipid and protein oxidation and flavor development of Harbin dry sausage. **Meat Science**, 156, 33–43.
<https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2019.05.011>

Zhang, D., Li, H., Emara, A. M., Wang, Z., Chen, X., & He, Z. (2020). Study on the mechanism of KCl replacement of NaCl on the water retention of salted pork. **Food Chemistry**, 332, 127414.
<https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2020.127414>

CAPÍTULO IV

Efeito da temperatura e do conteúdo de NaCl e de KCl sobre as propriedades de sorção de água de carne suína salgada

Betiol, L. F. L.; Sanches, M. A. R.; Martins, M. J. N.; Machado, A. L. B.; Telis-Romero, J.

Manuscrito a ser submetido ao Periódico "Meat Science" ISSN: 0309-1740 (Será elaborada uma versão em inglês para submissão ao periódico).

Efeito da temperatura e do conteúdo de NaCl e de KCl sobre as propriedades de sorção de água de carne suína salgada

Lilian Fachini Leonardo Betiol¹, Marcio Augusto Ribeiro Sanches¹, Maria Julia Neves Martins¹, André Luiz Borges Machado¹, Javier Telis-Romero^{1*}

¹Departamento de Engenharia e Tecnologia de alimentos, Universidade Estadual de São Paulo – Unesp, São José do Rio Preto, São Paulo, 15.054-000, Brasil.

*Autor a quem a correspondência pode ser endereçada. E-mail: javier.romero@unesp.br (Javier Telis Romero).

RESUMO

O objetivo do presente estudo foi avaliar a influência da temperatura e de diferentes conteúdos de NaCl e de KCl sobre as propriedades de sorção de água de carne suína salgada. As isotermas de sorção de água foram determinadas usando o método gravimétrico estático e os dados foram ajustados a quatro modelos (GAB, Peleg, Oswin e Henderson) matemáticos. As curvas cinéticas de perda de água (PA) e de ganho de sal (GS) aumentaram com o aumento do tempo de salga úmida. Dessa forma, após a salga úmida, a carne salgada com NaCl (0%, 9,3%, 15,6%, 20,6% e 26,6% em base seca) e com KCl (0%, 10,7%, 17,1%, 21,1%, 26,1% e 29,8% em base seca) apresentaram diferentes conteúdos de sal. De acordo com a classificação de BET, as isotermas de sorção da carne salgada apresentaram às características de sorção típica de produtos alimentícios com alto teor de proteína e sais, que corresponde ao tipo III. Observando em uma mesma atividade de água, o aumento da temperatura reduziu a umidade de equilíbrio da carne suína salgada. As curvas de sorção também mostraram que a umidade de equilíbrio aumentou devido ao aumento do conteúdo de NaCl e de KCl na carne salgada. Além disso, em concentrações próximas de NaCl e de KCl na carne salgada, as isotermas da carne salgada com NaCl apresentaram uma maior umidade de equilíbrio quando comparadas as isotermas da carne salgada com KCl. O calor de sorção de água aumentou em

consequência da redução da umidade de equilíbrio e/ou do aumento do conteúdo de sal na carne salgada. Dentre os modelos testados, GAB foi mais adequado para descrever as isotermas de sorção de água da carne salgada.

Palavras-chave: Modelos de sorção; Umidade de equilíbrio; Modelagem matemática; Conteúdo de sal; Atividade de água.

1 INTRODUÇÃO

A carne suína é uma das fontes de proteína de origem animal mais consumida do mundo, sendo consumida preferencialmente na forma de produtos processados (Monteiro et al., 2017), como salame, bacon, linguiça, presunto cru, presunto cozido, salsicha entre outros. O cloreto de sódio (NaCl) é um ingrediente essencial e funcional para a preparação de produtos cárneos. Ele resulta em mudanças físico-químicas e bioquímicas na carne, aumenta a vida útil, o sabor, a suculência e a maciez dos produtos cárneos (Ros-Polski et al., 2015), além de estar envolvido com a capacidade de retenção de água (WHC) e com reações de proteólise e lipólises (Betiol et al., 2020; Pérez-Santaescolástica et al., 2019). Entretanto, a alta ingestão de sódio nos alimentos pode aumentar o risco de doenças crônicas como a hipertensão e outras doenças como a mortalidade cardiovascular, câncer gástrico e doença renal (Doyle & Glass, 2010; He & MacGregor, 2010). Assim, pesquisas por sais substitutos do NaCl tornaram-se uma tendência em ciência e tecnologia de alimentos (Inguglia et al., 2017). Vários estudos (Barretto et al., 2018, 2020; Ge et al., 2020; Lorenzo et al., 2015; Pinton et al., 2020; Ripollés et al., 2011; Sena Vaz Leães et al., 2020; Vidal et al., 2020; Vidal, Bernardinelli, et al., 2019) consideraram que o cloreto de potássio (KCl) é uma das alternativas viáveis para substituir o NaCl em produtos cárneos.

A atividade de água (a_w) de produtos cárneos que passam por etapas de processamento como salga e/ou secagem é menor do que na carne *in natura* (Aktaş & Gürses, 2005). A estabilidade de produtos cárneos está relacionada com a sua atividade de água, que é um fator importante para proporcionar a estabilidade necessária para garantir a segurança alimentar frente à deterioração microbiana do produto, evitando qualquer ameaça à saúde do consumidor (Aktaş & Gürses, 2005; Aykın-Dinçer & Erbaş, 2018). Além disso, as características sensoriais e o perfil de textura dos produtos cárneos está fortemente relacionada com a sua atividade de água (a_w) (Retz et al., 2017; von Gersdorff et al., 2017; Yalçın & Şeker, 2016). No

entanto, o conteúdo de água não possibilita avaliar e prever as alterações bioquímicas que ocorrem durante o processamento e armazenamento de produtos cárneos em geral (Barretto et al., 2018; Betiol et al., 2020; Sánchez-Torres et al., 2021). Desse modo, o conhecimento e entendimento das características de sorção de água é um indicador mais adequado para prever a estabilidade físico-química e/ou microbiana de carne suína salgada (Aykın-Dinçer & Erbaş, 2018).

As isotermas de sorção são curvas que relacionam a atividade de água do alimento e seu respectivo teor de umidade de equilíbrio em uma dada temperatura (Freitas et al., 2016). As isotermas de sorção de água da carne e de produtos cárneos podem ser alteradas por diferentes fatores como temperatura (Comaposada et al., 2000), composição química (Barretto et al., 2018; Betiol et al., 2020) e a presença de agentes de cura como o cloreto de sódio e nitrito de sódio (Aykın-Dinçer & Erbaş, 2018; Comaposada et al., 2000; Kabil et al., 2012). O conhecimento e a modelagem das isotermas de sorção de água de carne salgada são informações necessárias para projetar processos de secagem e avaliar alterações físico-químicas durante a vida útil de produtos em diferentes condições de armazenamento, além de contribuir para a escolha correta da embalagem (Aykın-Dinçer & Erbaş, 2018; Betiol et al., 2020), sendo uma ferramenta para auxiliar o controle de qualidade de carnes e produtos cárneos.

A literatura tem relatado informações sobre a influência da temperatura (Ahmat et al., 2014; Aktaş & Gürses, 2005; Aykın-Dinçer & Erbaş, 2018; Clemente et al., 2009; Comaposada et al., 2000), e da composição química (Barretto et al., 2018; Betiol et al., 2020) nas isotermas de sorção de água de carnes e produtos cárneos, entretanto, poucos estudos avaliaram o efeito simultâneo da temperatura, em condições de armazenamento e de secagem, e de diferentes concentrações de NaCl e de KCl nas propriedades de sorção de água de carne suína salgada. Diante do exposto, os objetivos do presente estudo foram I) avaliar a influência da temperatura e de diferentes concentrações de NaCl (0%, 9%, 15%, 20% e 26%; bs) e de KCl (0%, 10%, 17%, 21%, 26% e 30% base seca) nas propriedades de sorção de água de carne suína salgada; II) testar diferentes modelos para simular os dados de sorção de água da carne salgada em diferentes condições de processo.

2 Materiais e métodos

2.1 Matéria-prima

Cortes de alcatra suína foram adquiridos no comercio local de São José do Rio Preto – SP, provenientes do mesmo estabelecimento. Os cortes de carne foram selecionados usando o critério dos valores de pH entre 5.4 a 5.8, para minimizar a heterogeneidade da carne. A matéria-prima congelada em temperatura de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ foi conduzida em gelo seco até o Laboratório de Engenharia de Processos da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” localizado em São José do Rio Preto – São Paulo, Brasil, sendo mantida congelada à temperatura de $-18 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, até a realização dos experimentos.

2.2 Preparação da amostra

As amostras foram descongeladas lentamente em uma câmara refrigerada à 4°C , 24 horas antes dos experimentos. Após, as amostras foram cortadas em formato de placa (8,2 cm de comprimento, 8,2 cm de largura e 1,0 cm de espessura). A gordura subcutânea e tecido conjuntivo foram removidos antes da etapa de salga úmida.

2.3 Composição química

A composição química das amostras foi avaliada em cinco repetições de acordo com os procedimentos recomendados pela Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2007). A umidade (método 950,46) foi quantificada pelo método gravimétrico; o teor de cinzas (método 920,153) foi quantificado por incineração em mufla; o teor de proteína (método 981,10) foi quantificado por micro-Kjeldahl; e o teor de lipídios foi quantificado utilizando o método proposto por Bligh & Dyer (1959).

2.4 Cinética de Salga úmida

As amostras já cortadas em formato de placa foram divididas aleatoriamente em 2 tratamentos: T–NaCl: Salga úmida em salmoura saturada de cloreto de sódio; T–KCl: Salga úmida em salmoura saturada de cloreto de potássio. Os experimentos de salga úmida foram realizados em cubas cilíndricas de aço inoxidável, que foram inseridas em incubadoras B.O.D. (Marconi, modelo MA 415) para controlar a temperatura do processo de salga úmida a $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Antes de iniciar os experimentos, as amostras foram pré-condicionadas à temperatura do processo. Para evitar mudanças significativas da concentração de sal na solução osmótica durante os ensaios, utilizou-se uma razão mássica de 1:50 (mass/mass) de carne/salmoura (Schmidt et al., 2009).

Durante a salga úmida, as amostras de carne foram retiradas do recipiente de acordo com os tempos de amostragem (0, 1, 3, 5, 8, 11, 15, 20, 40, 60 horas), sendo suavemente enxugadas com papel de filtro para a remoção do excesso de salmoura. Após, o conteúdo de água foi determinado pela secagem das amostras a 105 °C em estufa até massa constante (AOAC, 2007) e o conteúdo de cloretos determinado pela quantificação dos cloretos de acordo com o método de Möhr (AOAC, 2007).

Com isso, a perda de água (PA) foi calculada através da diferença entre o conteúdo de água inicial e o conteúdo de água após a salga úmida; e o ganho de sal (GS) foi calculado através da diferença entre o conteúdo de cloretos após a salga úmida e o conteúdo inicial de cloretos. O modelo de Peleg (1988) foi utilizado para comparar as taxas de transferência de massa. Dois lotes independentes foram preparados em dias diferentes. Todas as determinações analíticas foram realizadas em triplicata.

2.5 Isotermas de sorção

Após o conhecimento da cinética de ganho de sal, novas amostras de carne foram salgadas para obter concentrações específicas de NaCl e de KCl na carne salgada afim de avaliar o efeito de diferentes conteúdos de NaCl e de KCl sobre as propriedades de sorção de água de carne suína salgada. As amostras de carne do tratamento T–NaCl que foram usadas para as isotermas foram retiradas durante 0, 3, 8, 15 e 40 horas e as amostras de carne do tratamento T–KCl foram retiradas durante 0, 3, 8, 11, 20 e 40 horas. Os diferentes tempos de amostragem foram realizados para obter concentrações próximas de NaCl e de KCl na carne salgada.

As isotermas de sorção de água foram determinadas através do método gravimétrico estático em cinco temperaturas (5, 10, 20, 30 e 40 °C) que simulam condições de armazenamento e de secagem de carnes e produtos cárneos. As amostras (aproximadamente 1 g $\pm$ 0,1 mg) foram pesadas em balança analítica (AUY220, Shimadzu, Kyoto, Japão) com precisão de 0,1 mg. Após, as amostras foram colocadas em recipientes de 80 mL e acondicionadas em dessecadores contendo quatorze soluções salinas saturadas com diferentes sais (LiBr, LiCl, LiI, MgCl₂, NaI, K₂CO₃, Mg(NO₃)₂, NaBr, KI, NaCl, (NH₄)₂SO₄, KCl, KNO₃, K₂SO₄). Essas soluções salinas saturadas foram usadas para atingir um intervalo de umidade relativa entre

7.43% e 98.48%. As diferentes temperaturas foram simuladas em uma câmara tipo BOD (MA415, Marconi, Piracicaba, Brasil). As umidades de equilíbrio (X_{eq}) foram obtidas através da diferença de massa em relação à umidade inicial. Após, os gráficos de isotermas de sorção de água da carne suína salgada foram plotados usando os valores de umidade de equilíbrio (X_{eq}) em cada temperatura versus atividade de água (a_w).

2.6 Modelagem das isotermas de sorção

Quatro modelos matemáticos (teóricos, empíricos e semiempíricos) comumente utilizados para descrever as isotermas de sorção de carnes e produtos cárneos foram testados para ajustar as isotermas de sorção de água da carne suína salgada (Tabela 1).

Tabela 1. Modelos usados para ajustar as isotermas de sorção da carne suína salgada.

Modelo	Equação	
GAB	$X_{eq} = \frac{X_m C k a_w}{(1 - k a_w)(1 + (C - 1) k a_w)}$	(1)
Peleg	$X_{eq} = k_1 a_w^{n_1} + k_2 a_w^{n_2}$	(2)
Oswin	$X_{eq} = M \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^N$	(3)
Henderson	$X_{eq} = \left(-\frac{1}{H_1} \ln(1 - a_w) \right)^{\frac{1}{H_2}}$	(4)

C, k, k₁, n₁, k₂, n₂, M, N, H₁ e H₂ são parâmetros dos modelos matemáticos utilizados, a_w é a atividade de água (umidade relativa das soluções salinas, decimal), X_{eq} é o teor de umidade de equilíbrio (seco base) e X_m é o teor de umidade da monocamada (base seca).

O ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais foi realizado através de regressões não lineares por meio do software OriginPro 8.0 (OriginLab Corporation, Northampton, MA, EUA).

2.7 Calor isostérico líquido de sorção

O comportamento de sorção de água dos alimentos é dependente da temperatura. Essa dependência pode ser avaliada pelo calor isostérico líquido de sorção, que representa a energia necessária para adsorver moléculas de água nos sítios ativos da matriz alimentar (Rizvi, 2005). De acordo com Rizvi (2005), o calor isostérico líquido de sorção pode ser determinado a partir da inclinação da equação de Clausius-Clapeyron (Equação (5)).

$$\left. \frac{\partial(\ln aw)}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)} \right|_{x_{eq}} = -\frac{Q_{st}-\lambda}{R} = -\frac{q_{st}}{R} \quad (5)$$

A atividade de água na umidade de equilíbrio fixa foi obtida de acordo com o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais de isothermas de sorção. T é a temperatura absoluta (K); R é a constante universal dos gases (8,314 J/ molK).

2.8 Análise estatística

Os resultados da composição química foram expressos como média e erro padrão da média. O coeficiente de determinação ajustado (R_{Adj}^2), χ^2 reduzido e a raiz do quadrado médio do erro (RQME) foram obtidos através do software matemático OriginPro 8.0 (OriginLab Corporation, Northampton, MA), e usados para avaliar a qualidade do ajuste dos modelos aos dados experimentais. Coeficientes de determinação ajustado (R_{Adj}^2) próximos de 1; χ^2 reduzido e RQME próximos de 0 demonstram grande precisão do modelo para predizer os dados experimentais (Vega-Gálvez et al., 2010).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Composição química

Os resultados da composição química da carne suína salgada são apresentados nas Tabelas 2 e 3. O conteúdo de água da carne suína salgada utilizando KCl variou de 67.88 a 57.84 g/100g, e o conteúdo de água da carne suína salgada utilizando NaCl variou de 67.80 a 59.46 g/100g apresentando diferenças entre os tratamentos. Houve redução ($p \leq 0.05$) do teor de água da carne suína em função do aumento do conteúdo de sal na carne suína salgada. Provavelmente o processo de salga úmida desidratou o tecido muscular e reduziu a atividade da água da carne devido à difusão do sal no tecido, o que causou a perda de água livre por osmose (Martins et al., 2015).

Tabela 2. Composição química da carne suína in natura e com diferentes conteúdos de KCl na carne salgada.

Parâmetro (g/100g)	Conteúdo de KCl na carne salgada (Base úmida)						SEM	P valor
	0%	10,7%	17,1%	21,1%	26,1%	29,8%		
Umidade	67.88 ^a	64.01 ^b	61.85 ^c	61.64 ^c	59.55 ^d	57.84 ^e	0.780	<0.01
Proteínas	22.29 ^a	22.15 ^a	22.03 ^a	21.64 ^b	20.38 ^c	20.77 ^c	0.182	<0.01
Gordura	8.79 ^b	8.65 ^b	8.57 ^b	8.62 ^b	9.69 ^a	9.62 ^a	0.146	<0.01
Cinzas	1.01 ^f	4.26 ^e	6.34 ^d	7.89 ^c	9.60 ^b	10.68 ^a	0.794	<0.01

Tabela 3. Composição química da carne suína in natura e com diferentes conteúdos de NaCl na carne salgada.

Parâmetro (g/100g)	Conteúdo de NaCl na carne salgada (Base úmida)					SEM	P valor
	0%	9,3%	15,6%	20,6%	26,6%		
Umidade	67.80 ^a	64.83 ^b	63.78 ^c	61.34 ^d	59.46 ^e	0.775	<0.01
Proteínas	21.29 ^b	22.28 ^a	21.57 ^{ab}	21.57 ^{ab}	20.87 ^b	0.145	<0.01
Gordura	8.79 ^a	8.57 ^a	7.88 ^b	8.45 ^a	8.50 ^a	0.148	<0.01
Cinzas	1.01 ^e	3.48 ^d	5.46 ^c	7.32 ^b	9.60 ^a	0.797	<0.01

Para o teor de cinzas da carne suína salgada utilizando KCl, os resultados variaram de 1.01 a 10.68 g/100g, e o conteúdo de cinzas da carne suína salgada utilizando NaCl variou de 1.01 a 9.60 g/100g, apresentando diferenças entre os tratamentos.

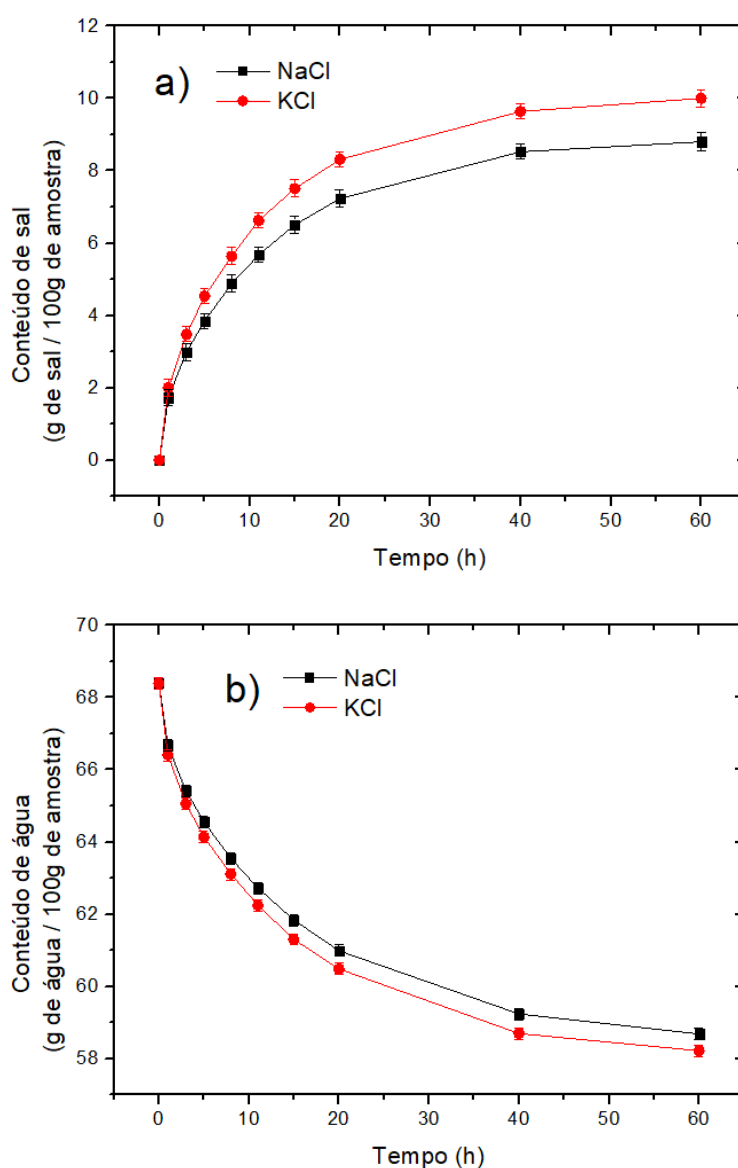
Houve aumento ($p \leq 0.05$) do teor de cinzas em função do aumento do conteúdo de sal na carne suína salgada. O maior tempo de salga úmida causou uma maior difusão de sal na carne salgada, o que aumentou o conteúdo de cinzas, que são os compostos inorgânicos, representados pelos sais. Os conteúdos de proteínas e gorduras variaram significativamente ($p \leq 0.05$), não apresentando uma tendência clara entre os tratamentos. Essas pequenas variações podem ser atribuídas a diferenças inatas à matéria-prima, mas também podem ser decorrentes à extensão da salga úmida. Vale ressaltar que a carne e os produtos de carne suína são fontes valiosas de nutrientes, incluindo proteínas de alto valor biológico (Wood, 2017) e ácidos graxos poli-insaturados (PUFA), incluindo ômega 3 e ômega 6 (Iko Afé et al., 2020; Janiszewski et al., 2016; Olsen et al., 2007) que são essenciais para a dieta humana.

3.2 Cinética de salga úmida de carne suína

A Figura 1 apresenta a cinética do conteúdo de sal (Figura 1-a) e de água (Figura 1-b) em carne suína após a salga úmida utilizando salmouras saturadas de NaCl (T-NaCl) e de KCl (T-KCl).

As curvas cinéticas do conteúdo de sal e do conteúdo de água apresentaram um comportamento semelhante. O conteúdo de sal aumentou ($p < 0.05$) com o aumento do tempo de salga úmida. Em contraste, o conteúdo de água diminuiu ($p < 0.05$) com o aumento do tempo de salga úmida. Observando as curvas cinéticas, nota-se também que as taxas de ganho de sal e de perda de água ocorrem de maneira mais rápida nos estágios iniciais do processo, diminuindo gradualmente ao longo do tempo de salga úmida. Esse fato provavelmente está relacionado ao maior gradiente de concentração entre a carne suína e a salmoura (Siró et al., 2009) logo nos estágios iniciais do processo.

Figura 1. Cinética de ganho de sal (a) e perda de água (b) em carne suína salgada em salmouras saturadas de NaCl e de KCl.



Fonte: elaborado pelo autor.

Em relação aos diferentes sais, T-KCl apresentou um maior ($p < 0.05$) ganho de sal e uma maior ($p < 0.05$) perda de água, quando comparada ao T-NaCl. O modelo de Peleg (1988) foi utilizado para comparar as taxas de transferência de massa e a perda de água e o ganho de sal em condições de equilíbrio. O modelo apresentou R^2_{ajustado} acima de 0,9918, podendo ser utilizado para descrever as curvas cinéticas. Com relação as constantes do modelo, os valores de k_1 são representativos da transferência de massa, sendo que o inverso desse parâmetro fornece informações sobre a taxa inicial de perda de água ou de ganho de sal, ou seja, menores valores de k_1 indicam taxas iniciais mais altas de perda de água ou ganho de sal (Peleg, 1988).

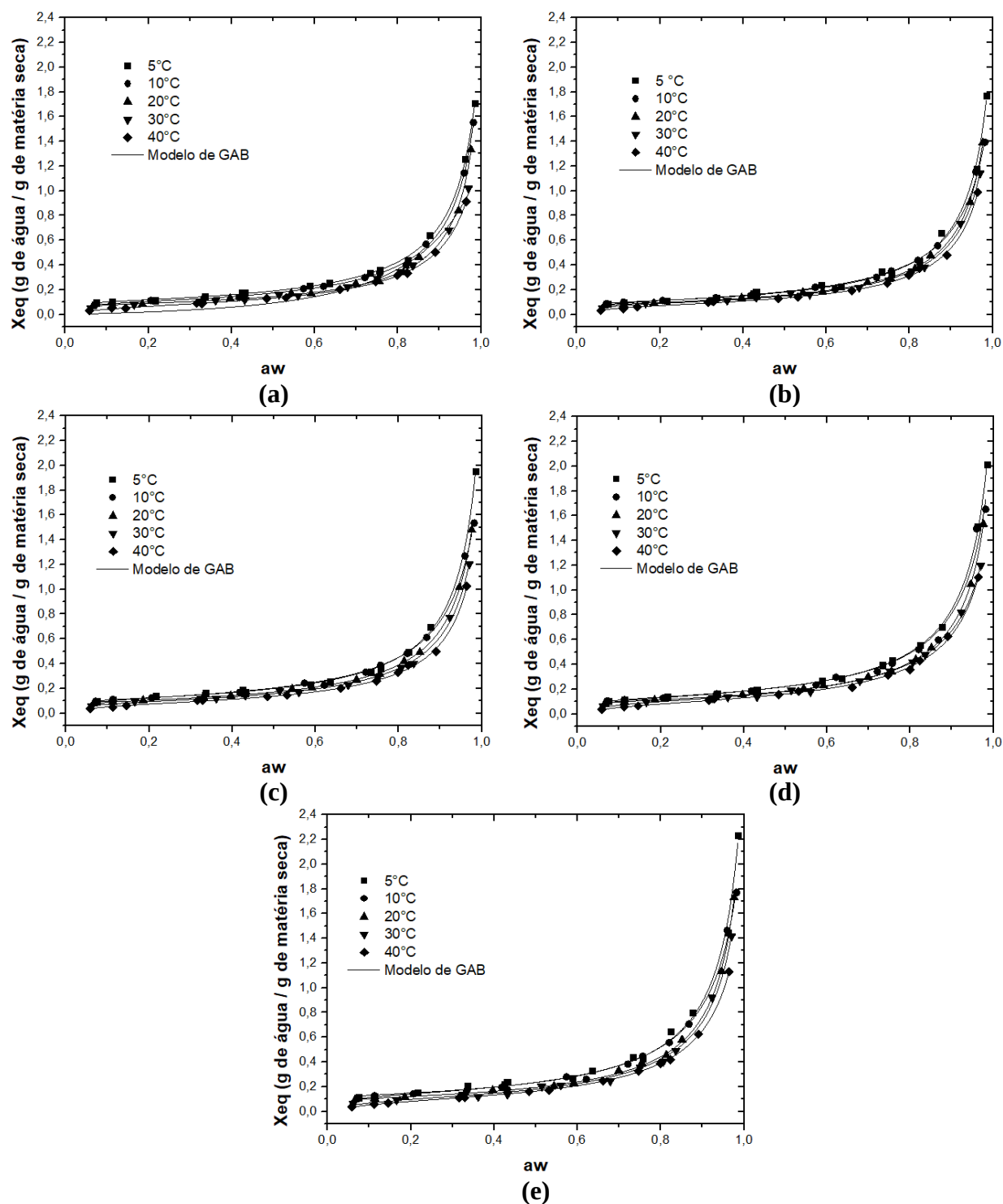
Já os resultados da constante de capacidade (k_2) pode ser utilizada para estimar a perda de água ou o ganho de sal em situação de equilíbrio ($1/k_2$). Dessa forma, o modelo apresentou maior ($p < 0.05$) taxa inicial de perda de água ($k_1 = 0,478 \text{ h} \cdot (\text{g}/100\text{g})^{-1}$) para o T-KCl, quando comparado a taxa inicial de perda de água para o T-NaCl ($k_1 = 0,594 \text{ h} \cdot (\text{g}/100\text{g})^{-1}$) e maior ($p < 0.05$) perda de água em equilíbrio para o T-KCl ($k_2 = 0.058 \text{ (g de água}/100\text{g de amostra)}^{-1}$), quando comparado a perda de água em equilíbrio para o T-NaCl ($k_2 = 0.070 \text{ (g de água}/100\text{g de amostra)}^{-1}$). Em relação ao conteúdo de sal, o modelo apresentou uma maior ($p < 0.05$) taxa inicial de ganho de sal ($k_1 = 0,586 \text{ h} \cdot (\text{g}/100\text{g})^{-1}$) e um maior ganho de sal em equilíbrio ($k_2 = 0,094 \text{ (g de sal}/100\text{g de amostra)}^{-1}$) para T-KCl, quando comparado a taxa inicial de ganho de sal ($k_1 = 0,716 \text{ h} \cdot (\text{g}/100\text{g})^{-1}$) e ganho de sal em equilíbrio ($k_2 = 0,102 \text{ (g de sal}/100\text{g de amostra)}^{-1}$) para o T-NaCl.

De acordo com Barat et al. (2011), uma possível razão para essa difusão mais rápida do K^+ é sua menor densidade de carga quando comparada aos íons Na^+ , resultando em uma menor interação eletrostática do K^+ com as proteínas da carne, facilitando sua difusão. Zhang et al. (2020) também relataram que ao usar a mesma proporção de sal (NaCl ou KCl) na salmoura, a concentração molar de íons K^+ na carne de porco salgada aumenta mais do que a de Na^+ . Além disso, Martínez-Alvarez & Gómez-Guillén (2013) relataram que a adição de KCl na salmoura aumentou a perda de água, a absorção de sal e a dureza dos filetes de bacalhau. Como o KCl é aparentemente o sal que apresenta o maior potencial para a substituição parcial do NaCl em formulações de produtos cárneos (Barretto et al., 2018, 2020; Vidal et al., 2019a; 2019b; 2020), essas informações são importantes para a indústria de carnes e precisam ser levados em consideração no processamento de produtos cárneos.

3.3 Isotermas de sorção de água da carne suína salgada

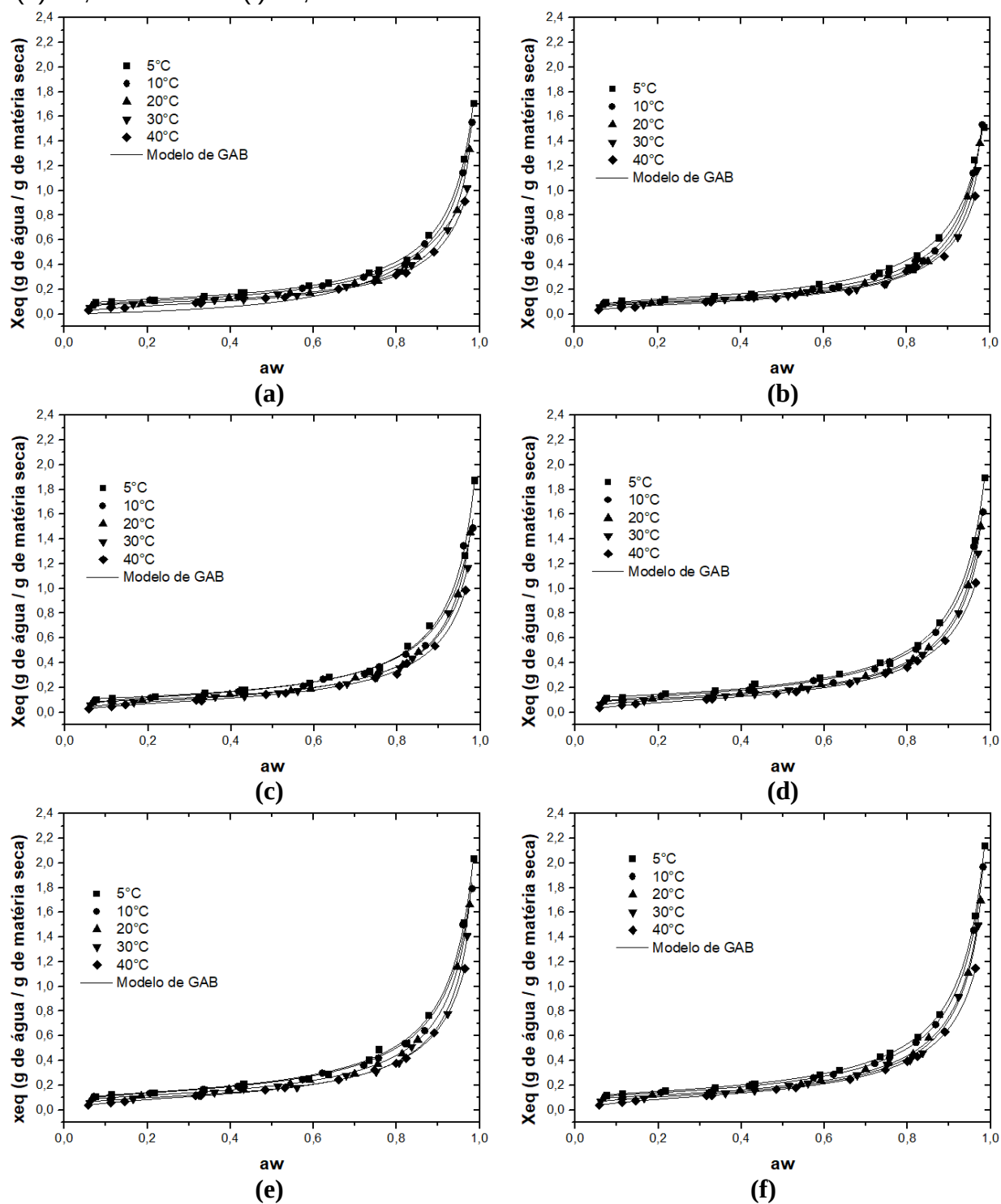
As Figuras 2, 3, 4 e 5 apresentam as isotermas de sorção de água da carne salgada utilizando diferentes concentrações de NaCl (0%, 9,3%, 15,6%, 20,6% e 26,6%) e de KCl (0%, 10,7%, 17,1%, 21,1%, 26,1% e 29,8%) em quatro temperaturas que simulam condições de armazenamento e de secagem (5, 10, 20, 30 e 40 °C).

Figura 2. Efeito da temperatura nas isotermas de sorção de água de carne suína salgada com: (a) 0% de NaCl; (b) 9,3% de NaCl; (c) 15,6% de NaCl; (d) 20,6% de NaCl e (e) 26,6% de NaCl.



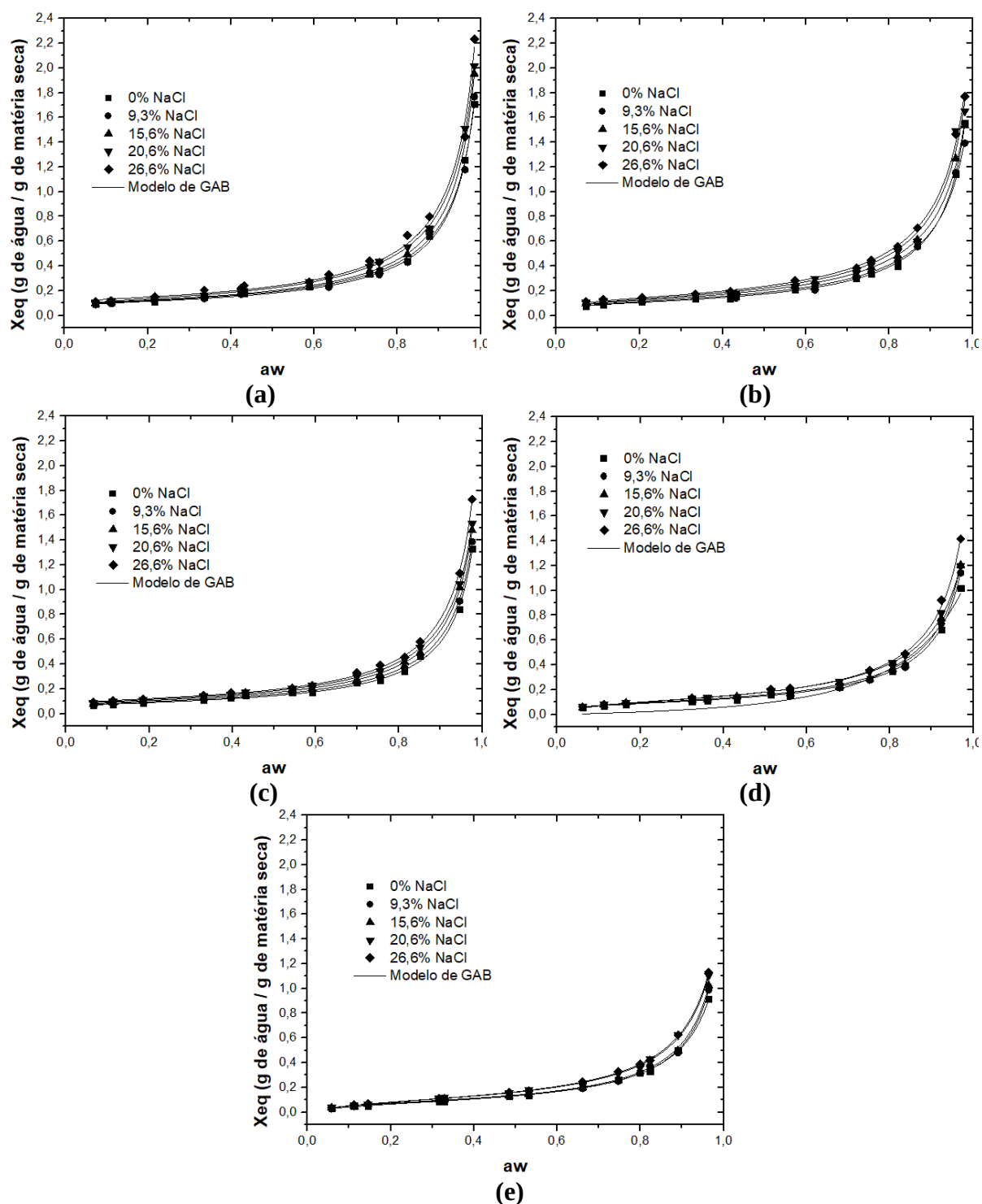
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 3. Efeito da temperatura nas isotermas de sorção de água de carne suína salgada com: (a) 0% de KCl; (b) 10,7% de KCl; (c) 17,1% de KCl; (d) 21,1% de KCl; (e) 26,1% de KCl e (f) 29,8% de KCl.



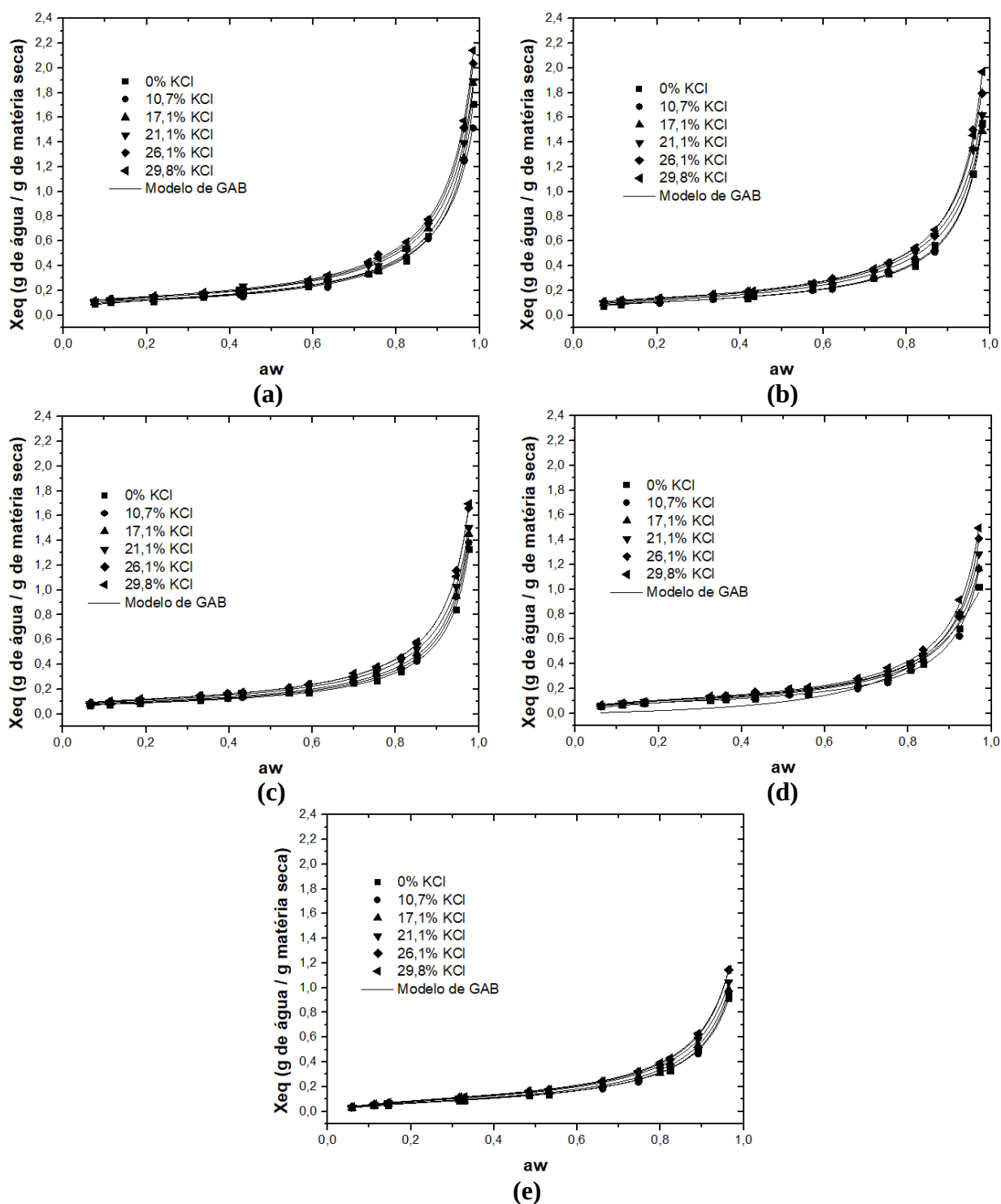
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 4. Efeito da concentração de NaCl nas isotermas de sorção de água de carne suína salgada em temperaturas de (a) 5 °C; (b) 10 °C; (c) 20 °C; (d) 30 °C e (e) 40 °C.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 5. Efeito da concentração de KCl nas isotermas de sorção de água de carne suína salgada em temperaturas de (a) 5 °C; (b) 10 °C; (c) 20 °C; (d) 30 °C e (e) 40 °C.



Fonte: elaborado pelo autor.

De acordo com a classificação de Brunauer et al. (1940) que trata sobre a teoria da adsorção de Van der Waal, as isotermas de sorção da carne salgada utilizando diferentes concentrações de NaCl ou KCl apresentaram as características de sorção

típica de produtos alimentícios com alto teor de proteína ou sais, que corresponde ao tipo III (Erbaş et al., 2016). Esse comportamento também foi observado em outros produtos cárneos salgados como o presunto cru (Betiol et al., 2020), carne bovina salgada (Aykın-Dinçer & Erbaş, 2018), carne de tambaqui salgada (Molina-Filho et al., 2006), file de pirarucu (*Arapaima gigas*) salgado (Martins et al., 2015), carne de jacaré (*Caiman crocodilus yacare*) salgada (Lopes Filho et al., 2002) e carne bovina e suína curada e cozida (Delgado & Sun, 2002a).

As isotermas de sorção de água das Figuras 2, 3, 4 e 5 mostram três regiões diferentes: região I ($a_w < 0.30$), região II ($0.30 < a_w < 0.70$) e região III ($a_w > 0.70$). Na região I, a sorção de água ocorre de forma lenta, e a água presente nesta região está relacionada com a umidade da monocamada, que se encontra fortemente ligada à matriz do produto. Nessa região, as proteínas da carne suína são os principais locais de sorção de água (Jayaraj Rao et al., 2006), porém, é possível haver uma dissolução local dos constituintes solúveis, como a solubilização de sal na superfície da carne suína. A combinação dessas forças físicas e químicas resultam na sorção inicial (monocamada) de água na carne (Shi et al., 2016). A região II apresenta um aumento da sorção de água de forma quase linear, que representa a água adsorvida em várias camadas da carne. Nessa região, a sorção ocorre em locais menos ativos.

A região III ($a_w > 0.70$) mostra um aumento acentuado da sorção de água na carne salgada utilizando NaCl ou KCl. Nessa região de elevada atividade de água, os sais dentro da carne se encontram na forma solubilizada, causando um rápido aumento da sorção de água, em relação a pequenos aumentos de atividade de água. Isso provavelmente ocorre devido a presença dos sais, que podem romper o sarcômero, causando uma dispersão entre as proteínas e o sarcômeros, permitindo uma maior retenção de água na carne (Aktaş & Gürses, 2005). Essa região é composta por moléculas de água fracamente ligada à matriz do produto e que estão disponíveis para reações químicas e microbiológicas (Polachini et al., 2016; Rosa et al., 2021). Entretanto, em atividades de água inferior ao ponto de saturação dos sais (NaCl a 5°C = 0,7565; NaCl a 40 °C = 0,7468) e (KCl a 5°C = 0,8767; KCl a 40 °C = 0,8232), os mesmos se encontram na forma cristalizada, absorvendo pouca ou nenhuma água. Essas observações também foram relatadas por Aykın-Dinçer & Erbaş (2018) e Betiol et al. (2020).

3.4 Efeito da temperatura nas isotermas de sorção de água da carne suína salgada

Como os alimentos são expostos a diferentes temperaturas durante as operações de processamento e principalmente durante o processo de armazenamento, é de extrema importância o conhecimento do impacto da temperatura nas isotermas de sorção de água dos alimentos (Al-Muhtaseb et al., 2002), pois a atividade de água varia com a temperatura. Por isso a temperatura é um dos fatores mais estudados (Barretto et al., 2018; Betiol et al., 2020; Comaposada et al., 2000) nas isotermas de sorção de produtos cárneos salgados.

As Figuras 2 e 3 mostram o efeito da temperatura sobre as isotermas de sorção de água da carne suína salgada. Observando em uma mesma atividade de água, o aumento da temperatura reduziu a umidade de equilíbrio da carne suína salgada, mostrando que a carne salgada adsorve mais água em baixas temperaturas, quando comparado à altas temperaturas. O aumento da temperatura aumenta a mobilidade das moléculas de água, tornando as ligações menos estáveis, fazendo com que se separem dos locais de ligação de água, reduzindo a umidade de equilíbrio (Al-Muhtaseb et al., 2002; McMinn & Magee, 2003) da carne salgada.

Outro ponto interessante a ser observado é que as curvas de sorção não apresentaram interseção ou ponto de cruzamento com o aumento da temperatura. Shi et al. (2016) relataram que em alta atividade de água, as isotermas de adsorção de carne de *Penaeus vannameia* mostraram uma intersecção do ponto de cruzamento com o aumento da temperatura. Os autores ressaltam que esse fenômeno pode ser devido às mudanças na ligação da água, e que o ponto de intersecção depende da composição do alimento e da solubilidade dos carboidratos e proteínas.

3.5 Efeito do conteúdo de sal nas isotermas de sorção de água da carne suína salgada

O conteúdo de sal na carne suína salgada após a salga com KCl foram: 10,7%; 17,1%; 21,1%; 26,1% e 29,8% e para a carne suína salgada com NaCl foram: 9,3%; 15,6%; 20,6% e 26,6%. Essas diferenças são decorrentes da extensão do tempo de salga úmida e da diferença entre as taxas de transferência de massa do NaCl e do KCl. As isotermas de sorção de carne salgada com um conteúdo diferente de NaCl e de KCl em diferentes temperaturas são mostradas nas Figuras 4 e 5. As curvas de

sorção mostraram que a umidade de equilíbrio aumentou devido ao aumento do conteúdo de NaCl e de KCl na carne salgada. De acordo com Comaposada et al. (2000), acima do ponto de saturação dos sais, os mesmos se ligam à água e, consequentemente, em altas atividades de água, a umidade de equilíbrio da carne salgada aumenta.

Comparando as isotermas de sorção de água da carne salgada com 26% de NaCl e as isotermas da carne salgada com 26% de KCl, em uma mesma temperatura, nota-se que as isotermas de sorção de água da carne salgada com NaCl obteve uma maior umidade de equilíbrio, principalmente a 5 °C. Nota-se também que, nas isotermas da carne salgada com 15% de NaCl e nas isotermas da carne salgada com 17% de KCl, em uma mesma temperatura, a umidade de equilíbrio da carne salgada com NaCl é ligeiramente superior ou próxima a umidade de equilíbrio da carne salgada com KCl, mesmo o NaCl estando em uma menor conteúdo na carne salgada. Isso pode estar relacionado ao fato de que os íons caotrópicos, como os íons K^+ causam um efeito negativo de hidratação, que desestabiliza a conformação da proteína e aumenta a perda de água, ao contrário dos íons cosmotrópicos, como os íons Na^+ , que causam um efeito positivo de hidratação, estabilizando as conformações nativas de muitas proteínas e melhoram a capacidade de retenção de água do tecido de carne (Barbosa et al., 2017). De fato, alguns estudos (Bampi et al., 2016; Vidal et al., 2019) relataram uma menor capacidade de reduzir a atividade de água da carne salgada usando KCl, quando comparado ao NaCl.

3.6 Modelagem matemática das isotermas de sorção

A aplicação de modelos matemáticos é importante e contribui não só para a simulação e otimização de processos da indústria de alimentos, mas também contribui em termos de design de equipamentos e para a melhoria da qualidade do produto (Aykın-Dinçer & Erbaş, 2018). Quatro modelos matemáticos de isotermas de sorção de água (Tabela 1) foram ajustados aos dados experimentais de sorção de água da carne salgada com diferentes conteúdos de NaCl e de KCl em diferentes temperaturas. Todos os modelos testados (GAB, Peleg, Oswin e Henderson) foram capazes de descrever satisfatoriamente as isotermas de sorção de água da carne suína salgada, tendo como base os parâmetros de ajuste como R^2_{adj} acima de 0,984 e valores de χ^2 e RMSE abaixo de $3,85E^{-03}$ e $9,94E^{-02}$, respectivamente. Entre os

modelos testados, GAB foi o que apresentou o melhor ajuste e o menor RMSE em todas as condições experimentais estudadas.

Vários estudos já publicados sobre as isotermas de sorção de carnes e produtos cárneos (Ahmat et al., 2014; Aykın & Erbaş, 2016; Barretto et al., 2018; Betiol et al., 2020; Clemente et al., 2009; Hubinger et al., 2009; Lopes Filho et al., 2002; Martins et al., 2015; Sánchez-Torres et al., 2021; Trujillo et al., 2003) concluíram que GAB é o modelo mais adequado para descrever as isotermas de sorção de água desses produtos. De acordo com Telis et al. (2000) e Al-Muhtaseb et al. (2004) GAB é o modelo mais versátil encontrado na literatura para simular as isotermas de sorção de água dos alimentos. Esse modelo possui a vantagem de seus parâmetros terem significado físico, ao contrário dos modelos empíricos. Por exemplo, o parâmetro X_m representa o teor de umidade da monocamada (X_m), que representa o papel da primeira camada de água que cobre a superfície do sorvente. Ela fornece informações sobre o estado da água no produto (Staudt et al., 2013), sendo um importante indicador para controlar a estabilidade dos alimentos, principalmente durante o período de vida útil (Al-Muhtaseb et al., 2002; Yan et al., 2012). Acima da umidade da monocamada estão as multicamadas de água, que apresentam menor interação com a matriz alimentar, quando comparada a monocamada (Quirijns et al., 2005).

As Tabelas 4 e 5 mostram os parâmetros de ajuste do modelo GAB para a carne salgada com diferentes conteúdos de KCl e de NaCl em diferentes temperaturas. Olhando em relação a mesma temperatura, os resultados de X_m do modelo de GAB aumentaram em decorrência do aumento do conteúdo de NaCl e de KCl na carne suína salgada. Como relatado anteriormente, acima do ponto de saturação dos sais, os mesmos se ligam à água e, conseqüentemente, em altas atividades de água, o teor de água da carne em equilíbrio é visivelmente modificado. Entretanto, abaixo do ponto de saturação dos sais, como na região da monocamada, os sais podem adsorver pouca água (Comaposada et al., 2000), o que pode explicar o aumento dos valores da monocamada em decorrência do aumento do conteúdo de sal na carne salgada.

Tabela 4. Parâmetros de ajuste do modelo GAB para a carne salgada em diferentes concentrações de NaCl em diferentes temperaturas.

Tratamentos					
	0%	9,3%	15,6%	20,6%	26,6%
	NaCl	NaCl	NaCl	NaCl	NaCl
5 °C					
X_m	0,100	0,094	0,097	0,117	0,122
C	90,548	125,122	100,0	53,394	206,790
K	0,956	0,960	0,963	0,956	0,958
χ²	1,85E ⁻⁰⁴	1,17E ⁻⁰³	1,61E ⁻⁰³	1,54E ⁻⁰⁴	2,81E ⁻⁰³
R²_{adj}	0,999	0,994	0,996	0,999	0,992
RQME	1,36E ⁻⁰²	3,43E ⁻⁰²	9,94E ⁻⁰²	1,24E ⁻⁰²	5,30E ⁻⁰²
10 °C					
X_m	0,092	0,100	0,110	0,119	0,127
C	43,954	37,541	37,571	31,693	37,552
K	0,958	0,947	0,947	0,948	0,947
χ²	1,54E ⁻⁰⁴	5,81E ⁻⁰⁴	7,05E ⁻⁰⁴	3,85E ⁻⁰³	9,38E ⁻⁰⁴
R²_{adj}	0,999	0,996	0,996	0,984	0,996
RQME	1,24E ⁻⁰²	2,41E ⁻⁰²	2,66E ⁻⁰²	6,21E ⁻⁰²	3,06E ⁻⁰²
20 °C					
X_m	0,075	0,081	0,089	0,097	0,101
C	80,597	72,067	67,271	81,818	109,332
K	0,965	0,963	0,962	0,959	0,964
χ²	3,89E ⁻⁰⁴	1,27E ⁻⁰⁴	1,10E ⁻⁰⁴	3,34E ⁻⁰⁵	1,86E ⁻⁰⁴
R²_{adj}	0,996	0,999	3,23E ⁻⁰⁵	0,999	0,999
RQME	1,97E ⁻⁰²	1,13E ⁻⁰²	1,00E ⁻⁰²	5,78E ⁻⁰³	1,37E ⁻⁰²
30 °C					
X_m	0,076	0,080	0,085	0,101	0,100
C	39,750	30,771	30,697	16,330	14,804
K	0,954	0,958	0,958	0,944	0,958
χ²	2,31E ⁻⁰⁴	2,29E ⁻⁰⁴	2,55E ⁻⁰⁴	2,34E ⁻⁰⁴	6,20E ⁻⁰⁴
R²_{adj}	0,996	0,997	0,997	0,997	0,995
RQME	1,52E ⁻⁰²	1,51E ⁻⁰²	1,60E ⁻⁰²	1,53E ⁻⁰²	2,49E ⁻⁰²
40 °C					
X_m	0,078	0,074	0,077	0,094	0,097
C	8,837	13,887	13,902	9,295	8,804
K	0,949	0,959	0,959	0,949	0,948
χ²	4,03E ⁻⁰⁵	1,37E ⁻⁰⁴	1,47E ⁻⁰⁴	1,82E ⁻⁰⁴	3,22E ⁻⁰⁵
R²_{adj}	0,999	0,997	0,997	0,997	0,999
RQME	6,35E ⁻⁰³	1,17E ⁻⁰²	1,21E ⁻⁰²	1,35E ⁻⁰²	5,68E ⁻⁰³

Tabela 5. Parâmetros de ajuste do modelo GAB para a carne salgada em diferentes concentrações de KCl em diferentes temperaturas.

	Tratamentos					
	0% KCl	10,7% KCl	17,1% KCl	21,1% KCl	26,1% KCl	29,8% KCl
5 °C						
X_m	0,100	0,107	0,105	0,119	0,123	0,126
C	90,548	37,050	257,981	194,157	52,515	99,433
K	0,956	0,945	0,957	0,951	0,953	0,955
χ²	1,85E ⁻⁰⁴	6,80E ⁻⁰⁴	1,06E ⁻⁰³	2,71E ⁻⁰⁴	4,94E ⁻⁰⁴	1,86E ⁻⁰⁵
R²_{adj}	0,999	0,996	0,995	0,999	0,998	0,999
RQME	1,36E ⁻⁰²	2,61E ⁻⁰²	3,26E ⁻⁰²	1,65E ⁻⁰²	2,22E ⁻⁰²	4,31E ⁻⁰³
10 °C						
X_m	0,092	0,089	0,107	0,116	0,120	0,117
C	43,954	79,001	31,688	37,550	43,964	96,087
K	0,958	0,959	0,948	0,947	0,951	0,957
χ²	1,54E ⁻⁰⁴	1,46E ⁻⁰⁴	3,13E ⁻⁰³	7,84E ⁻⁰⁴	1,58E ⁻⁰³	2,96E ⁻⁰⁶
R²_{adj}	0,999	0,999	0,984	0,996	0,994	0,999
RQME	1,24E ⁻⁰²	1,21E ⁻⁰²	5,59E ⁻⁰²	2,80E ⁻⁰²	3,98E ⁻⁰²	1,72E ⁻⁰³
20 °C						
X_m	0,075	0,080	0,085	0,095	0,102	0,101
C	80,597	79,971	109,504	81,737	54,565	89,429
K	0,965	0,965	0,964	0,959	0,961	0,963
χ²	3,89E ⁻⁰⁴	1,43E ⁻⁰⁴	1,32E ⁻⁰⁴	3,23E ⁻⁰⁵	1,03E ⁻⁰⁴	2,17E ⁻⁰⁴
R²_{adj}	0,996	0,999	0,999	0,999	0,999	0,998
RQME	1,97E ⁻⁰²	1,20E ⁻⁰²	1,15E ⁻⁰²	5,69E ⁻⁰³	1,02E ⁻⁰²	1,48E ⁻⁰²
30 °C						
X_m	0,076	0,075	0,090	0,093	0,089	0,096
C	39,750	42,403	13,432	23,897	31,798	29,021
K	0,954	0,963	0,953	0,955	0,964	0,964
χ²	2,31E ⁻⁰⁴	8,46E ⁻⁰⁴	5,68E ⁻⁰⁴	9,62E ⁻⁰⁶	5,92E ⁻⁰⁴	3,76E ⁻⁰⁴
R²_{adj}	0,996	0,990	0,994	0,999	0,995	0,997
RQME	1,52E ⁻⁰²	2,91E ⁻⁰²	2,38E ⁻⁰²	3,10E ⁻⁰³	2,43E ⁻⁰²	1,94E ⁻⁰²
40 °C						
X_m	0,078	0,076	0,084	0,093	0,095	0,098
C	8,837	12,259	8,453	8,842	10,375	10,259
K	0,949	0,954	0,949	0,945	0,951	0,949
χ²	4,03E ⁻⁰⁵	4,13E ⁻⁰⁴	1,58E ⁻⁰⁴	2,35E ⁻⁰⁵	3,77E ⁻⁰⁵	1,10E ⁻⁰⁵
R²_{adj}	0,999	0,993	0,997	0,999	0,999	0,999
RQME	6,35E ⁻⁰³	2,03E ⁻⁰²	1,26E ⁻⁰²	4,85E ⁻⁰³	6,14E ⁻⁰³	3,31E ⁻⁰³

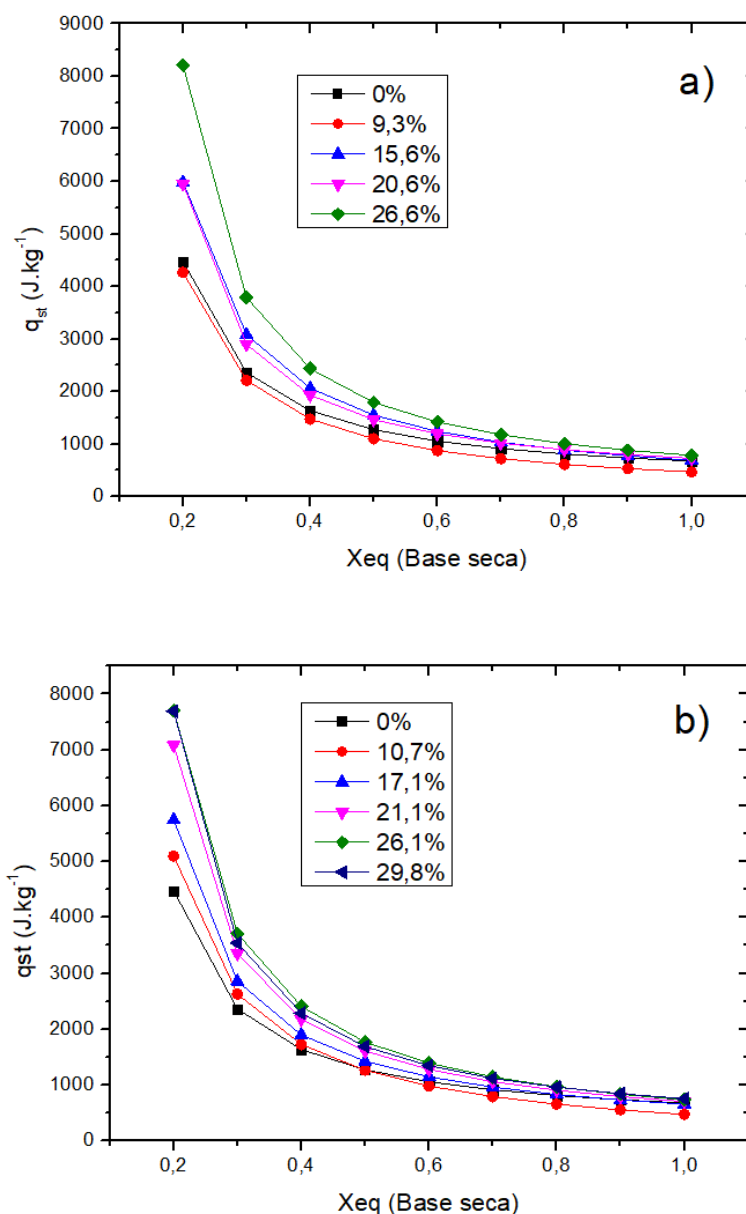
Além do efeito do conteúdo de sal na carne salgada, houve efeito da temperatura sobre os resultados de X_m do modelo de GAB (Tabelas 4 e 5). De modo geral, avaliando apenas o mesmo tratamento, os resultados de X_m do modelo de GAB diminuíram em decorrência do aumento da temperatura, o que pode ser atribuído devido à redução do número de sítios ativos em decorrência das alterações físico-químicas induzidas pela temperatura (Betiol et al., 2020). Esse comportamento também foi observado no presunto cru (Betiol et al., 2020), em carne bovina *in natura* (Ahmat et al., 2014) e em presunto cozido (Barretto et al., 2018).

As variações no parâmetro C e K não mostraram um comportamento claro em relação aos tratamentos. Blahovec (2004) estudou alguns modelos de isotermas de sorção, com enfoque matemático sobre os valores para cada parâmetro dos modelos. Para o modelo de GAB, as isotermas com comportamento do tipo II de Brunauer devem apresentar: $0 < K \leq 1$, $C > 2$ e para o tipo III: $0 < K \leq 1$, $0 \leq C \leq 2$. Apesar dos valores dos parâmetros C obtidos nesse estudo estarem dentro da faixa limitada por esses autores, para o tipo II, as isotermas de sorção da carne suína salgada mostraram um comportamento do tipo III. Além disso, os mesmo autores relataram que as mudanças dos parâmetros C e K , devido ao aumento da temperatura, refletem a mudança da isoterma de sorção da classe II para a classe III da classificação de Brunauer (Blahovec, 2004).

3.7 Calor isostérico líquido de sorção

O calor isostérico líquido de sorção fornece informações importantes sobre o estado da água nos alimentos e é frequentemente utilizado para estimar a quantidade de energia necessária em processos de secagem de alimentos (Koua et al., 2014; Rosa et al., 2021). O calor isostérico líquido de sorção foi determinado para um teor de umidade de equilíbrio variando de 0,2 a 1 g de água/g de matéria seca. A Figura 6 mostra o calor isostérico líquido de sorção de água da carne salgada com diferentes conteúdos de NaCl (a) e de KCl (b).

Figura 6. Calor isostérico líquido de sorção de água da carne salgada com diferentes conteúdos de NaCl (a) e de KCl (b).



Fonte: elaborado pelo autor.

Observa-se um comportamento semelhante entre os tratamentos. O calor isostérico líquido de sorção de água da carne salgada aumentou em consequência da redução da umidade de equilíbrio (X_{eq}), principalmente em regiões abaixo de 0,4 g de água/g de matéria seca. Este comportamento é uma indicação de fortes interações de componentes água-matriz cárnea, mostrando que o processo de secagem requer menos energia quando a carne apresenta um teor de umidade superior a 0,4 g de água/g de matéria seca. Esse aumento do calor de sorção em consequência da redução da umidade é provavelmente devido à existência de sítios polares mais ativos

na superfície do alimento, que são recobertos por moléculas de água envolvendo altas energias de interação, formando uma camada monomolecular. Quando esses sítios são ocupados, a sorção ocorre nos sítios menos ativos envolvendo energias de interação mais baixas (Kabil et al., 2012).

Além dos efeitos da variação da umidade de equilíbrio, observa-se também que o calor isostérico líquido de sorção de água da carne salgada aumentou em consequência do aumento do conteúdo de sal (seja NaCl ou KCl) na carne salgada. Como relatado anteriormente, a presença dos sais decompõe o sarcômero e as proteínas são dispersas dos sarcômeros, o que permite que a carne retenha mais umidade, e essas moléculas de água estão ligadas (através de uma ligação de hidrogênio) aos sítios polares (OH, NH₂) das proteínas (Aktaş & Gürses, 2005), o que pode ter ocasionado um aumento da energia necessária para adsorver moléculas de água nos sítios ativos da matriz cárnea.

4. CONCLUSÕES

As isothermas de sorção de água da carne salgada exibiram comportamento do tipo III e são dependentes da temperatura, do conteúdo e do tipo de sal (NaCl ou KCl) na carne. O aumento da temperatura reduziu a umidade de equilíbrio da carne salgada. Entretanto, a umidade de equilíbrio da carne salgada aumentou devido ao aumento do conteúdo de sal (NaCl ou KCl) na carne salgada. Além disso, em concentrações próximas de NaCl e de KCl na carne salgada, as isothermas da carne salgada com NaCl apresentaram uma maior umidade de equilíbrio quando comparadas as isothermas da carne salgada com KCl. O calor de sorção de água aumentou em consequência da redução da umidade de equilíbrio e/ou do aumento do conteúdo de sal na carne salgada. Dentre os modelos de sorção avaliados, GAB foi o mais adequado para descrever os dados experimentais de sorção em diferentes temperaturas de armazenamento e concentrações de sal na carne salgada.

REFERENCES

Ahmat, T., Bruneau, D., Kuitche, A., & Aregba, A. W. (2014). Desorption isotherms for fresh beef: An experimental and modeling approach. **Meat Science**, 96(4), 1417–1424. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.12.009>

Aktaş, N., & Gürses, A. (2005). Moisture adsorption properties and adsorption isosteric heat of dehydrated slices of Pastirma (Turkish dry meat product). **Meat Science**, 71(3), 571–576. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2005.04.042>

Al-Muhtaseb, A. H., McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (2002). Moisture Sorption Isotherm Characteristics of Food Products: A Review. **Food and Bioproducts Processing**, 80(2), 118–128.
<https://doi.org/10.1205/09603080252938753>

Al-Muhtaseb, A. H., McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (2004). Water sorption isotherms of starch powders: Part 1: mathematical description of experimental data. **Journal of Food Engineering**, 61(3), 297–307.
[https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00133-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00133-X)

AOAC. (2007). **Association of Official Analytical Chemistry**. In: Official methods of analysis to AOAC International. (18th ed.).

Aykin-Dinçer, E., & Erbaş, M. (2018). Drying kinetics, adsorption isotherms and quality characteristics of vacuum-dried beef slices with different salt contents. **Meat Science**, 145, 114–120. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2018.06.007>

Aykin, E., & Erbaş, M. (2016). Quality properties and adsorption behavior of freeze-dried beef meat from the Biceps femoris and Semimembranosus muscles. **Meat Science**, 121, 272–277. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2016.06.030>

Bampi, M., Domschke, N. N., Schmidt, F. C., & Laurindo, J. B. (2016). Influence of vacuum application, acid addition and partial replacement of NaCl by KCl on the mass transfer during salting of beef cuts. **LWT - Food Science and Technology**, 74, 26–33. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2016.07.009>

Barat, J. M., Baigts, D., Aliño, M., Fernández, F. J., & Pérez-García, V. M. (2011). Kinetics studies during NaCl and KCl pork meat brining. **Journal of Food Engineering**, 106(1), 102–110.
<https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2011.04.022>

Barbosa, P. T., Santos, I. C. V., Ferreira, V. C. S., Fragoso, S. P., Araújo, Í. B. S., Costa, A. C. V., Araújo, L. C., & Silva, F. A. P. (2017). Physicochemical properties of low sodium goat kafta. **LWT - Food Science and Technology**, 76, 314–319.
<https://doi.org/10.1016/J.LWT.2016.06.071>

Barretto, T. L., Bellucci, E. R. B., Barbosa, R. D., Pollonio, M. A. R., Romero, J. T., & da Silva Barretto, A. C. (2020). Impact of ultrasound and potassium chloride on the physicochemical and sensory properties in low sodium restructured cooked ham. **Meat Science**, 165, 108130.

<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108130>

Barretto, T. L., Polachini, T. C., Barretto, A. C. da S., & Telis-Romero, J. (2018). Water sorption isotherms of cooked hams as affected by temperature and chemical composition. **Food Science and Technology**, 39, 677-683. <https://doi.org/10.1590/fst.04218>

Barretto, T. L., Pollonio, M. A. R., Telis-Romero, J., & da Silva Barretto, A. C. (2018). Improving sensory acceptance and physicochemical properties by ultrasound application to restructured cooked ham with salt (NaCl) reduction. **Meat Science**, 145, 55–62. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2018.05.023>

Betiol, L. F. L., Evangelista, R. R., Sanches, M. A. R., Basso, R. C., Gullón, B., Lorenzo, J. M., Barretto, A. C. da S., & Telis-Romero, J. (2020). Influence of temperature and chemical composition on water sorption isotherms for dry-cured ham. **LWT - Food Science and Technology**, 123(October 2019), 109112. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109112>

Blahovec, J. (2004). Sorption isotherms in materials of biological origin mathematical and physical approach. **Journal of Food Engineering**, 65(4), 489–495. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2004.02.012>

Bligh, E. G., & Dyer, W. J. (1959). A rapid method of total lipid extraction and purification. **Canadian Journal of Biochemistry and Physiology**, 37(8), 911–917. <https://doi.org/10.1139/o59-099>

Brunauer, S., Deming, L. S., Deming, W. E., & Teller, E. (1940). On the theory of the van der Waals adsorption of gases. **Journal of the American Chemical Society**, 62(7), 1723–1732.

Clemente, G., Bon, J., Benedito, J., & Mulet, A. (2009). Desorption isotherms and isosteric heat of desorption of previously frozen raw pork meat. **Meat Science**, 82(4), 413–418. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2009.02.020>

Comaposada, J., Gou, P., & Arnau, J. (2000). The effect of sodium chloride content and temperature on pork meat isotherms. **Meat Science**, 55(3), 291–295. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(99\)00154-0](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(99)00154-0)

Delgado, A. E., & Sun, D. W. (2002). Desorption isotherms for cooked and cured beef and pork. **Journal of Food Engineering**, 51(2), 163–170. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00053-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00053-X)

Doyle, M. E., & Glass, K. A. (2010). Sodium Reduction and Its Effect on Food Safety, Food Quality, and Human Health. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 9(1), 44–56. <https://doi.org/10.1111/J.1541-4337.2009.00096.X>

Erbaş, M., Aykin, E., Arslan, S., & Durak, A. N. (2016). Adsorption behaviour of bulgur. **Food Chemistry**, 195, 87–90. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2015.06.050>

Freitas, M. L. F., Polachini, T. C., de Souza, A. C., & Telis-Romero, J. (2016). Sorption isotherms and thermodynamic properties of grated Parmesan cheese. **International Journal of Food Science and Technology**, 51(1), 250–259. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12969>

Ge, G., Han, Y., Zheng, J., Zhao, M., & Sun, W. (2020). Physicochemical characteristics and gel-forming properties of myofibrillar protein in an oxidative system affected by partial substitution of NaCl with KCl, MgCl₂ or CaCl₂. **Food Chemistry**, 309, 125614. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2019.125614>

He, F. J., & MacGregor, G. A. (2010). Reducing Population Salt Intake Worldwide: From Evidence to Implementation. **Progress in Cardiovascular Diseases**, 52(5), 363–382. <https://doi.org/10.1016/J.PCAD.2009.12.006>

Hubinger, M. D., Vivanco-Pezantes, D., Kurozawa, L. E., & Sobral, P. J. A. (2009). Desorption isotherms of osmotically dehydrated and smoked Atlantic bonito (Sarda sarda) fillets/Isotermas de dessorcao de file de bonito (Sarda sarda) desidratado osmoticamente e defumado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 13(3), 305–312.

Iko Afé, O. H., Anihouvi, D. G., Assogba, M. F., Anihouvi, E. L., Kpoclou, Y. E., Douny, C., Mahillon, J., Anihouvi, V. B., Scippo, M. L., & Hounhouigan, D. J. (2020). Consumption and nutritional quality of grilled pork purchased from open road-side

restaurants of Benin. **Journal of Food Composition and Analysis**, 92, 103549. <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2020.103549>

Inguglia, E. S., Zhang, Z., Tiwari, B. K., Kerry, J. P., & Burgess, C. M. (2017). Salt reduction strategies in processed meat products – A review. **Trends in Food Science & Technology**, 59, 70–78. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2016.10.016>

Janiszewski, P., Grześkowiak, E., Lisiak, D., Borys, B., Borzuta, K., Pospiech, E., & Poławska, E. (2016). The influence of thermal processing on the fatty acid profile of pork and lamb meat fed diet with increased levels of unsaturated fatty acids. **Meat Science**, 111, 161–167. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2015.09.006>

Jayaraj Rao, K., Heartwin Amala Dhas, P., Magdaline Eljeeva Emerald, F., Ghosh, B. C., Balasubramanyam, B. V., & Kulkarni, S. (2006). Moisture sorption characteristics of chhana podo at 5 °C and 35 °C. **Journal of Food Engineering**, 76(3), 453–459. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2005.04.048>

Kabil, E., Aktaş, N., & Balci, E. (2012). Effect of sodium chloride, sodium nitrite and temperature on desorption isotherms of previously frozen beef. **Meat Science**, 90(4), 932–938. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2011.11.035>

Koua, B. K., Koffi, P. M. E., Gbaha, P., & Toure, S. (2014). Thermodynamic analysis of sorption isotherms of cassava (*Manihot esculenta*). **Journal of Food Science and Technology**, 51(9), 1711–1723. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0687-y>

Lopes Filho, J. F., Romanelli, P. F., Barboza, S. H. R., Gabas, A. L., & Telis-Romero, J. (2002). Sorption isotherms of alligator's meat (*Caiman crocodilus yacare*). **Journal of Food Engineering**, 52(2), 201–206. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00105-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00105-4)

Lorenzo, J. M., Cittadini, A., Bermúdez, R., Munekata, P. E., & Domínguez, R. (2015). Influence of partial replacement of NaCl with KCl, CaCl₂ and MgCl₂ on proteolysis, lipolysis and sensory properties during the manufacture of dry-cured lacón. **Food Control**, 55, 90–96. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2015.02.035>

Martínez-Alvarez, O., & Gómez-Guillén, C. (2013). Influence of mono- and divalent salts on water loss and properties of dry salted cod fillets. **LWT - Food Science and Technology**, 53(2), 387–394.

<https://doi.org/10.1016/J.LWT.2013.04.013>

Martins, M. G., Martins, D. E. G., & Pena, R. da S. (2015). Drying kinetics and hygroscopic behavior of pirarucu (*Arapaima gigas*) fillet with different salt contents. **LWT - Food Science and Technology**, 62(1), 144–151.

<https://doi.org/10.1016/J.LWT.2015.01.010>

McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (2003). Thermodynamic properties of moisture sorption of potato. **Journal of Food Engineering**, 60(2), 157–165.

[https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00036-0)

Molina-Filho, L., Angélica, M., Pedro, M., Telis-Romero, J., & Romeiro Barboza, S. H. Influência da temperatura e da concentração do cloreto de sódio (NaCl) nas isotermas de sorção da carne de tambaqui (*Colossoma macroparum*). **Food Science and Technology**, 26, 453-458.

Monteiro, G. M., Souza, X. R., Costa, D. P. B., Faria, P. B., & Vicente, J. (2017). Partial substitution of pork fat with canola oil in Toscana sausage. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 44, 2–8.

<https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2017.07.013>

Olsen, E. F., Rukke, E. O., Flåtten, A., & Isaksson, T. (2007). Quantitative determination of saturated-, monounsaturated- and polyunsaturated fatty acids in pork adipose tissue with non-destructive Raman spectroscopy. **Meat Science**, 76(4), 628–634.

<https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2007.02.004>

Peleg, M. (1988). An Empirical Model for the Description of Moisture Sorption Curves. **Journal of Food Science**, 53(4), 1216–1217.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1988.tb13565.x>

Pérez-Santaescolástica, C., Fraeye, I., Barba, F. J., Gómez, B., Tomasevic, I., Romero, A., Moreno, A., Toldrá, F., & Lorenzo, J. M. (2019). Application of non-invasive technologies in dry-cured ham: An overview. **Trends in Food Science & Technology**, 86, 360-374. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.011>

- Pinton, M. B., dos Santos, B. A., Correa, L. P., Leães, Y. S. V., Cichoski, A. J., Lorenzo, J. M., dos Santos, M., Pollonio, M. A. R., & Campagnol, P. C. B. (2020). Ultrasound and low-levels of NaCl replacers: A successful combination to produce low-phosphate and low-sodium meat emulsions. **Meat Science**, 170, 108244. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108244>
- Polachini, T. C., Betiol, L. F. L., Lopes-Filho, J. F., & Telis-Romero, J. (2016). Water adsorption isotherms and thermodynamic properties of cassava bagasse. **Thermochimica Acta**, 632, 79–85. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2016.03.032>
- Quirijns, E. J., Van Boxtel, A. J. B., Van Loon, W. K. P., & Van Straten, G. (2005). Sorption isotherms, GAB parameters and isosteric heat of sorption. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 85(11), 1805–1814. <https://doi.org/10.1002/JSFA.2140>
- Retz, S., Porley, V. E., von Gersdorff, G., Hensel, O., Crichton, S., & Sturm, B. (2017). Effect of maturation and freezing on quality and drying kinetics of beef. **Drying Technology**, 35(16), 2002–2014. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1295051>
- Ripollés, S., Campagnol, P. C. B., Armenteros, M., Aristoy, M. C., & Toldrá, F. (2011). Influence of partial replacement of NaCl with KCl, CaCl₂ and MgCl₂ on lipolysis and lipid oxidation in dry-cured ham. **Meat Science**, 89(1), 58–64. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2011.03.021>
- Rizvi, S. S. H. (2005). **Thermodynamic properties of foods in dehydration**. In: Engineering properties of foods. CRC Press, 2014. p. 261-348.
- Ros-Polski, V., Koutchma, T., Xue, J., Defelice, C., & Balamurugan, S. (2015). Effects of high hydrostatic pressure processing parameters and NaCl concentration on the physical properties, texture and quality of white chicken meat. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 30, 31–42. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2015.04.003>
- Rosa, D. P., Evangelista, R. R., Borges Machado, A. L., Sanches, M. A. R., & Telis-Romero, J. (2021). Water sorption properties of papaya seeds (*Carica papaya* L.) formosa variety: An assessment under storage and drying conditions. **LWT - Food Science and Technology**, 138, 110458.

<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110458>

Sánchez-Torres, E. A., Abril, B., Benedito, J., Bon, J., & García-Pérez, J. V. (2021). Water desorption isotherms of pork liver and thermodynamic properties. **LWT - Food Science and Technology**, 149, 111857.

<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111857>

Schmidt, F. C., Carciofi, B. A. M., & Laurindo, J. B. (2009). Application of diffusive and empirical models to hydration, dehydration and salt gain during osmotic treatment of chicken breast cuts. **Journal of Food Engineering**, 91(4), 553–559. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2008.10.003>

Sena Vaz Leães, Y., Basso Pinton, M., Terezinha de Aguiar Rosa, C., Sasso Robalo, S., Wagner, R., Ragagnin de Menezes, C., Smaniotto Barin, J., Cezar Bastianello Campagnol, P., & José Cichoski, A. (2020). Ultrasound and basic electrolyzed water: A green approach to reduce the technological defects caused by NaCl reduction in meat emulsions. **Ultrasonics Sonochemistry**, 61, 104830. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104830>

Shi, Q., Lin, W., Zhao, Y., Zhang, P., & Wang, R. (2016). Moisture adsorption isotherms and thermodynamic properties of *Penaeus vannamei* meat with and without maltodextrin addition. **Journal of Aquatic Food Product Technology**, 25(8), 1348–1367. <https://doi.org/10.1080/10498850.2015.1073204>

Siró, I., Vén, C., Balla, C., Jónás, G., Zeke, I., & Friedrich, L. (2009). Application of an ultrasonic assisted curing technique for improving the diffusion of sodium chloride in porcine meat. **Journal of Food Engineering**, 91(2), 353–362. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2008.09.015>

Staudt, P. B., Tessaro, I. C., Marczak, L. D. F., Soares, R. D. P., & Cardozo, N. S. M. (2013). A new method for predicting sorption isotherms at different temperatures: Extension to the GAB model. **Journal of Food Engineering**, 118(3), 247–255. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2013.04.013>

Telis, V. R., Gabas, A., Menegalli, F., & Telis-Romero, J. (2000). Water sorption thermodynamic properties applied to persimmon skin and pulp. **Thermochimica Acta**, 343(1–2), 49–56. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(99\)00379-2](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(99)00379-2)

Trujillo, F. J., Yeow, P. C., & Pham, Q. T. (2003). Moisture sorption isotherm of fresh lean beef and external beef fat. **Journal of Food Engineering**, 60(4), 357–366. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00058-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00058-X)

Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Díaz, L. P., Lopez, L., Rodriguez, K., & Scala, K. Di. (2010). Effective moisture diffusivity determination and mathematical modelling of the drying curves of the olive-waste cake. **Bioresource Technology**, 101(19), 7265–7270. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2010.04.040>

Vidal, V. A. S., Bernardinelli, O. D., Paglarini, C. S., Sabadini, E., & Pollonio, M. A. R. (2019). Understanding the effect of different chloride salts on the water behavior in the salted meat matrix along 180 days of shelf life. **Food Research International**, 125. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108634>

Vidal, V. A. S., Biachi, J. P., Paglarini, C. S., Pinton, M. B., Campagnol, P. C. B., Esmerino, E. A., da Cruz, A. G., Morgano, M. A., & Pollonio, M. A. R. (2019). Reducing 50% sodium chloride in healthier jerked beef: An efficient design to ensure suitable stability, technological and sensory properties. **Meat Science**, 152, 49–57. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2019.02.005>

Vidal, V. A. S., Santana, J. B., Paglarini, C. S., Silva, M. A. A. P., Freitas, M. Q., Esmerino, E. A., Cruz, A. G., & Pollonio, M. A. R. (2020). Adding lysine and yeast extract improves sensory properties of low sodium salted meat. **Meat Science**, 159, 107911. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2019.107911>

Von Gersdorff, G. J., Porley, V. E., Retz, S. K., Hensel, O., Crichton, S. O. J., & Sturm, B. (2018). Drying behavior and quality parameters of dried beef (biltong) subjected to different pre-treatments and maturation stages. **Drying Technology**, 36(1), 21-32.

Wood, J. D. (2017). Meat Composition and Nutritional Value. **Lawrie's Meat Science: Eighth Edition**, 635–659. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100694-8.00020-0>

Yalçın, M. Y., & Şeker, M. (2016). Effect of salt and moisture content reduction on physical and microbiological properties of salted, pressed and freeze-dried turkey meat. **LWT - Food Science and Technology**, 68, 153–159. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2015.12.032>

Yan, H., Cai, B., Cheng, Y., Guo, G., Li, D., Yao, X., Ni, X., Phillips, G. O., Fang, Y., & Jiang, F. (2012). Mechanism of lowering water activity of konjac glucomannan and its derivatives. **Food Hydrocolloids**, 26(2), 383–388.

<https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2011.02.018>

Zhang, D., Li, H., Emara, A. M., Wang, Z., Chen, X., & He, Z. (2020). Study on the mechanism of KCl replacement of NaCl on the water retention of salted pork. **Food Chemistry**, 332, 127414.

<https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2020.127414>

CONCLUSÃO GERAL

As principais conclusões extraídas dessa tese são apresentadas em diferentes parágrafos, de acordo com as diferentes abordagens:

As isotermas de sorção das amostras de presunto cru apresentaram características de isotermas do tipo III. Dentre os modelos de sorção avaliados, o modelo GAB foi o mais adequado para descrever os dados experimentais de sorção em diferentes temperaturas de armazenamento. A capacidade de sorção das amostras de presunto curado foi dependente da temperatura, observando-se uma diminuição do teor de umidade de equilíbrio com o aumento da temperatura. Além disso, um maior teor de NaCl no produto aumentou o teor de umidade de equilíbrio, em todas as temperaturas avaliadas.

Durante a salga úmida, o conteúdo de água da carne diminuiu enquanto o conteúdo de sal aumentou. O aumento da temperatura de processo aumentou a perda de água (PA), o ganho de sal (GS) e os coeficientes de difusão para água (D_w) e para o sal (D_s) na carne de suína. O modelo Weibull conseguiu prever mais satisfatoriamente as taxas de PA e GS até as condições de equilíbrio. Ambos os modelos apresentaram maiores taxas de PA e GS para o KCl, quando comparado aos outros sais estudados. O modelo de Fick apresentou maiores coeficientes de difusão de água e de sal para o KCl.

As isotermas de sorção de água da carne salgada exibiram comportamento do tipo III. O aumento da temperatura reduziu a umidade de equilíbrio da carne salgada. Entretanto, a umidade de equilíbrio da carne salgada aumentou devido ao aumento do conteúdo de sal (NaCl ou KCl) na carne salgada. Além disso, em concentrações próximas de NaCl e de KCl na carne salgada, as isotermas da carne salgada com NaCl apresentaram uma maior umidade de equilíbrio quando comparadas as isotermas da carne salgada com KCl. O calor de sorção de água aumentou em consequência da redução da umidade de equilíbrio e/ou do aumento do conteúdo de sal na carne salgada. Dentre os modelos de sorção avaliados, GAB foi o mais adequado para descrever os dados experimentais de sorção.

Como conclusão geral deste trabalho, pode-se afirmar que, entre os sais estudados, o KCl possui uma maior taxa de transferência de massa durante a salga úmida de carne suína. Além disso, a capacidade de sorção de água de presuntos

curados a seco e de carne suína salgada reduz com o aumento da temperatura e aumenta com o aumento do conteúdo de sal na carne. Esses resultados podem ajudar a indústria da carne a melhorar o gerenciamento do processo de salga úmida usando diferentes sais com o objetivo de desenvolver produtos cárneos mais saudáveis com teor de sódio reduzido, além de contribuir para a compreensão das interações entre a água e os componentes da matriz cárnea.