

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE MEDICINA VETERINÁRIA E ZOOTECNIA
CÂMPUS DE BOTUCATU

**CARACTERIZAÇÃO DA CARNE BOVINA (*Bos taurus indicus*) EM DIFERENTES
FAIXAS DE pH FINAL E TEMPO DE MATURAÇÃO: PERFIL DE ÁCIDOS
GRAXOS E COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS**

EVELYN PRESTES BRITO

Tese apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Zootecnia como parte das
exigências para a obtenção do título de
Doutora.

BOTUCATU-SP
JANEIRO DE 2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE MEDICINA VETERINÁRIA E ZOOTECNIA
CÂMPUS DE BOTUCATU

CARACTERIZAÇÃO DA CARNE BOVINA (*Bos taurus indicus*) EM DIFERENTES
FAIXAS DE pH FINAL E TEMPO DE MATURAÇÃO: PERFIL DE ÁCIDOS GRAXOS
E COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS

EVELYN PRESTES BRITO
Zootecnista

Orientador: Prof. Dr. Roberto de Oliveira Roça
Coorientadora: Profa. Dra. Carmen J. Contreras-Castillo
Coorientador: Dr. Guilherme Sicca Lopes Sampaio

Tese apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Zootecnia como parte das
exigências para a obtenção do título de
Doutora.

BOTUCATU-SP
JANEIRO DE 2022

B862c	Brito, Evelyn Prestes Caracterização da carne bovina (<i>Bos taurus indicus</i>) em diferentes faixas de pH final e tempo de maturação: perfil de ácidos graxos e compostos orgânicos voláteis / Evelyn Prestes Brito. -- Botucatu, 2022 76 p. : il., tabs. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Botucatu Orientador: Roberto de Oliveira Roça Coorientadora: Carmen Josefina Contreras-Castillo 1. compostos aromáticos. 2. carne in natura. 3. Nelore. 4. oxidação lipídica. 5. pH alto. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

BIOGRAFIA DO AUTOR

ÉVELYN PRESTES BRITO, filha de Márcio Iran Queiroz Brito e Joiza Godinho Prestes Brito, nasceu em Brasília, Distrito Federal, Brasil, no dia 19 de dezembro de 1991. Em agosto de 2009, iniciou o curso de Zootecnia na Universidade Federal do Amazonas - UFAM, campus de Parintins/AM, graduando-se em dezembro de 2014. Em março de 2016, iniciou o curso de Mestrado em Zootecnia no Programa de Pós-graduação em Zootecnia (PPGZ), área de conhecimento Produção Animal, na Universidade Estadual de Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Campus de Botucatu/SP, realizando estudos na área de produção e qualidade de carne de caprinos, obtendo o título de mestra no dia 06 de julho de 2018. No mesmo ano, mês de agosto, deu início ao curso de Doutorado em Zootecnia pelo PPGZ/UNESP, Campus de Botucatu/SP, na área de conhecimento Produção Animal, sob orientação do Prof. Dr. Roberto de Oliveira Roça e coorientadores Profa. Dra. Carmen J. Contreras-Castillo e Dr. Guilherme Sicca Lopes Sampaio. No dia 21 de janeiro de 2022, submeteu-se à banca para defesa de Tese.

Dedicatória

*Aos meus **familiares** e **amigos** por todo amor, carinho e cumplicidade nos momentos alegres e difíceis desta etapa de minha vida.*

Tudo é um aprendizado, ou um divisor de águas.

Agradecimentos

À Deus e minha família, *Márcio Iran Queiroz Brito* (Pai), *Joiza Godinho Prestes Brito* (Mãe) e irmãos, *Anne Christinne Prestes Brito*, *Márcio Iran Prestes Brito*, *Emily Prestes Brito*, *Liandra Geisy Brito Borges* e *Ákla Hadassa da Silva Brito*.

Ao Programa de Pós-Graduação em Zootecnia (PPGZ) da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, UNESP-Botucatu/SP.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

Ao meu orientador, *Prof. Roberto de Oliveira Roça*.

Aos meus coorientadores, *Profa. Dra. Carmen J. Contreras-Castillo* e ao *Dr. Guilherme Sicca Lopes Sampaio*.

Ao Engenheiro, *Dr. Jair Sebastião da Silva Pinto*.

À técnica, *Mariana D. Baccarin Dargelio*.

À secretária da seção técnica do PPGZ, *Cláudia Cristina Moreci*.

À Central Multiusuário de Bioquímica e Análise Instrumental (Esalq/USP), *Prof. Dr. Severino Matias de Alencar* e as técnicas *Adna Prado Massarioli* e *Regina Helena Gonçalves*.

Aos meus amigos da República Paiol, *Vinicius R. Cambito de Paula*, *Shilton Reino Cavalcante* e *Mailson Alcantara*.

Aos meus amigos de Piracicaba/SP, *Cleverson Henrique Freitas*, *Rodrigo José Milan*, *José M. de Moura Andrade*, *Gabriel H. dos S. S. Salgado* e companheiro, *Juan Dario Rios Mera*.

Aos meus amigos de Botucatu/SP, *Jéssica Moraes Cruvinel*, *Iasmin M. S. Calaça de Farias*, *Janaina Prieto de Oliveira*, *Lucas da Silva Lopes*, *Marconi Italo Lourenço da Silva*, *Caio César dos Ouros*, *Carolina Toledo Santos*, *Fernanda Kaiser Lima* e *Patrícia Versuti*.

Aos meus colegas do Laboratório de Qualidade e Processamento de Carnes (Esalq/USP), *Iliani Patinho*, *Cecylyana Leite Cavalcante*, *Milagros M. Coaquila Gonza*, *Gariela Akiko*, *Luana França*, *Monique Marcondes Krauskopf*, *Giovani Henrique Mariano* e *Priscila Robertina dos Santos-Donado*.

O presente trabalho foi realizado com apoio da *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES)* - Código de Financiamento 001.

À todos que contribuíram para que este trabalho pudesse ser realizado e concluído, a minha **GRATIDÃO**.

*“Life is not so much what you accomplish
as what you overcome.”*

Robin Roberts.

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Esquema do sistema HS-SPME.....	21
Figura 2. Desenho experimental das amostras por faixa de pHf e maturação destinadas as análises de perfil de ácidos graxos e COVs.	39
Figura 3. A) Dendrograma de agrupamento dos tratamentos em relação aos ácidos graxos; B) Análises de componentes principais (ACP) do perfil de ácidos graxos em relação aos tratamentos	49
Figura 4. A) Dendrograma de agrupamento dos tratamentos em relação aos compostos orgânicos voláteis; B) Análises de componentes principais (ACP) dos compostos orgânicos voláteis em relação aos tratamentos	59
Figura 5. A) Análise de múltiplos fatores (MFA); B) Representação dos grupos de perfil de ácidos graxos (AGs) e compostos orgânicos voláteis (COVs).....	61
Figura 6. Cromatogramas de íons totais de compostos orgânicos voláteis em carne bovina <i>in natura</i> (<i>Bos taurus indicus</i>) em diferentes faixas de pHf por tempo de maturação.	55
Figura 7. Cromatogramas de íons totais de compostos orgânicos voláteis em carne bovina <i>in natura</i> (<i>Bos taurus indicus</i>) em diferentes tempos de maturação por faixas de pHf.....	56

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 1. Prevalência de <i>dark cutting</i> em carcaças de bovinos em diferentes países.	6
Tabela 2. Principais compostos orgânicos voláteis (COVs) identificados em carne bovina <i>in natura</i> de raças taurinas	15
Tabela 3. Médias $\pm$ erro padrão da composição química da carne bovina (<i>Bos taurus indicus</i>) em diferentes faixas de pH final (pHf).....	44
Tabela 4. Médias $\pm$ erro padrão (% de ácidos graxos totais) do perfil de ácidos graxos da carne bovina (<i>Bos taurus indicus</i>) em função das diferentes faixas de pH final (pHf) e tempo de maturação (TM).....	47
Tabela 5. Médias $\pm$ erro padrão ($\mu\text{g/kg}$) dos compostos orgânicos voláteis (COVs) da carne bovina (<i>Bos taurus indicus</i>) em função das diferentes faixas de pH final (pHf) e tempo de maturação (TM).....	52
Tabela 6. Médias $\pm$ erro padrão ($\mu\text{g/kg}$) dos compostos orgânicos voláteis (COVs) da carne bovina (<i>Bos taurus indicus</i>) em função do efeito da interação pH final x tempo de maturação	54

SUMÁRIO

	Página
CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
CAPÍTULO I.....	4
1. REVISÃO DE LITERATURA	5
1.1. <i>Dark cutting</i>	5
1.2. Perfil de ácidos graxos em carne bovina	7
1.3. Compostos orgânicos voláteis em carne bovina	9
1.3.1. Fatores que influenciam o perfil volátil.....	12
1.3.1.1. Raças bovinas.....	12
1.3.1.2. pH final.....	18
1.3.1.3. Tempo maturação	18
1.3.2. Determinação dos compostos orgânicos voláteis.....	20
1.3.2.1. Microextração em fase sólida por <i>headspace</i> (HS-SPME)	20
1.3.2.2. Cromatografia gasosa – espectrometria de massas (GC-MS)	21
2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22
CAPÍTULO II.....	33
Resumo	34
Abstract.....	35
1. Introdução	36
2. Material e métodos	37
3. Resultados e discussão.....	43
4. Conclusões	62
Referências.....	62
CAPÍTULO III	67
IMPLICAÇÕES.....	68

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Atualmente o cenário da produção de carne brasileira está cada vez mais intensificado, o que vem exigindo cada vez mais a adoção de tecnologias robustas e de alta eficiência para melhorias do sistema de produção da carne, a qual ainda apresenta significativas perdas devido à garantia da qualidade exigida pelo mercado consumidor. Essa intensificação se deve a grande demanda de carne de qualidade produzida para atender o crescimento populacional e a exigência do consumidor, considerando a carne bovina umas das fontes de nutrientes essenciais para a funcionalidade e desenvolvimento do organismo humano (MACIEL; NUNES; SU, 2018).

No ano de 2020, o rebanho brasileiro atingiu 218,2 milhões de cabeças tendo abatido 29,9 milhões de cabeças, o que representou uma queda de 8,6% em relação aos 32,5 milhões de cabeças abatidas em 2019 (IBGE, 2020). Do total de carne produzida, 73,93% foram destinados ao mercado interno e 26,07% ao mercado externo. Apesar da queda nesse período, o Brasil registrou um aumento de 8% nas exportações relacionadas à carne bovina, em que 83,21% desse volume foi carne *in natura*, seguido de 10,23% industrializada e 6,56% de miúdos e outros (ABIEC, 2020).

Entretanto, o cumprimento das exigências sobre a qualidade de carne *in natura* imposta pelo mercado externo, por parte das indústrias brasileiras de carne bovina, foi um fator primordial para que o Brasil se tornasse o líder atual do ranking de exportação. Sendo assim, ao considerarmos que a carne bovina *in natura* apresenta atributos determinantes no momento da compra, como a cor e aparência, é imprescindível que o aroma também seja considerado determinante para aceitabilidade e preferência do consumidor (KARABAGIAS, 2018). Esta premissa também está relacionada com as exigências do consumidor do mercado interno, apesar do consumo de carne ter caído em torno de 8% em relação ao ano de 2019, o consumo de carne *per capita* atual é de 36,39 kg/hab/ano, mantendo o Brasil como o terceiro país no ranking de maiores consumidores do mundo no ano de 2020 (ABIEC, 2020).

O cenário da produção de carne brasileira apresenta poucas informações referentes aos padrões de qualidade, principalmente ao perfil de ácidos graxos e aos compostos aromáticos de carne bovina *in natura*. A carne bovina brasileira apresenta uma proporção proveniente de animais de origem zebuína predominante no rebanho

nacional, com terminação em sistema de pastejo. Atualmente, 80% da pecuária de corte brasileira é representado pela raça Nelore pura ou de cruzados (*Bos taurus indicus*) (DE NADAI BONIN et al., 2021).

Contudo, ocorre uma limitação inerente à qualidade de carne relacionado ao fato de que algum nível de estresse é ocasionado em bovinos de corte durante o pré-abate, principalmente em abates de bovinos machos não castrados, devido à alta susceptibilidade ao estresse em decorrência dos hormônios esteroides masculinos responsáveis pelas reações mais reativas de comportamento. Isto faz com que ocorra o esgotamento das reservas de glicogênio muscular, redução no acúmulo de ácido láctico e consequentemente apresentem valores de pH final intermediário (5,8 a 6,1) a alto (> 6,2) na carne, podendo caracterizar como corte de carne escura ou *dark cutting*, sendo esta característica prejudicial à exportação do produto, diferentemente de uma carne com pH final normal (5,4-5,7) (CONTRERAS-CASTILLO et al., 2016a; LOUDON et al., 2018; MAHMOOD; DIXON; BRUCE, 2019; SILVA et al., 2019).

Outro fator, supracitado, que também pode influenciar na ocorrência de carne *dark cutting* é o sistema de produção, pois bovinos terminados em pasto possuem menor aporte energético na dieta e assim apresentam menor reserva de glicogênio muscular quando comparados com animais terminados em confinamento (KNEE et al., 2007; LOUDON et al., 2018; MAHMOOD; DIXON; BRUCE, 2019).

No Brasil, a incidência de pHf de carcaças com carne *dark cutting* foi relatada em patamares ainda mais elevados em condições experimentais com gado típico do Brasil (LOBO-JR. et al., 2012). Estudos apresentaram influência do pHf na estabilidade de cor (RIBEIRO et al., 2021; ROSA et al., 2016), desnaturação térmica das proteínas (RIOS-MERA; DA SILVA PINTO; CONTRERAS-CASTILLO, 2017), maciez e capacidade de retenção de água (RAMOS et al., 2022).

Outros fatores de qualidade de carne bovina, como perfil de ácidos graxos e compostos orgânicos voláteis, relacionados ao atributo de aroma da carne *in natura* em faixas de pHf e tempos de maturação são insuficientes na literatura ao considerar o cenário brasileiro, como sistema de produção em pasto, raça Nelore (*Bos taurus indicus*) e condição sexual (machos não castrados).

Desta forma a hipótese deste estudo é que faixas de pHf (normal, intermediário e alto) com um determinado tempo de maturação (3, 14 e 28 dias) da carne *in natura* de zebuínos, embalados a vácuo a 2 °C, podem influenciar na composição dos ácidos graxos e na formação de compostos orgânicos voláteis. Contudo, quais compostos

formados podem influenciar na caracterização de uma carne maturada de zebuínos embalada à vácuo com pHf acima do normal? Sendo assim, para responder essas lacunas foi proposto os seguintes capítulos:

O capítulo I, intitulado “**Revisão de literatura**” foi apresentado de acordo com as normas da ABNT 2021 (link: <https://www.normasabnt.org/formatacao-abnt/>) e teve como objetivo de abordar tópicos com levantamentos de produções científicas publicadas para fornecer embasamento teórico e implicações científicas relacionados aos assuntos da tese.

O capítulo II, intitulado “**Influência do pH final e tempo de maturação no perfil de ácidos graxos e compostos orgânicos voláteis da carne bovina (*Bos taurus indicus*)**” foi apresentado de acordo com as normas de publicação da revista *Meat Science* (link: <https://www.elsevier.com/journals/meat-science/0309-1740/guide-for-authors>) e teve como objetivo avaliar a influência de diferentes faixas de pHf e tempo de maturação no perfil de ácidos graxos e compostos orgânicos voláteis em carne de bovinos Nelore (*Bos taurus indicus*).

CAPÍTULO I
(Revisão de Literatura)

1. REVISÃO DE LITERATURA

1.1. *Dark cutting*

A qualidade da carne é primordial como exigência por parte dos consumidores. Contudo um dos problemas quanto a falta de qualidade comumente encontrado na indústria é a incidência de carne bovina considerada *dark cutting* ou corte escuro, sendo essa uma questão crítica para a indústria processadora de carne no século XXI, uma vez que esta condição é inaceitável para o consumidor, pois não atende às expectativas quanto à aparência do produto, provocando perdas econômicas significativas para a indústria de carne em muitos países (JEREZ-TIMAURE et al., 2019; YANG et al., 2021).

O estresse pré-abate é um dos principais fatores que contribui para ocorrência de carne *dark cutting*. Este, por sua vez, é o resultado do consumo dos estoques de glicogênio no músculo, ocorrendo menor formação de ácido lático no *post mortem*, o qual impede que o pH muscular chegue a um pH abaixo de 6,0 (HOLDSTOCK et al., 2014; TERLOUW et al., 2021; YANG et al., 2021).

Segundo Holman e Hopkins (2019), a avaliação da carcaça bovina e a categorização como *dark cutting* ou não-*dark cutting* ocorre entre as primeiras 24-48 h *post mortem* e avalia a superfície exposta do contrafilé em relação a uma cor e/ou referência de pH final (pH_f). De acordo com a literatura sobre o *dark cutting* (ENGLISH et al., 2016; KIYIMBA et al., 2021; PONNAMPALAM et al., 2017; RAMANATHAN et al., 2020; WU et al., 2020), a coloração escura da superfície da carne apresentada está relacionada a dois fatores: 1. O aumento da capacidade de retenção de água das proteínas musculares, que faz com que as miofibrilas fiquem inchadas, deixando menos espaço entre as fibras, resultando em menos água livre disponível para refletir a luz; 2. A maior taxa respiratória mitocondrial, resultando na diminuição do oxigênio disponível para se ligar à mioglobina.

Gagaoua et al. (2021) apresentam uma relação de pesquisas em vários países em que as carcaças com pH_f $\geq$ 6,0 no contrafilé são definidas como *dark cutting*, inclusive na indústria e em experimentos de laboratório. Contudo, existem exceções que limita uma carne com corte escuro, como a indústria de carne bovina australiana que considera pH_f $\geq$ 5,8 e os consumidores chineses, com pH_f $>$ 6,2.

Além do estresse pré-abate, outros fatores como a condição sexual (macho não castrado, macho castrado e fêmea), idade e o sistema de produção (pasto ou

confinado) podem contribuir para que o animal seja mais susceptível a apresentar pHf elevado (IMMONEN et al., 2000; PRIOLO; MICOL; AGABRIEL, 2001).

Diferenças genéticas entre as raças bovinas (*Bos taurus indicus* e *Bos taurus taurus*) relacionados à adaptação climática podem contribuir para prevalência de *dark cutting* (PONNAMPALAM et al., 2017). Contudo, poucas pesquisas relatam a inferência genética como fator contribuinte para pHf alto (KREIKEMEIER; UNRUH; ECK, 1998; PETHICK et al., 2005). Ponnampalam et al. (2017) ressalta que mesmo o pHf tenha baixa herdabilidade, a seleção genética ainda pode ser usada para reduzir a incidência de *dark cutting* em rebanhos bovinos, considerando principalmente o esgotamento de glicogênio muscular.

Pesquisas recentes reportaram que o pHf alto influencia diversas características de qualidade da carne, como cor, força de cisalhamento, proteômica mitocondrial (GAGAOUA et al., 2021; IJAZ et al., 2020; POLETI et al., 2018; WU et al., 2020), maturação (RIBEIRO et al., 2021; YANG et al., 2021), expressão de genes estressores (JEREZ-TIMAURE et al., 2019), crescimento microbiano e vida útil da carne (SHANGE et al., 2018). Ponnampalam et al. (2017) apresentam os dados de prevalência de *dark cutting* em carcaças de bovinos em diferentes países, conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Prevalência de *dark cutting* em carcaças de bovinos em diferentes países.

Países	% Dark cutting	Referências
África do Sul	11.8% (n = 22178; pH >5.8)	Viljoen; De Kock; Webb (2002)
Canadá	1.3% (pH > 5.8)	Holdstock et al. (2014)
EUA	2.3% (n = 697130; pH > 5.9)	Natl. Beef Quality Audit (2000)
Austrália	9–11% (pH > 5.7)	Warner et al. (2014)
Nova Zelândia	4.3% (n = 1759; pH ≥ 5.8)	Wiklund et al. (2009)
Espanha	13.9% (n = 5494; pH ≥ 5.8)	Mach et al. (2008)
França	3.4% (n = 891; pH > 6.0)	Mounier et al. (2006)

Fonte: Adaptação de Ponnampalam et al. (2017).

No Brasil, Rosa et al. (2016) relataram que cerca de 30% da carne produzida apresenta *dark cutting*, devido principalmente ao grande uso de machos não castrados e raças zebuínas, acarretando sérios prejuízos econômicos na indústria da carne. Algumas pesquisas apontam incidência de *dark cutting* em bovinos da raça

Nelore (*Bos taurus indicus*) criados principalmente em pastagens (CONTRERAS-BARÓN et al., 2021; LOBO-JR. et al., 2012; RIOS-MERA; DA SILVA PINTO; CONTRERAS-CASTILLO, 2017). Segundo Carvalho et al. (2014), o Nelore apresenta tolerância ao calor e resistência a doenças, além de alta produtividade. Contudo, podem ser propensos a apresentar pHf alto, devido ao sistema de alimentação em pasto adotado para estes animais (HUGHES et al., 2014).

Contreras-Barón et al. (2021), reportaram que bifes com pH alto exibiram estabilidade de cor prejudicada, fragmentação miofibrilar ligada à proteólise e alta capacidade de retenção de água. Esses autores afirmam que avaliação da pHf da carne pode ser uma estratégia para a classificação da qualidade da carne bovina de touros Nelore. Outras pesquisas também apresentaram influência do pHf alto relacionados a estabilidade de cor (ROSA et al., 2016; RIBEIRO et al., 2020), desnaturação térmica das proteínas (RIOS-MERA; DA SILVA PINTO; CONTRERAS-CASTILLO, 2017), perfil proteômico (POLETI et al., 2018), maciez e capacidade de retenção de água (RAMOS et al., 2022).

1.2. Perfil de ácidos graxos em carne bovina

Na carne, os lipídios são organizados em triglicerídeos e fosfolipídios, com baixa contribuição de outros tipos de lipídios, como ácidos graxos livres e colesterol (WANJALA et al., 2021), e são responsáveis por muitas características desejáveis da carne, contribuindo principalmente com o aroma e sabor em decorrência da oxidação dos diferentes tipos de ácidos graxos (AMARAL; SOLVA; LANNES, 2018; ARSHAD et al., 2018). Pode-se dizer que a oxidação de lipídios é a principal causa de alteração qualitativa em carnes e produtos cárneos (DOMÍNGUEZ et al., 2019).

A dieta animal pode influenciar o perfil de ácidos graxos da carne, implica-se que bovinos de um sistema de produção em pasto em comparação ao sistema de confinamento resulta uma proporção mais favorável da razão ômega 6 e ômega 3 (n6/n3) na carne bovina devido ao maior consumo de ácidos graxos poliinsaturados (AGPI) na dieta (PATINO et al., 2014).

Os ácidos graxos saturados (AGS), como o ácido palmítico (C16:0) e esteárico (C18:0), representam mais de 50% da composição lipídica total na carne de bovinos, sendo o teor de ácido palmítico positivamente correlacionado com sabores desejáveis de carne bovina (LEGAKO et al., 2016).

Os ácidos graxos ômega-3 (n3) e ômega-6 (n6) pertencem ao grupo de ácidos graxos poliinsaturados (AGPI). O ácido α -linolênico (18: 3 n3) é o precursor dos ácidos graxos n3 de cadeia longa, como ácido eicosapentaenóico (EPA, 20:5 n3), ácido docosapentaenóico (DPA, 22:5 n3) e ácido docosahexaenóico (DHA, 22:6 n3), enquanto o ácido linoleico (18: 2 n6) é o precursor dos ácidos graxos n6 de cadeia longa, como ácido araquidônico (AA, 20:4 n6) e o dihomog- γ -linolênico (DLA; 20:3 n6). Ambos precursores que não podem ser sintetizados por mamíferos e são considerados ácidos graxos essenciais, podendo obtê-los por meio da dieta (MIYAKI et al., 2021).

Nos ruminantes, ocorre o processo de biohidrogenação ruminal, qual ocorre a principalmente a conversão de ácidos graxos insaturados (AGI) por AGS, como o ácido linoleico (18:2 n6) e ácido α -linolênico (18:3 n3) em ácido esteárico (C18:0) (MIYAKI et al., 2021). Este processo é realizado por microrganismos ruminais, principalmente pelas bactérias *Butyrivibrio fibrisolvens*, devido ao grau de toxicidade destes ácidos graxos para as bactérias ruminais (MAIA et al., 2010).

Outras alterações no processo de biohidrogenação resulta na formação do ácido graxo eicosadienóico (C20:2 n6) a partir da conversão do ácido linoleico (C18: 2 n6) ou da degradação parcial do ácido docosapentaenóico (C22:5 n3) (SILVA et al., 2021a). A ação das enzimas, como as dessaturases e alongases, são cruciais durante estes processos. As dessaturases atuam adicionando uma ligação dupla carbono/carbono ao eliminar dois átomos de hidrogênio dos ácidos graxos, por exemplo, as ligações delta como a Δ -9 dessaturase, gera uma ligação dupla entre o nono e o décimo átomos de carbono do terminal carboxila (HAN et al., 2020). E as enzimas alongases agem na adição de dois átomos de carbono na parte inicial da cadeia do ácido graxo (MARTIN et al., 2006).

Após todo esse processo, o metabolismo dos ácidos graxos continua por meio da β -oxidação, considerada uma via importante do metabolismo energético, que ocorre principalmente nas mitocôndrias (WU et al., 2020). Os AGI reagem com o oxigênio molecular por meio de um mecanismo de radical livre, os produtos derivados dessa reação são os hidroperóxidos. Esses compostos são altamente instáveis, decompondo-se rapidamente resultando em um grande número de compostos secundários que incluem hidrocarbonetos, aldeídos, cetonas, álcoois, ésteres e ácidos causando o aparecimento de sabores e odores estranhos (DOMÍNGUEZ et al., 2019).

Considerando uma questão de saúde na alimentação humana ao consumo de carne, ressalta-se que a relação AGPI/AGS recomendado pelo *UK Department of Health* e *European Food Safety Authority* para que uma dieta seja considerada saudável é de 0,40-0,45, bem como a proporção n6/n3 em torno de 4,0 (GRUFFAT et al., 2021; WOOD et al., 2008).

1.3. Compostos orgânicos voláteis em carne bovina

O aroma da carne é uma das características sensoriais mais importantes que influenciam a qualidade e aceitabilidade dos consumidores (CALKINS; HODGEN, 2007). Este atributo pode estar associado aos compostos orgânicos voláteis (COVs) presentes na carne. Os COVs são moléculas a base de carbono que possuem alta pressão de vapor em condições atmosféricas internas normais e podem ser formados a partir de várias vias, como a reação de *Maillard*, oxidação de ácidos graxos e degradação de vitaminas (VAN BA; AMNA; HWANG, 2013). Estes precursores não voláteis são responsáveis pelo desenvolvimento do aroma e sabor dos produtos cárneos (KOSOWSKA; MAJCHER; FORTUNA, 2017; SONCIN et al., 2007).

De acordo com Arshad et al. (2018), resumidamente, a reação de *Maillard* é o processo de formação e desenvolvimento do aroma e sabor nos alimentos, que em certas condições de reações, são gerados vários produtos a partir da condensação entre um grupo amino e um açúcar redutor. Estes, por sua vez, sofrem a degradação de Strecker para produzir produtos de Strecker, como carbonilas, enxofre e radicais de nitrogênio, que podem reagir entre si ou interagir com outros compostos reativos produzindo uma quantidade de compostos contendo nitrogênio e enxofre, como pirazinas, tiofeno e tiazol.

A carne *in natura* apresenta pouco aroma e um leve sabor descrito como salgado, metálico e sanguíneo (KARABAGIAS, 2018; SONCIN et al., 2007). Constitui uma matriz rica em precursores não voláteis dos COVs, como aminoácidos, peptídeos, sacarídeos, sais inorgânicos e ácidos inorgânicos formados durante as transformações bioquímicas do *rigor mortis* que acontecem no período *post mortem* na carne mediante a atividade de enzimas, incluindo a degradação de proteínas primeiro em peptídeos e depois em aminoácidos e degradação de glicogênio em glicose (KOSOWSKA; MAJCHER; FORTUNA, 2017; MEINERT et al., 2007, 2009).

Segundo Frank et al. (2020a), vários aldeídos são produzidos por meio da degradação térmica de Strecker de aminoácidos livres. Por exemplo, 2-metilpropanal

(fermento, maltado, carnudo) é produzido a partir de valina, 2-metilbutanal (fermento, maltado, carnudo) a partir de isoleucina e 3-metilbutanal (fermento, maltado, carnudo) a partir da leucina.

Yang et al. (2018) identificaram 51 COVs em carne de bovinos Hanwoo, sendo divididos em dois grupos: aqueles produzidos por reações de *Maillard* (pirazinas, furanos, sulfúrico) e aqueles produzidos por oxidação de lipídios (aldeídos, álcoois, cetonas e hidrocarbonetos).

Os ácidos graxos são considerados fontes para a geração de COVs (VAN BA; AMNA; HWANG, 2013), principalmente os ácidos graxos insaturados (AGI) que desempenham um papel importante ao contribuir com um sabor específico a determinadas espécies (KOSOWSKA; MAJCHER; FORTUNA, 2017). Dentre os AGI, destaca-se o ácido linolênico, que sujeito ao processo de autooxidação, resulta nas formações de cetonas (ex. 1-octen-3-ona), e alguns aldeídos, como 2,4-decadial, 2-nonenal, 2,4-nonadial (KOSOWSKA; MAJCHER; FORTUNA, 2017). Outros aldeídos (ex. nonanal, octanal, heptanal etc.), associados a sabores agradáveis adocicados e gordurosos, são resultantes da oxidação do ácido oleico (VAN BA et al., 2013, YANG et al., 2021).

Van Ba et al. (2013), afirmam que alto nível de ácidos graxos poliinsaturados (AGPI) na carne bovina podem produzir um nível mais alto de COVs oxidados, associados a aromas/sabores indesejáveis, ou até mesmo inibir a formação de outros compostos de aroma através de outras vias, como a reação de *Maillard*. A seguir, destaca-se as principais classes dos compostos orgânicos voláteis em carne bovina *in natura*.

a) Compostos sulfurados

Os compostos sulfurados são aqueles que apresentam um ou mais átomos de enxofre (S-) ligados à cadeia carbônica. Estes são produzidos a partir de aminoácidos contendo enxofre, como cisteína e metionina, desenvolvida por enzimas de proteólise contido em bactérias psicotróficas, como as *Enterobacteriaceae*, geralmente presente em abatedouros (SONCIN et al., 2007).

O dissulfeto de carbono é um dos compostos sulfurados que mais contribui para o aroma geral da carne bovina *in natura* (BHADURY et al., 2021; KILGANNON et al., 2020; LEE et al., 2021; SARAIVA et al., 2015).

b) Aldeídos

Os aldeídos são considerados indicadores de oxidação lipídica. Hexanal, heptanal, octanal e nonanal são formados através da degradação de lipídios, como β -oxidação de ácidos graxos insaturados ou auto oxidação de lipídeos (FRANK et al., 2020a).

O hexanal é um produto resultante da oxidação de ácidos graxos insaturados omega-6 (linoleico) (KARABAGIAS, 2018). Os compostos 2-metilbutanal e 2-metilpropanal podem ser formados pela degradação de Strecker da isoleucina e valina, respectivamente (LEE et al., 2021) como o nonanal resultante da oxidação do ácido oleico.

Met e Şahin Yeşilçubuk (2017), relataram que alguns aldeídos, como 3-metilbutanal, hexanal e pentanal, são comumente associados ao sabor estranho liberados durante a deterioração da carne, desta maneira estes compostos podem servir como indicadores confiáveis para qualidade de carne *in natura*.

c) Álcoois

Os álcoois geralmente resultam da decomposição de sacarídeos promovida por radicais livres devido à oxidação lipídica e são representativos de substâncias aromáticas (WANG et al., 2018).

1-pentanol e 1-hexanol são produzidos através da degradação de aldeídos homólogos durante a oxidação de lipídios e aminoácidos. O 1-octen-3-ol é um produto comum de oxidação principalmente dos ácidos linoleico e araquidônico (KARABAGIAS, 2018). Esses álcoois são voláteis típicos de indicadores de carne *in natura* e carne não processada.

De acordo com Johansson et al. (2011), 2,3-butanodiol é formado pela conversão da 3-hidroxi-2-butanona (acetoína) na presença da 2,3-butanodiol desidrogenase.

d) Compostos nitrogenados

Os compostos nitrogenados são aqueles que apresentam um ou mais átomos de nitrogênio (N-) ligados à cadeia carbônica. A formação de compostos de amina é geralmente atribuída à degradação de aminoácidos devido à atividade descarboxilase dos microrganismos e também devido a proteólise (ação de enzimas endógenas musculares) (IIDA et al., 2016).

A trimetilamina pode ser produzida a partir da redução do óxido de trimetilamina por microrganismos e tem sido amplamente utilizada para avaliação da atividade microbiana. Já a formação 2-pentilpiridina provavelmente se deve a interação do composto 2,4-decadienal com o grupo amino (LEE et al., 2021; MOTTRAM, 1998).

e) Cetonas

Dentre as cetonas, 2-propanona, se destaca por ser predominante no perfil volátil da carne bovina *in natura* (INSAUSTI et al., 2002, 2008). Entretanto, a 3-hidroxi-2-butanona (acetoína) também é um composto volátil presente na carne *in natura*, formado por várias vias: descarboxilação de α -acetolactato, síntese de aspartato na presença de α -cetoglutarato ou produção por meio de uma via enzimática de várias etapas na qual *Leuconoctoc gasicomitatum* inicialmente converte aspartato em oxaloacetato, que é então convertido em acetoína via oxaloacetato descarboxilase (BHADURY et al., 2021; JOHANSSON et al., 2011; KORKEALA; BJORKROTH, 1997).

f) Hidrocarbonetos

Os hidrocarbonetos são produzidos a partir da degradação de lipídios, podem ter origem na alimentação animal onde são absorvidos no tecido adiposo. Tais compostos são documentados na contribuição do desenvolvimento geral do aroma da carne bovina *in natura* (KARABAGIAS et al., 2018).

Alguns autores destacam fatores que podem influenciar os COVs na carne bovina (CALKINS; HODGEN, 2007; DASHDORJ; AMNA; HWANG, 2015; PONNAMPALAM et al., 2017), dentre eles destacam-se: raça animal, nutrição, manejo, o pH e tempo de maturação de carne bovina *in natura*.

1.3.1. Fatores que influenciam o perfil volátil

1.3.1.1. Raças bovinas

Raças taurinas e zebuínas apresentam algumas particularidades, dentre elas destaca-se o teor de lipídios na carne. Raças zebuínas apresentam menor marmorização e espessura fina de gordura subcutânea quando se comparado com raças taurinas (FERRAZ; FELÍCIO, 2010). Este fato está associado à modulação do perfil volátil por parte de alguns COVs gerados pelo processo de degradação dos lipídeos e autooxidação de ácidos graxos poliinsaturados (TAYENGWA et al., 2021).

Deste modo, os próximos tópicos abordam alguns trabalhos científicos relacionados às raças bovinas e ao perfil volátil da carne.

1.3.1.1.1. Raças taurinas

Com base em estudos relatados na literatura, conforme a Tabela 2, foram destacados os principais COVs presentes na carne bovina *in natura* de raças taurinas.

O perfil volátil de carne *in natura* de raças taurinas de origem Espanhola, como Asturiana de los Valles, Morucha, Parda Alpina e Pirenaica, apresentaram cetona e hidrocarbonetos (2-propanona, 2,3,3-trimetilpentano, 2,2,5-trimetilhexano, 3-metil-2-hepteno, 2-octeno e 3-octeno) diretamente relacionados à perda de qualidade de carne armazenada em atmosfera modificada, inferindo-se que estes COVs podem ser usados como marcadores de degradação na qualidade de carne *in natura* (INSAUSTI et al., 2008).

Bhadury et al. (2021), avaliando o efeito do sistema de embalagem (atmosférica modificada, vácuo e filme plástico) na formação e liberação dos COVs em bifes *porterhouse* obtidos em supermercados australianos, identificaram 35 compostos orgânicos voláteis em que, o dissulfeto de carbono e 3-hidroxi-2-butanona (acetoína), foram detectados nos três sistemas, ambos considerados principais compostos orgânicos voláteis de carne bovina *in natura*.

1.3.1.1.2. Raças zebuínas

No Brasil, cerca de 80% do gado tem influência de raças zebuínas criadas em sistema a pasto e conhecidas por seu baixo marmoreio e espessura fina de gordura subcutânea quando se comparado com raças taurinas (FERRAZ; FELÍCIO, 2010).

Bernardo et al. (2021), avaliando os efeitos do congelamento, antes e após a maturação à seco em carne cozida de raça zebuína, apresentaram alterações no perfil volátil. Nesta pesquisa, apenas 10 COVs foram encontrados em amostras não maturadas (*in natura*), como álcoois (1-undecanol e 1-octanol), aldeído (undecanal) éster (pentil éster, ácido fórmico) e hidrocarbonetos (2-octeno, 1-octeno, tridecano, hexano, octano) e cetona (6-metil-2-heptanona).

Os COVs de carne bovina de raça zebuína ainda são poucos mencionados na literatura (BERNARDO et al., 2020), sendo caracterizado somente o perfil volátil em carne bovina cozida, como já mencionado anteriormente. Desta maneira, mais pesquisas são necessárias para obtenção de estudos relacionados ao perfil volátil de

carne *in natura* de raças zebuínas, principalmente a raça Nelore, uma vez que estes compostos podem ser considerados indicadores que contém informações vitais relacionadas ao desenvolvimento de sensores de qualidade e frescor de carne *in natura* embalada à vácuo (BHADURY et al., 2021).

Tabela 2. Principais compostos orgânicos voláteis (COVs) identificados em carne bovina *in natura* de raças taurinas.

Compostos identificados	Descrição do aroma/sabor*	Referências
<i>Compostos sulfurosos</i>		
Dissulfeto de carbono	Enxofre pútrido	Saraiva et al., 2015; Kilgannon, et al. 2020; Bhadury et al., 2021; Lee et al., 2021 Insausti et al., 2002; Frank et al., 2020; Bhadury et al., 2021; Lee et al., 2021 Kosowska et al., 2017; Kosowska et al., 2017; Frank et al., 2020
Sulfeto de dimetila	Repolho/enxofre/gasolina ¹	
Sulfato de hidrogênio	-	
Metanotiol	Enxofre/gasolina/alho ¹	
<i>Aldeídos</i>		
Propanal	Amêndoa/cereja/gramínea/frutado	Lee et al., 2021
Pentanal	-	Met e Şahin Yeşilçubuk, 2017
Hexanal	Gramínea/fresco/gordura	Insausti et al., 2002; Met e Şahin Yeşilçubuk, 2017; Bueno et al., 2019; Kilgannon, et al. 2020; Frank et al., 2020; Bhadury et al., 2021
Heptanal	Doce/cítrico	Bueno et al., 2019; Frank et al., 2020
Octanal	Doce/cítrico	Frank et al., 2020
Acetaldeído	Fresco/gramínea ²	Insausti et al., 2002; Frank et al., 2020; Bhadury et al., 2021
Benzaldeído	Fermentado/etéreo	Frank et al., 2020
Nonanal	Cítrico/gordura/gramínea	Insausti et al., 2002; Bueno et al., 2019; Frank et al., 2020
Decanal	Sabão/casca de laranja/sebo ¹	Resconi et al., 2018; Bhadury et al., 2021
3-Metilbutanal	Maltado ²	Met e Şahin Yeşilçubuk, 2017; Frank et al., 2020
2-Metilbutanal	Maltado/gramínea/frutado/ mofado ²	Kilgannon, et al. 2020; Frank et al., 2020; Lee et al., 2021
2-Metilpropanal	Cânfora/gramínea/ maltado/picante	Frank et al., 2020; Lee et al., 2021

(Continua na próxima página)

Tabela 2. (Continuação)

Compostos identificados	Descrição do aroma/sabor*	Referências
<i>Álcoois</i>		
Etanol	Doce ¹	Met e Şahin Yeşilçubuk, 2017; Frank et al., 2020
3-Metil-1-butanol	Maltado/queimado ¹	Met e Şahin Yeşilçubuk, 2017;
2-Butanol	Agradável/forte/doce/vinho	Lee et al., 2021
1-Pentanol	Fermentado/pão/cereal ²	Met e Şahin Yeşilçubuk, 2017; Frank et al., 2020
1-Hexanol	Gramínea/frutado/casca de maçã ²	Met e Şahin Yeşilçubuk, 2017;
1-Octen-3-ol	Cogumelo/terroso/fúngico ²	Pérez et al., 2008; Met e Şahin Yeşilçubuk, 2017; Wang et al., 2018; Frank et al., 2020;
2,3-Butanodiol	Frutado/cebola ¹	Mansur et al., 2018; Bhadury et al., 2021; Frank et al., 2020
<i>Compostos nitrogenados</i>		
2-Pentilpiridina	Gorduroso/gramínea/cogumelo/pimenta/sebo	Lee et al., 2021
Trimetilamina	Amoníaco/peixe/frutado/oleoso/picante/rançoso/suor	Lee et al., 2021
<i>Cetonas</i>		
2-Propanona	Pungente ² /azedo/sangue	Insausti et al., 2002; Insausti et al., 2008
2-Heptanona	Gorduroso/frutado/gramínea/picante/doce	Kosowska et al., 2017; Lee et al., 2021
2-Butanona	Fermentado/etéreo	Frank et al., 2020
2,3-Butanediona	Amanteigado	Insausti et al., 2002; Pérez et al., 2008; Wang et al., 2018; Kilgannon, et al. 2020; Frank et al., 2020
3-Hidroxi-2-butanona	Doce/amanteigado	Pérez et al., 2008; Kilgannon, et al. 2020; Frank et al., 2020; Bhadury et al., 2021
2,3-Octanediona	-	Brueno et al., 2019; Bhadury et al., 2021

(Continua na próxima página)

Tabela 2. (Continuação)

Compostos identificados	Descrição do aroma/sabor*	Referências
<i>Hidrocarbonetos</i>		
Hexano	Alcano ¹	Insausti et al., 2002; Insausti et al., 2008
Heptano	Floral, frutado, doce	Lee et al., 2021
2,2,5-Trimetilhexano	-	Insausti et al., 2002; Insausti et al., 2008
3-Metildecano	Balsâmico, leve, fenólico	Lee et al., 2021;
2-Octeno	Alcano ¹	Insausti et al., 2002; Insausti et al., 2008; Saraiva et al., 2015
3-Octeno	Doce	Insausti et al., 2002; Insausti et al., 2008
Nonano	Alcano ¹	Insausti et al., 2002;
Tridecano	Alcano ¹	Wang et al., 2018;
Tolueno	Tinta ¹	Bhadury et al., 2021
<i>Ácidos</i>		
Ácido acético	Azedo/vinagre ²	Bueno et al., 2019; Frank et al., 2020
Ácido butanóico	Queijo/gordura	Frank et al., 2020
Ácido hexanóico	Queijoso/gorduroso/picante/rançoso/azedo	Pérez et al., 2008; Frank et al., 2020; Lee et al., 2021
Ácido octanóico	Suor/queijo ¹	Frank et al., 2020
<i>Furano</i>		
2-Etilfurano	Gramínea/plástico	Kilgannon, et al. 2020; Frank et al., 2020
2-Pentilfurano	Feijão verde/amanteigado ²	Wang et al., 2018; Frank et al., 2020

*As descrições de aroma e sabor foram derivadas do banco de dados:¹*Flavornet* (http://www.flavornet.org/f_kovats.html) e revisão bibliográfica: ² Kerth e Miller (2015).

1.3.1.2. pH final

De acordo com os primeiros estudos realizados sobre o pHf elevado na carne, este pode favorecer a formação de tiazóis e pirazinas por causa da disponibilidade de produtos de degradação de aminoácidos, enquanto diminuem outros voláteis de enxofre, como furantióis, sulfetos alifáticos e tiofenos, favorecidos pelo pHf mais baixo (MADRUGA; MOTTRAM, 1998; MOTTRAM; MADRUGA, 1994).

Carne com pHf alto, ocorre aumento nas propriedades de ligação das proteínas miofibrilares à água (CONTRERAS-BARÓN et al., 2021) e ativação das reações bioquímicas através da taxa respiratória mitocondrial (HOLMAN; HOPKINS, 2019), isto faz com que ocorra a formação de alguns COVs oriundos da degradação das proteínas solúveis em água (MOTTRAM; MADRUGA, 1994).

Outros estudos mais recentes demonstraram que é percebida uma diminuição de aroma e sabor em carne com pHf acima da faixa considerada normal (pHf >5,7), quais identificaram que pHf, além da oxidação e composição dos lipídios e da alimentação fornecida aos animais (dietas ricas em ácidos graxos poliinsaturados), influenciam no aparecimento de *off-flavor* em produtos cárneos muitas vezes associados ao sabor de fígado (CALKINS; HODGEN, 2007; DASHDORJ; AMNA; HWANG, 2015; VAN BA; AMNA; HWANG, 2013). Corroborando com Yancey et al. (2005), ao avaliar faixas de pHf normal ($\leq 5,7$) e alto ($\geq 6,0$) em diferentes cortes da carcaça bovina, os músculos com pHf alto apresentaram, no painel sensorial, menos identidade de sabor típico de carne bovina do que aqueles de carcaças com pHf normal.

Ressalta-se que são poucas e antigas as pesquisas (MADRUGA; MOTTRAM, 1998; MOTTRAM; MADRUGA, 1994) realizadas associando o pHf elevado da carne com a composição dos COVs. Deste modo, torna-se relevante novos estudos que possam atribuir mais informações em relação ao pHf da carne *in natura* para detectar as características de qualidade da carne, principalmente em relação aos COVs da carne destacados neste trabalho (Item 1.3).

1.3.1.3. Tempo maturação

O método comum para estender a vida útil, melhorar a qualidade e preservar a carne é a maturação úmida em embalagens a vácuo (KIM et al., 2017). De acordo com Farias et al. (2018), a maturação é o método de armazenamento da carne após o processo de *rigor mortis* em um ambiente controlado por um determinado período

variável (entre 7 e 28 dias), resultando em uma carne mais macia evitando o uso de força mecânica e/ou aditivos químicos.

No processo de maturação ocorre ativação do sistema calpaína. As calpaínas são proteases de cisteína dependentes de cálcio com duas isoformas, μ -calpaína (calpaína 1) e m-calpaína (calpaína 2) (OLIVEIRA et al., 2019), responsáveis pela proteólise *post mortem* de proteínas miofibrilares estruturais, incluindo troponina-T, desmina, nebulina, titina e filamina, resultando na maciez da carne (BHAT et al., 2018).

Farias et al. (2018), reportaram que a carne de bovinos Nelore deve ser embalada à vácuo e maturados por no mínimo 14 dias para produzir carne com maior maciez. Corroborando com Aroeira et al. (2020), em que a carne bovina congelada antes de maturação apresentou maior degradação do que a carne descongelada, até os 14 dias de maturação.

A carne bovina não maturada apresenta um aroma descrito sensorialmente como fraco e suave, enquanto o processo de maturação intensifica seu sabor (FRANK et al., 2020). COVs aromáticos, como aldeídos e furanos, apresentam aumento significativo conforme o período de maturação aumenta (WATANABE et al., 2015; YANG; DASHDORJ; HWANG, 2018). As cetonas, 3-hidroxi-2-butanona e 2,3-butanodiona, e o álcool 3-metil-1-butanol foram os compostos mais produzidos durante o armazenamento de carne (PÉREZ et al., 2008).

Yancey et al (2005), destacam que bifes maturados até 21 ou 35 dias *post mortem* podem aumentar os sabores metálicos e rançosos, devido ao alto teor de gordura contendo provável concentração de ácidos graxos poliinsaturados e fosfolipídios oxidados com o tempo.

Segundo Lee et al. (2021), estudando maturação refrigerada da carne bovina, os resultados apresentaram o aumento na concentração do álcool, 2-butanol, com o aumento do tempo de maturação. Os álcoois são produtos das reações de oxidação que ocorrem na carne *in natura*.

Gruffat et al. (2021) reportaram que tempo de maturação de 1, 3 ou 14 dias de carnes armazenadas à vácuo não influenciou na alteração dos ácidos graxos, podendo confirmar uma alta estabilidade dos ácidos graxos aos processos de lipoperoxidação na ausência de contato da carne com o oxigênio do ambiente.

1.3.2. Método de extração dos compostos orgânicos voláteis

1.3.2.1. Microextração em fase sólida por *headspace* (HS-SPME)

A definição dos COVs e de seus níveis são necessários para desenvolver sensores de odor para caracterização da qualidade da carne de forma não invasiva (MET; ŞAHIN YEŞİLÇUBUK, 2017). Dentre várias técnicas de amostragem para determinação dos COVs da carne bovina, a microextração em fase sólida por *headspace* (*headspace solid-phase micro-extraction*, HS-SPME), é a mais comumente utilizada (BUENO et al., 2019b; SARAIVA et al., 2015). Essa técnica é que mais se aproxima do que acontece quando uma embalagem de carne bovina *in natura* é aberta (BUENO et al., 2019b).

HS-SPME é considerada simples, baixo custo, sem solventes, fácil de usar; facilmente automatizável, fácil implementação e de alta sensibilidade (BUENO et al., 2019b; SARAIVA et al., 2015). Nesta técnica ocorre um processo de adsorção de COVs usando uma fibra de sílica fundida que é revestida externamente com uma fase estacionária selecionada de acordo com os COVs alvo (GARCIA-ESTEBAN et al., 2004; KATAOKA; LORD; PAWLISZYN, 2000; SARAIVA et al., 2015). Vários revestimentos de fibra estão disponíveis comercialmente para extração dos compostos, dentre elas as mais utilizadas para adsorção de COVs em carnes são as fibras divinilbenzeno/carboxeno/polidimetilsiloxano (DVB/CAR/PDMS) e a carboxeno/polidimetilsiloxano (CAR/PDMS) ambas de polaridade mista (FRANK et al., 2020b; LEGAKO et al., 2015; PÉREZ et al., 2008; RESCONI et al., 2018; STETZER et al., 2008).

Resumidamente, a técnica HS-SPME ocorre da seguinte maneira: a fibra com o revestimento polimérico é exposta, com ajuda de um êmbolo, em uma região entre a matriz da amostra sólida e a vedação do vial, denominada de espaço livre (*headspace*). Nesse processo de exposição da fibra, ocorre a adsorção dos COVs (Figura 1. Etapa A) e, posterior a isso, estes compostos que estão na fibra foram desorvidos no injetor do cromatógrafo a gás acoplado à espectrometria de massa (*gas chromatography-mass spectrometry*, GC-MS) e transferidos para a coluna capilar de sílica fundida (Figura 1. Etapa B) (GARCIA-ESTEBAN et al., 2004; KOLBIM, 1999).

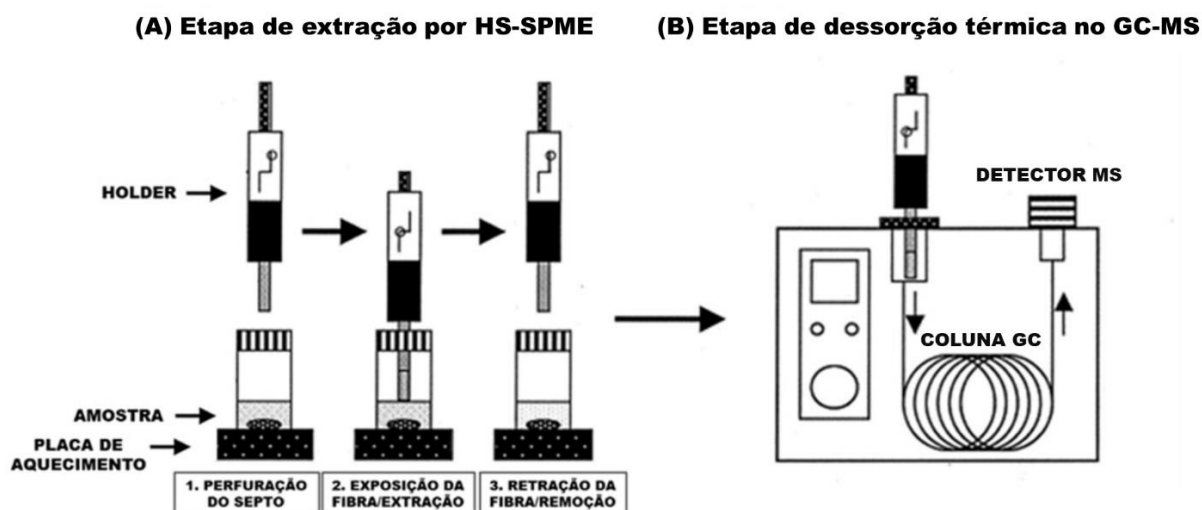


Figura 1. Esquema do sistema HS-SPME. Fonte: Adaptado de Kataoka et al. (2000).

Segundo Bueno et al. (2019), em experimentos de duração longa, a fibra deve ser trocada, pois caso ocorra pequenas variações no revestimento da fibra ocorrerá um impacto direto nos COVs adsorvidos nela, mas ressalta-se que a adição de um padrão interno pode ajudar nessas variações.

Pérez et al. (2008), avaliando as fibras SPME revestidas com 65 μm PDMS/DVB, 75 μm CAR/PDMS e 50/30 μm DVB/CAR/PDMS em carne bovina moída armazenada sob refrigeração, mostraram que CAR/PDMS é uma fibra adequada para a extração destes compostos.

A CAR/PDMS é mais eficaz na extração dos COVs de diferentes cortes de carne de suíno e bovino por microextração de fase sólida no *headspace* (HS-SPME) quando comparado à fibra DVB/CAR/PDMS. A CAR/PDMS mostraram rendimentos de extração maiores em grupos voláteis principais, incluindo ácidos, álcoois, aldeídos, aminas e cetonas na maioria dos cortes de carne testados (MANSUR et al., 2018).

1.3.2.2. Cromatografia gasosa – espectrometria de massas (GC-MS)

O GC-MS é considerado um método de escolha para análise qualitativa de misturas gasosas complexas e oferece uma vantagem de separação e de dados com base no tempo de retenção, além da identificação de COVs por comparação de espectros extraídos com aqueles disponíveis em bibliotecas de espectros de massa, bem como programas de software para pesquisar esses espectros, levando em consideração de que cada pico corresponde a íons de acordo com a relação massa/carga (m/z) (KIND et al., 2009; MAJCHRZAK et al., 2018).

Contudo, a identificação dos COVs com base somente em bibliotecas espectrais é insuficiente, podendo então realizar a identificação com base na determinação de índices de retenção linear para os padrões testados (Majchrzak et al. 2018). Segundo Domínguez et al. (2014), a extração de SPME com separação e identificação por GC-MS foi demonstrada ser um método útil, devido ser considerada rápida, confiável e econômica para analisar os COVs em produtos cárneos.

De acordo com Pavlidis et al. (2019), o HS-SPME/GC-MS é um método promissor para a discriminação de diferentes tipos de carnes, podendo ser aplicado com sucesso em grandes conjuntos de dados com técnicas de análise de dados multivariados.

2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIEC. Beef REPORT Perfil da Pecuária no Brasil 2020. **BeefREPORT**, p. 49, 2020.
AMARAL, A. B.; SOLVA, M. V. DA; LANNES, S. C. D. S. Lipid oxidation in meat: Mechanisms and protective factors - a review. **Food Science and Technology**, v. 38, p. 1–15, 2018.

ANDERSON, S. Determination of fat, moisture, and protein in meat and meat products by using the FOSS FoodScan™ near-infrared spectrophotometer with FOSS artificial neural network calibration model and associated database: Collaborative study. **Journal of AOAC International**, v. 90, n. 4, p. 1073–1083, 2007.

ARANHA, A. S. et al. Performance, carcass and meat characteristics of two cattle categories finished on pasture during the dry season with supplementation in different forage allowance. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 70, n. 2, p. 517–524, 2018.

ARSHAD, M. S. et al. Ruminant meat flavor influenced by different factors with special reference to fatty acids. **Lipids in Health and Disease**, v. 17, p. 1–13, 2018.

BERNARDO, A. P. DA S. et al. Dry-aged and wet-aged beef: Effects of aging time and temperature on microbiological profile, physicochemical characteristics, volatile compound profile and weight loss of meat from Nellore cattle (*Bos indicus*). **Animal Production Science**, v. 61, n. 14, p. 1497–1509, 2021.

BERTRAM, H. C.; ANDERSEN, H. J. Proton NMR Relaxometry in Meat Science. **Modern Magnetic Resonance**, p. 1729–1733, 2008.

BHADURY, D. et al. Detection of Volatiles from Raw Beef Meat from Different Packaging Systems Using Solid-Phase Microextraction GC – Accurate Mass Spectrometry. **Foods**, v. 10, 2021.

BHAT, Z. F. et al. Calpain activity, myofibrillar protein profile, and physicochemical

properties of beef Semimembranosus and Biceps femoris from culled dairy cows during aging. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 42, n. 12, p. 1–10, 2018.

BOLER, D. D.; WOERNER, D. R. What is meat? A perspective from the American Meat Science Association. **Animal Frontiers**, v. 7, n. 4, p. 8–11, 2017.

BUENO, M. et al. Development of a robust HS-SPME-GC-MS method for the analysis of solid food samples. Analysis of volatile compounds in fresh raw beef of differing lipid oxidation degrees. **Food Chemistry**, v. 281, n. December 2018, p. 49–56, 2019a.

BUENO, M. et al. Development of a robust HS-SPME-GC-MS method for the analysis of solid food samples. Analysis of volatile compounds in fresh raw beef of differing lipid oxidation degrees. **Food Chemistry**, v. 281, n. July 2018, p. 49–56, 2019b.

CALKINS, C. R.; HODGEN, J. M. A fresh look at meat flavor. **Meat Science**, v. 77, n. 1 SPEC. ISS., p. 63–80, 2007.

CARVALHO, M. E. et al. Heat shock and structural proteins associated with meat tenderness in Nellore beef cattle, a Bos indicus breed. **Meat Science**, v. 96, n. 3, p. 1318–1324, 2014.

CASABURI, A. et al. Bacterial populations and the volatilome associated to meat spoilage. **Food Microbiology**, v. 45, n. PA, p. 83–102, 2015.

CIFUNI, G. F. et al. Fatty acid profile, cholesterol content and tenderness of meat from Podolian young bulls. **Meat Science**, v. 67, n. 2, p. 289–297, 2004.

CONTRERAS-BARÓN, C. L. et al. Influence of ultimate pH on biochemistry and quality of Longissimus lumborum steaks from Nellore bulls during ageing. **International Journal of Food Science and Technology**, p. 1–11, 2021.

CONTRERAS-CASTILLO, C. J. et al. The effect of electrical stimulation on post mortem myofibrillar protein degradation and small heat shock protein kinetics in bull beef. **Meat Science**, v. 113, p. 65–72, 2016a.

CONTRERAS-CASTILLO, C. J. et al. The effect of electrical stimulation on post mortem myofibrillar protein degradation and small heat shock protein kinetics in bull beef. **Meat Science**, v. 113, p. 65–72, 2016b.

DA LUZ, P. A. C. et al. Effect of integrated crop-livestock systems in carcass and meat quality of Nellore cattle. **Livestock Science**, v. 220, n. July 2018, p. 83–92, 2019.

DA SILVA BERNARDO, A. P. et al. Effects of freezing and thawing on microbiological and physical-chemical properties of dry-aged beef. **Meat Science**, v. 161, n. November 2019, 2020.

DASHDORJ, D.; AMNA, T.; HWANG, I. Influence of specific taste-active components on meat flavor as affected by intrinsic and extrinsic factors: an overview. **European Food Research and Technology**, v. 241, n. 2, p. 157–171, 2015.

DE NADAI BONIN, M. et al. Genetic parameters associated with meat quality of Nellore cattle at different anatomical points of longissimus: Brazilian standards. **Meat Science**, v. 171, n. April 2020, p. 108281, 2021.

DENZER, M. L. et al. Effects of Enhancement and Modified Atmosphere Packaging on Flavor and Tenderness of Dark-Cutting Beef. **Meat and Muscle Biology**, v. 4, n. 1, 2020.

DOMÍNGUEZ, R. et al. Effect of different cooking methods on lipid oxidation and formation of volatile compounds in foal meat. **Meat Science**, v. 97, n. 2, p. 223–230, 2014.

DOMÍNGUEZ, R. et al. Characterization of Volatile Compounds of Dry-Cured Meat Products Using HS-SPME-GC/MS Technique. **Food Analytical Methods**, v. 12, n. 6, p. 1263–1284, 2019.

ELMORE, J. S. et al. Effect of lipid composition on meat-like model systems containing cysteine, ribose, and polyunsaturated fatty acids. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 50, n. 5, p. 1126–1132, 2002.

ENGLISH, A. R. et al. Effects of aging on the fundamental color chemistry of dark-cutting beef. **Journal of Animal Science**, v. 94, n. 9, p. 4040–4048, 2016.

FERRAZ, J. B. S.; FELÍCIO, P. E. DE. Production systems - An example from Brazil. **Meat Science**, v. 84, n. 2, p. 238–243, 2010.

FRANK, D. et al. Volatile and non-volatile metabolite changes in 140-day stored vacuum packaged chilled beef and potential shelf life markers. **Meat Science**, v. 161, n. November 2019, p. 108016, 2020a.

FRANK, D. et al. Volatile and non-volatile metabolite changes in 140-day stored vacuum packaged chilled beef and potential shelf life markers. **Meat Science**, v. 161, n. December 2018, p. 108016, 2020b.

GAGAOUA, M. et al. Dark-cutting beef: A brief review and an integromics meta-analysis at the proteome level to decipher the underlying pathways. **Meat Science**, v. 181, n. June, 2021.

GARCIA-ESTEBAN, M. et al. Study of the effect of different fiber coatings and extraction conditions on dry cured ham volatile compounds extracted by solid-phase microextraction (SPME). **Talanta**, v. 64, n. 2, p. 458–466, 2004.

GORRAIZ, C. et al. Effect of aging time on volatile compounds, odor, and flavor of cooked beef from Pirenaica and Friesian bulls and heifers. **Journal of Food Science**, v. 67, n. 3, p. 916–922, 2002.

GRUFFAT, D. et al. Fatty acid composition and oxidation in beef muscles as affected

by ageing times and cooking methods. **Food Chemistry**, v. 343, n. October 2020, 2021.

GUO, R. et al. Determination of the Volatiles in Fermented Bamboo Shoots by Head Space–Solid-Phase Micro Extraction (HS-SPME) with Gas Chromatography–Olfactory–Mass Spectrometry (GC-O-MS) and Aroma Extract Dilution Analysis (AEDA). **Analytical Letters**, v. 0, n. 0, p. 1–18, 2020.

HAN, Y. J. et al. Oleic acid formation from Stearoyl-CoA and NADH in vitro with a Δ -9-desaturase KR1CT Rt9 recombinant protein. **Bioresource Technology Reports**, v. 11, n. June, p. 100475, 2020.

HOLDSTOCK, J. et al. The impact of ultimate pH on muscle characteristics and sensory attributes of the longissimus thoracis within the dark cutting (Canada B4) beef carcass grade. **Meat Science**, v. 98, n. 4, p. 842–849, 2014.

HOLMAN, B. W. B. et al. Moisture content, fatty acid profile and oxidative traits of aged beef subjected to different temperature-time combinations. **Meat Science**, v. 157, n. June, p. 107876, 2019.

HOLMAN, B. W. B.; HOPKINS, D. L. Contrasting the quality traits of aged bolar blade, topside and striploin cuts sourced from dark cutting and control Australian beef carcasses. **Meat Science**, v. 149, n. October 2018, p. 24–30, 2019.

HUGHES, J. M. et al. A structural approach to understanding the interactions between colour, water-holding capacity and tenderness. **Meat Science**, v. 98, n. 3, p. 520–532, 2014.

IIDA, F. et al. Changes in taste compounds, breaking properties, and sensory attributes during dry aging of beef from Japanese black cattle. **Meat Science**, v. 112, p. 46–51, 2016.

IJAZ, M. et al. Association between meat color of DFD beef and other quality attributes. **Meat Science**, v. 161, n. October 2019, p. 107954, 2020.

IMMONEN, K. et al. Glycogen concentrations in bovine longissimus dorsi muscle. **Meat Science**, v. 54, n. 2, p. 163–167, 2000.

INSAUSTI, K. et al. Volatile compounds of raw beef from 5 local Spanish cattle breeds stored under modified atmosphere. **Journal of Food Science**, v. 67, n. 4, p. 1580–1589, 2002.

INSAUSTI, K. et al. Multivariate study of different beef quality traits from local Spanish cattle breeds. **Animal**, v. 2, n. 3, p. 447–458, 2008.

JEREZ-TIMAURE, N. et al. Early differential gene expression in beef Longissimus thoracis muscles from carcasses with normal (< 5.8) and high (> 5.9) ultimate pH. **Meat Science**, v. 153, n. March, p. 117–125, 2019.

JOHANSSON, P. et al. Genome Sequence of a Food Spoilage Lactic Acid Bacterium, *Leuconostoc gasicomitatum* LMG 18811 T, in Association with Specific Spoilage

Reactions □ †. v. 77, n. 13, p. 4344–4351, 2011.

KARABAGIAS, I. K. Volatile profile of raw lamb meat stored at 4 ± 1 °C: The potential of specific aldehyde ratios as indicators of lamb meat quality. **Foods**, v. 7, n. 3, p. 1–11, 2018.

KATAOKA, H.; LORD, H. L.; PAWLISZYN, J. Applications of solid-phase microextraction in food analysis. **Journal of Chromatography A**, v. 880, p. 35–62, 2000.

KILGANNON, A. K. et al. Temperature-time combination effects on aged beef volatile profiles and their relationship to sensory attributes. **Meat Science**, v. 168, n. February, p. 108193, 2020.

KIND, T. et al. FiehnLib: Mass spectral and retention index libraries for metabolomics based on quadrupole and time-of-flight gas chromatography/mass spectrometry. **Analytical Chemistry**, v. 81, n. 24, p. 10038–10048, 2009.

KIYIMBA, F. et al. Changes in glycolytic and mitochondrial protein profiles regulates postmortem muscle acidification and oxygen consumption in dark-cutting beef. **Journal of Proteomics**, v. 232, n. July 2020, p. 104016, 2021.

KNEE, B. W. et al. Reducing dark-cutting in pasture-fed beef steers by high-energy supplementation. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 47, n. 11, p. 1277–1283, 2007.

KOLBIM, B. Headspace sampling with capillary columns. **Journal of Chromatography A**, v. 842, p. 163–205, 1999.

KORKEALA, H. J.; BJORKROTH, K. J. Microbiological Spoilage and Contamination of Vacuum-Packaged Cooked Sausages. **Journal of Food Protection**, v. 60, n. 6, p. 724–731, 1997.

KOSOWSKA, M.; MAJCHER, M. A.; FORTUNA, T. Volatile compounds in meat and meat products. **Food Science and Technology**, v. 37, n. 1, p. 1–7, 2017.

KREIKEMEIER, K. K.; UNRUH, J. A.; ECK, T. P. Factors Affecting the Occurrence of Dark-Cutting Beef and Selected Carcass Traits in Finished Beef Cattle. **Journal of Animal Science**, v. 76, n. 2, p. 388–395, 1998.

LALA, B. et al. Grazing Height of Xaraés Grass Improve Longissimus Muscle Fatty. **Revista Valore**, v. 4, p. 196–209, 2019.

LEE, D. et al. Effect of different aging methods on the formation of aroma volatiles in beef strip loins. **Foods**, v. 10, n. 1, p. 1–16, 2021.

LEGAKO, J. F. et al. Consumer palatability scores and volatile beef flavor compounds of five USDA quality grades and four muscles. **Meat Science**, v. 100, p. 291–300, 2015.

LEGAKO, J. F. et al. Consumer palatability scores, sensory descriptive attributes, and volatile compounds of grilled beef steaks from three USDA Quality Grades. **Meat Science**, v. 112, p. 77–85, 2016.

LISTRAT, A. et al. How muscle structure and composition determine meat quality. **Productions animales**, v. 28, n. 2, p. 125–136, 2016.

LOBO-JR., A. R. et al. Interaction of dietary vitamin D 3 and sunlight exposure on B. indicus cattle: Animal performance, carcass traits, and meat quality. **Livestock Science**, v. 145, n. 1–3, p. 196–204, 2012.

LOUDON, K. M. W. et al. On farm factors increasing dark cutting in pasture finished beef cattle. **Meat Science**, v. 144, n. May, p. 110–117, 2018.

MACHIELS, D.; ISTASSE, L.; VAN RUTH, S. M. Gas chromatography-olfactometry analysis of beef meat originating from differently fed Belgian Blue, Limousin and Aberdeen Angus bulls. **Food Chemistry**, v. 86, n. 3, p. 377–383, 2004.

MACIEL, P.; NUNES, L.; SU, P. O bem estar animal e o controle de qualidade de carne. **Revista da Jornada de Pós-Graduação e Pesquisa-Congrega Urcamp**, v. 15, p. 638–652, 2018.

MADRUGA, M. S.; MOTTRAM, D. S. The effect of pH on the formation of volatile compounds produced by heating a model system containing 5'-imp and cysteine. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 9, n. 3, p. 261–271, 1998.

MAHMOOD, S.; DIXON, W. T.; BRUCE, H. L. Cattle production practices and the incidence of dark cutting beef. **Meat Science**, v. 157, n. June, p. 107873, 2019.

MAIA, M. R. et al. Toxicity of unsaturated fatty acids to the biohydrogenating ruminal bacterium, *Butyrivibrio fibrisolvens*. **BMC Microbiology**, v. 10, p. 8–10, 2010.

MAJCHRZAK, T. et al. PTR-MS and GC-MS as complementary techniques for analysis of volatiles: A tutorial review. **Analytica Chimica Acta**, v. 1035, p. 1–13, 2018.

MANSUR, A. R. et al. Comparison of two commercial solid-phase microextraction fibers for the headspace analysis of volatile compounds in different pork and beef cuts. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 42, n. 10, p. 1–14, 2018.

MANSUR, A. R. et al. Comparative evaluation of spoilage-related bacterial diversity and metabolite profiles in chilled beef stored under air and vacuum packaging. **Food Microbiology**, v. 77, n. September 2018, p. 166–172, 2019.

MARTIN, C. A. et al. Ácidos graxos poliinsaturados ômega-3 e ômega-6: Importância e ocorrência em alimentos. **Revista de Nutricao**, v. 19, n. 6, p. 761–770, 2006.

MARUŠIĆ, N. et al. Determination of volatile compounds and quality parameters of traditional Istrian dry-cured ham. **Meat Science**, v. 96, n. 4, p. 1409–1416, 2014.

MATTSON, F. H.; GRUNDY, S. M. Comparison of effects of dietary saturated, monounsaturated, and polyunsaturated fatty acids on plasma lipids and lipoproteins in man. **Journal of Lipid Research**, v. 26, n. 2, p. 194–202, 1985.

MEINERT, L. et al. Chemical and sensory characterisation of pan-fried pork flavour: Interactions between raw meat quality, ageing and frying temperature. **Meat Science**, v. 75, n. 2, p. 229–242, 2007.

MEINERT, L. et al. Comparison of glucose, glucose 6-phosphate, ribose, and mannose as flavour precursors in pork; the effect of monosaccharide addition on flavour generation. **Meat Science**, v. 81, n. 3, p. 419–425, 2009.

MET, A.; ŞAHİN YEŞİLÇUBUK, N. Comparison of Two Volatile Sampling Techniques Based on Different Loading Factors in Determination of Volatile Organic Compounds Released from Spoiled Raw Beef. **Food Analytical Methods**, v. 10, n. 7, p. 2311–2324, 2017.

MIYAKI, S. et al. The effect of dietary oilseeds on physico-chemical characteristics, fatty acid profile and sensory aspects of meat of young zebu cattle. **Food Science and Technology**, v. 2061, p. 1–10, 2021.

MOTTRAM, D. S. Flavour formation in meat and meat products: A review. **Food Chemistry**, v. 62, n. 4, p. 415–424, 1998.

MOTTRAM, D. S.; MADRUGA, M. S. Important Sulfur-Containing Aroma Volatiles in Meat. In C. J. Mussinan & M. E. Keelan (Eds.), **Sulfur compounds in foods. ACS symposium series**, v. 564, p. 180–187, 1994.

MOUNIER, L. et al. Variations in meat pH of beef bulls in relation to conditions of transfer to slaughter and previous history of the animals. **Journal of Animal Science**, v. 84, n. 6, p. 1567–1576, 2006.

OLIVARES, A.; NAVARRO, J. L.; FLORES, M. Distribution of volatile compounds in lean and subcutaneous fat tissues during processing of dry fermented sausages. **Food Research International**, v. 42, n. 9, p. 1303–1308, 2009.

OLIVEIRA, L. G. DE et al. Association of calpain and calpastatin activity to postmortem myofibrillar protein degradation and sarcoplasmic proteome changes in bovine Longissimus lumborum and Triceps brachii. **Meat Science**, v. 155, n. March, p. 50–60, 2019.

PATINO, H. O. et al. Productive performance, meat quality and fatty acid profile of steers finished in confinement or supplemented at pasture. **Animal**, v. 9, n. 6, p. 966–972, 2014.

PAVLIDIS, D. E. et al. A volatilomics approach for off-line discrimination of minced beef and pork meat and their admixture using HS-SPME GC/MS in tandem with multivariate data analysis. **Meat Science**, v. 151, n. January, p. 43–53, 2019.

PÉREZ, R. A. et al. Solid-phase microextraction for the determination of volatile

compounds in the spoilage of raw ground beef. **Journal of AOAC International**, v. 91, n. 6, p. 1409–1415, 2008.

PETHICK, D. W. et al. Muscle metabolism in relation to genotypic and environmental influences on consumer defined quality of red meat. **Indicators of milk and beef quality. Hocquette JF & Gigli S.(eds). EAAP Publication**, v. 112, n. 2005, p. 95–110, 2005.

PIAO, M. Y. et al. Comparison of fatty acid profiles and volatile compounds among quality grades and their association with carcass characteristics in longissimus dorsi and semimembranosus muscles of Korean cattle steer. **Livestock Science**, v. 198, n. February, p. 147–156, 2017.

POLETI, M. D. et al. Label-free quantitative proteomic analysis reveals muscle contraction and metabolism proteins linked to ultimate pH in bovine skeletal muscle. **Meat Science**, v. 145, n. June, p. 209–219, 2018.

PONNAMPALAM, E. N. et al. Causes and Contributing Factors to “Dark Cutting” Meat: Current Trends and Future Directions: A Review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 16, n. 3, p. 400–430, 2017.

PRIOLO, A.; MICOL, D.; AGABRIEL, J. Effects of grass feeding systems on ruminant meat colour and flavour. A review. **Animal Research**, v. 50, n. 3, p. 185–200, 2001.

R CORE TEAM. An Introduction to dplR. **Foundation for Statistical Computing**, 2019.

RAMANATHAN, R. et al. Recent Updates in Meat Color Research: Integrating Traditional and High-Throughput Approaches. **Meat and Muscle Biology**, v. 4, n. 2, 2020.

RAMOS, P. M. et al. Beef of Nellore cattle has limited tenderization despite pH decline in. **Sci. Agric.**, v. 79, p. e20200340, 2022.

RESCONI, V. C. et al. Ageing and retail display time in raw beef odour according to the degree of lipid oxidation. **Food Chemistry**, v. 242, n. May 2017, p. 288–300, 2018.

RIBEIRO, F. A. et al. Ultimate pH effects on dry-aged beef quality. **Meat Science**, v. 172, n. August 2020, p. 108365, 2021.

RIOS-MERA, J. D.; DA SILVA PINTO, J. S.; CONTRERAS-CASTILLO, C. J. Effect of ultimate pH and ageing on thermal denaturation of bovine muscle proteins. **Meat Science**, v. 131, n. November 2016, p. 25–27, 2017.

ROSA, A. et al. Incidence of DFD meat on Brazilian beef cuts. **MESC**, v. 112, p. 132–133, 2016.

SARAIVA, C. et al. Implementation of multivariate techniques for the selection of volatile compounds as indicators of sensory quality of raw beef. **Journal of Food**

Science and Technology, v. 52, n. 6, p. 3887–3898, 2015.

SCHINDLER, S. et al. Aroma development in high pressure treated beef and chicken meat compared to raw and heat treated. **Meat Science**, v. 86, n. 2, p. 317–323, 2010.

SHA, K. et al. Changes in Lipid Oxidation, Fatty Acid Profile and Volatile Compounds of Traditional Kazakh Dry-Cured Beef during Processing and Storage. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 41, n. 4, p. 1–9, 2017.

SHANGE, N. et al. The influence of normal and high ultimate muscle pH on the microbiology and colour stability of previously frozen black wildebeest (*Connochaetes gnou*) meat. **Meat Science**, v. 135, n. June 2017, p. 14–19, 2018.

SILVA, L. F. et al. Growth, physicochemical properties, fatty acid composition and sensorial attributes from longissimus lumborum of young bulls fed diets with containing licuri cake. **Livestock Science**, p. 104775, 2021a.

SILVA, L. F. et al. Growth, physicochemical properties, fatty acid composition and sensorial attributes from longissimus lumborum of young bulls fed diets with containing licuri cake. **Livestock Science**, n. October, p. 104775, 2021b.

SILVA, L. H. P. et al. Carcass and meat quality traits of Nellore young bulls and steers throughout fattening. **Livestock Science**, v. 229, n. September, p. 28–36, 2019.

SIRTORI, F. et al. Evolution of volatile compounds and physical, chemical and sensory characteristics of Toscano PDO ham from fresh to dry-cured product. **European Food Research and Technology**, v. 246, n. 3, p. 409–424, 2020.

SÖBELI, C.; UYARCAN, M.; KAYAARDI, S. Pulsed UV-C radiation of beef loin steaks: Effects on microbial inactivation, quality attributes and volatile compounds. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 67, n. June 2020, 2021.

SONCIN, S. et al. Preliminary study of the volatile fraction in the raw meat of pork, duck and goose. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 20, n. 5, p. 436–439, 2007.

STETZER, A. J. et al. Effect of enhancement and ageing on flavor and volatile compounds in various beef muscles. **Meat Science**, v. 79, n. 1, p. 13–19, 2008.

TAIT, E. et al. Identification of volatile organic compounds produced by bacteria using HS-SPME-GC-MS. **Journal of Chromatographic Science**, v. 52, n. 4, p. 363–373, 2014.

TAYENGWA, T. et al. Polyunsaturated fatty acid, volatile and sensory profiles of beef from steers fed citrus pulp or grape pomace. **Food Research International**, v. 139, n. April 2020, p. 109923, 2021.

TERLOUW, E. M. C. et al. Understanding the Determination of Meat Quality Using

Biochemical Characteristics of the Muscle : Stress at Slaughter and Other Missing Keys. 2021.

UTAMA, D. T. et al. Comparison of meat quality, fatty acid composition and aroma volatiles of dry-aged beef from Hanwoo cows slaughtered at 60 or 80 months old. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, v. 33, n. 1, p. 157–165, 2020.

VAN BA, H.; AMNA, T.; HWANG, I. Significant influence of particular unsaturated fatty acids and pH on the volatile compounds in meat-like model systems. **Meat Science**, v. 94, n. 4, p. 480–488, 2013.

VILJOEN, H. F.; DE KOCK, H. L.; WEBB, E. C. Consumer acceptability of dark, firm and dry (DFD) and normal pH beef steaks. **Meat Science**, v. 61, n. 2, p. 181–185, 2002.

WANG, X. et al. Analysis of volatile compounds between raw and cooked beef by HS-SPME–GC–MS. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 42, n. 2, p. 1–8, 2018.

WANJALA, G. W. et al. Does lysine drive the conversion of fatty acid hydroperoxides to aldehydes and alkyl-furans? **Scientific African**, v. 12, p. e00797, 2021.

WARNER, R. D. et al. Pre-rigor carcass stretching counteracts the negative effects of high rigor temperature on tenderness and water-holding capacity-using lamb muscles as a model. **Animal Production Science**, v. 54, n. 4, p. 494–503, 2014.

WIKLUND, E. et al. Survey of current pH status in New Zealand bull beef. **The 55th International Congress of Meat Science and Technology (ICoMST)**, n. December 2014, p. 16–24, 2009.

WILLS, K. M. et al. Improving the lean muscle color of dark-cutting beef by aging, antioxidant-enhancement, and modified atmospheric packaging. **Journal of Animal Science**, v. 95, n. 12, p. 5378–5387, 2017.

WOOD, J. D. et al. Fat deposition, fatty acid composition and meat quality: A review. **Meat Science**, v. 78, n. 4, p. 343–358, 2008.

WU, S. et al. Understanding the development of color and color stability of dark cutting beef based on mitochondrial proteomics. **Meat Science**, v. 163, n. November 2019, p. 108046, 2020.

YANCEY, E. J. et al. Flavor characterization of top-blade, top-sirloin, and tenderloin steaks as affected by pH, maturity, and marbling. **Journal of Animal Science**, v. 83, n. 11, p. 2618–2623, 2005.

YANG, J.; DASHDORJ, D.; HWANG, I. Effect of the calpain system on volatile flavor compounds in the beef longissimus lumborum muscle. **Korean Journal for Food Science of Animal Resources**, v. 38, n. 3, p. 515–529, 2018.

YANG, X. et al. Investigation of the physicochemical , bacteriological , and sensory

quality of beef steaks held under modified atmosphere packaging and representative of different ultimate pH values. **Meat Science**, v. 174, n. December 2020, p. 108416, 2021.

YUAN, Y. et al. Shellac: A promising natural polymer in the food industry. **Trends in Food Science and Technology**, v. 109, n. August 2020, p. 139–153, 2021.

CAPÍTULO II

(Artigo científico: Influência do pH final e tempo de maturação no perfil de ácidos graxos e compostos orgânicos voláteis da carne bovina (*Bos taurus indicus*)

Influência do pH final e tempo de maturação no perfil de ácidos graxos e compostos orgânicos voláteis da carne bovina (*Bos taurus indicus*)

Resumo

O objetivo foi avaliar a influência de diferentes faixas de pHf e tempos de maturação no perfil de ácidos graxos e compostos orgânicos voláteis em carne *in natura* de bovinos Nelore. As amostras foram classificadas de acordo o pH final (pHf), sendo pHf normal (pHf; 5,40-5,79), pHf intermediário (5,80-6,19) e pHf alto ($\geq 6,20$), embaladas a vácuo e maturadas em 3, 14 e 28 dias, sob refrigeração a 2 °C. Foram avaliados a composição química, perfil de ácidos graxos e compostos orgânicos voláteis. Diante dos resultados, foi observado que o pHf intermediário e alto da carne bovina *in natura* embalada a vácuo e maturadas aos 28 dias contribuíram para perfil de compostos aromáticos típico de carne *in natura*, como álcoois, aldeído e cetonas. Estes compostos são considerados indicadores de oxidação lipídica, por meio da β -oxidação dos ácidos graxos insaturados presentes neste estudo.

Palavras-chave: compostos aromáticos, carne *in natura*, Nelore, oxidação lipídica, pHf alto

Influence of ultimate pH and aging time on Fatty acid profile and volatile organic compounds of beef (*Bos taurus indicus*)

Abstract

The objective was to evaluate the influence of different pHu ranges and aging times on fatty acid profile and volatile organic compounds in Nellore cattle raw beef. Steaks were classified according to the final pH (pHu), being pHu normal (pHu 5.40-5.79), intermediate (pHu 5.80-6.19) and high (pHu ≥ 6.20), vacuum packed and aged for 3, 14 and 28 days, under refrigeration at 2 °C. Chemical composition, fatty acid profile and volatile organic compounds were evaluated. In view of the results, it was observed that the intermediate and high pHu of raw beef vacuum-packed and aged at 28 days contributed to the profile of aromatic compounds typical of raw beef, such as alcohols, aldehyde and ketones. These compounds are considered indicators of lipid oxidation, through the β -oxidation of unsaturated fatty acids present in this study.

Keywords: aromatic compounds, raw beef, Nellore, lipid oxidation, pHu high

1. Introdução

O perfil de ácidos graxos e os compostos orgânicos voláteis (COVs) da carne bovina estão associados principalmente com conteúdo lipídico, sendo este modulado por diversos fatores, como por exemplo o sistema de produção (nutrição e manejo), raça e idade do animal, processamento e armazenamento (Casaburi et al., 2015).

Dentro dos fatores mencionados, o pH final (pHf) e a maturação da carne desempenham papel importante na qualidade da carne, como no desenvolvimento compostos aromáticos, de sabor e aparência. Estudos recentes demonstraram que acima do intervalo da faixa de pHf considerada normal (pHf >5,8) é percebida uma diminuição na intensidade do sabor e percepção sensorial relacionada a fígado e sangue (Calkins; Hodgen, 2007; Dashdorj; Amna; Hwang, 2015; Van Ba; Amna; Hwang, 2013). Em relação ao aroma, Yancey et al. (2005), reportaram que, após o processo de cozimento, as carnes com maiores valores de pHf ($\geq 6,0$) apresentam o aroma típico da carne menos acentuado do que naqueles que apresentam pHf na faixa normal ($\leq 5,7$).

Embora a carne *in natura* apresente menor concentração de compostos aromáticos, é importante investigar se o pHf e a maturação alteram o perfil de voláteis, uma vez que os mesmos ao serem liberados na abertura da embalagem à vácuo, devem ser aceitáveis pelos consumidores (Schindler et al., 2010).

A maturação é o método de armazenamento da carne após o processo de *rigor mortis* em um ambiente controlado, por um período variável (entre 7 e 28 dias), em que durante o armazenamento ocorre ativação do sistema calpaína. O sistema atua na autólise de proteínas miofibrilares e sarcoplasmáticas, formando pequenos peptídeos e aminoácidos livres, precursores não voláteis que geram, por meio de oxidação proteica, alguns compostos contendo enxofre e nitrogênio (Yang et al., 2018). Este armazenamento pode influenciar principalmente em grupo de cetonas, como 2-propanona e 3-hidroxi-2-butanona, que apresentam o aroma característico de pungente/sangue e doce/amanteigado, respectivamente (Van Ba et al., 2013). Portanto, vales destacar que a gordura intramuscular é o principal substrato para a formação e produção de cetonas, devido a derivação da oxidação dos ácidos graxos, atividade lipolítica e degradação de alcanos por microrganismos (Casaburi et al., 2015; Machiels et al., 2004; Sirtori et al., 2020).

Entretanto, considerando a escassez de trabalhos científicos que consideram o sistema de produção em pasto e bovinos da raça Nelore, o objetivo deste trabalho foi estudar a influência de diferentes faixas de pHf e tempos de maturação no perfil de ácidos graxos e COVs em carne de bovinos Nelore (*Bos taurus indicus*).

2. Material e métodos

2.1. Descrição experimental

Lote de 100 bovinos da raça Nelore puros (*Bos taurus indicus*), machos não castrados, de 36 a 42 meses de idade, com 4 a 6 dentes incisivos, provenientes de sistema de produção em pasto, pertencidos a uma fazenda localizada a 300 km do frigorífico comercial, foram avaliados para analisar o pH final (pHf) da carcaça, 48 horas após abate, para obtenção da classificação de acordo com o pH final (pHf): normal (pHf 5,40 a 5,79), intermediário (pHf 5,80 a 6,19) e alto (pHf $\geq 6,2$) (Contreras-Castillo et al., 2016).

2.2. Obtenção de amostras e determinação do pHf

As amostras de carne foram obtidas em frigorífico comercial, localizado na cidade de Lins/SP, sob Serviço de Inspeção Federal (SIF). O pHf foi preliminarmente medido, utilizando peagâmetro (Sentron, modelo SI600) com sonda com ponta de aço para penetração (LanceFET), no músculo *Longissimus thoracis*, na altura da 10^a vértebra torácica da meia carcaça esquerda (resfriada a 2 °C). Esta medida permitiu a classificação inicial em faixas de pHf (normal, intermediário e alto) dentro do lote, selecionados 36 carcaças, sendo 12 por faixa de pHf. Posteriormente, as carcaças foram desossadas, entre a 11^a vértebra torácica e 6^a vértebra lombar, para obtenção do corte de contrafilé (músculo *L. thoracis et lumborum*) e transportadas sob refrigeração a 2 °C ($\pm 0,5$ °C) para o Laboratório de Qualidade e Processamento de Carnes (LAN/ESALQ/USP).

No laboratório, foram realizadas novamente medidas de pHf para distribuição dos tratamentos. Foi realizado coleta de alíquota amostral dos cortes de contrafilé, homogeneizados em solução tampão contendo 150 mM KCl e 5 mM iodoacetato de sódio (Jeacocke, 1977), e avaliados com peagâmetro de bancada (Lucadema, modelo LUCA-210) com eletrodo de penetração de vidro (Sensoglass), a utilização deste equipamento foi necessária em virtude de maior acurácia em relação ao peagâmetro

Sentron. Os resultados destas amostras definiram a formação dos grupos amostrais (n=7) para ser destinados aos tratamentos.

2.3. Preparo das amostras

Na planta de processamento, o contrafilé foi seccionado aproximadamente entre a 4ª e 6ª vértebra lombar para obtenção das amostras destinadas à maturação, subdivididas em bifes (músculo *L. lumborum*), com 2 cm de espessura, embalados a vácuo em embalagens plásticas termoencolhíveis, armazenados a 2 °C ($\pm 0,5$ °C) em câmara de refrigeração ventilada (Dânica, Modelo C-EC/U) com ausência de luz, e avaliados para as três faixas de pHf ao longo do tempo de maturação de 3, 14 e 28 dias *post mortem*. (Figura 2). Após o final de cada período de maturação, os bifes foram armazenados a -80 °C para posterior análises.

2.4. Determinação da composição química

Foram utilizadas as amostras de bifes (músculo *L. lumborum*) maturadas por três dias *post mortem*, descongeladas por 24h na câmara de refrigeração à 2 °C ($\pm 0,5$ °C). Em seguida, foi realizada a limpeza da amostra (bife) com retirada da gordura subcutânea, trituradas em multiprocessador (PMX600, Mixer, Philco) para obtenção de uma massa homogênea e avaliados os teores de umidade, gordura, proteína e colágeno por meio da espectroscopia de reflectância no infravermelho próximo (NIRS), utilizando o equipamento *FoodScan Lab* (Foss, Hillerød, Dinamarca) com curva de calibração de valores referência obtidos de acordo com o método padrão da AOAC (Anderson, 2007). Os teores de cinzas foram obtidos pelo método descrito na norma ISO 936 (ISO, 1998). Os dados foram expressos em base percentual (%).

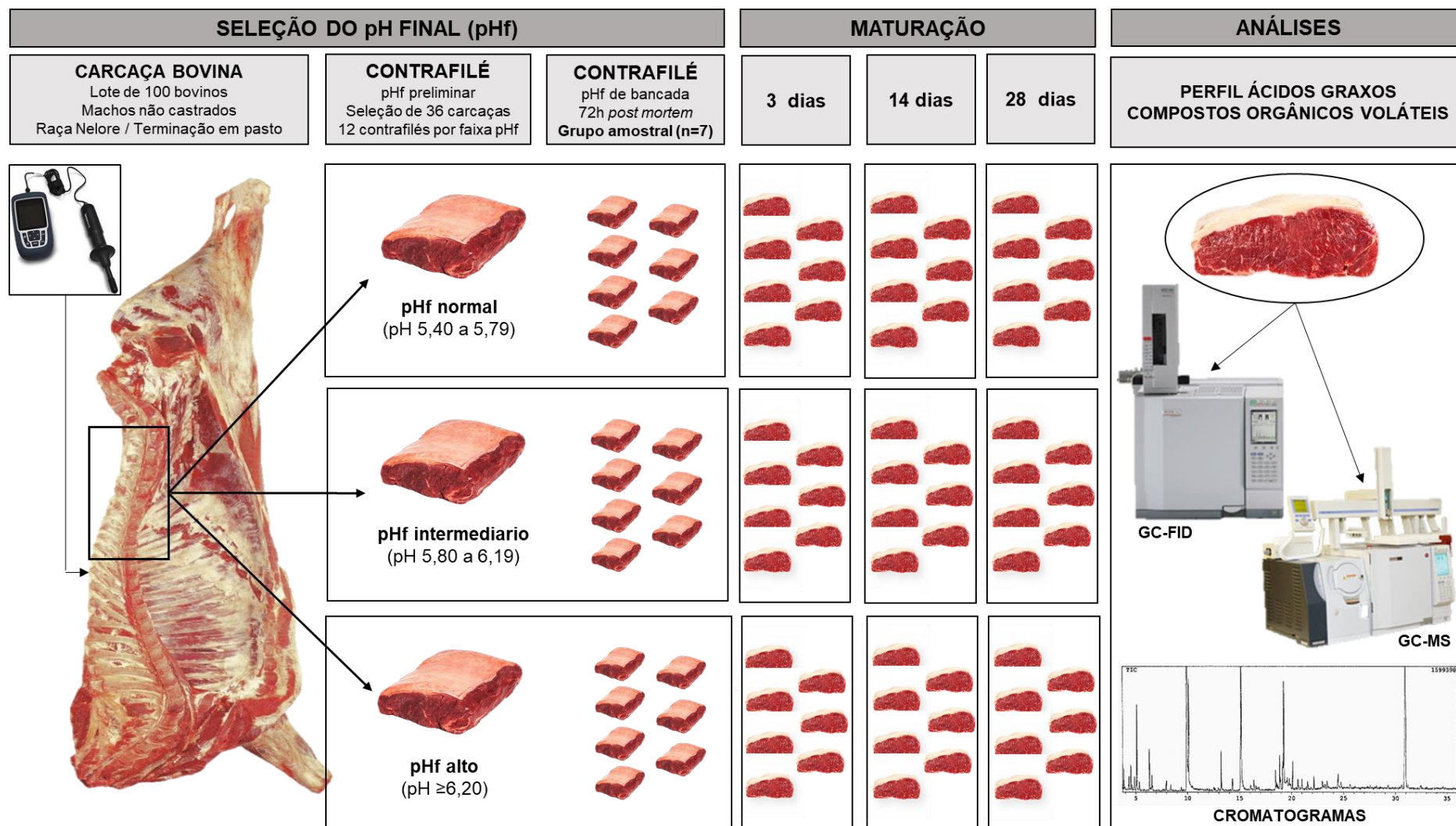


Figura 2. Esquema experimental das amostras por faixa de pHf e maturação destinadas as análises de perfil de ácidos graxos e COVs.

2.5. Determinação do perfil de ácidos graxos

As amostras de bifes (músculo *L. lumbrorum*) foram descongelados por 24h na câmara de refrigeração à 2 °C ($\pm 0,5$ °C) e realizada limpeza com retirada da gordura subcutânea, após trituradas em multiprocessador (PMX600, Mixer, Philco).

A extração de lipídios das amostras foi determinada de acordo com o método a frio (Bligh e Dyer, 1959) e os ésteres metílicos de ácidos graxos (*fatty acid methyl esters* - FAMES) foram determinados de acordo com o método de Hartman e Lago (1973), com adaptações baseadas no método AOCS Ce-1b-89 (2003). Os FAMES foram analisados usando um cromatógrafo gasoso com detector de ionização de chama (GC-FID 2010, Shimadzu, Kyoto, Japão), equipado com uma coluna capilar de sílica fundida SP-2560 (100 m x 0,25 mm d.i. x 0,20 μ m espessura - Supelco, Bellefonte, PA, USA).

A programação de temperatura da coluna iniciou a 140 °C por 5 minutos, aumentando para 240 °C a uma taxa de 4 °C/min, permanecendo nessa temperatura por 15 minutos, totalizando 45 minutos. A temperatura do injetor e detector foram de 230 °C e 240 °C, respectivamente. Foi utilizado como gás de arraste, o hidrogênio, com velocidade linear de 20 cm/s. O volume da injeção foi de 1,0 μ L no modo split de 1:30. A identificação foi realizada por comparação dos tempos de retenção da mistura padrão comercial de 37 FAMES Mix (Supelco, Bellefonte, PA; CRM47885) com os tempos de retenção dos picos das amostras. Os teores de FAMES foram expressos em percentual de área (%).

Com base nos resultados dos FAMES foram calculados os somatórios dos ácidos graxos saturados (AGS), ácidos graxos monoinsaturados (AGMI), os ácidos graxos poliinsaturados (AGPI), ômega 6 (n6), ômega 3 (n3), a razão n6/n3 e as atividades enzimáticas $\Delta 9$ dessaturase e alongase foram determinadas conforme descrito por Malau-Aduli et al. (1997), usando a Equação (1), (2) e (3), respectivamente.

$$(1) \Delta 9 \text{ C16} = 100 \times [(C16:1 \text{ c9}) / (C16:1 \text{ c9} + C16:0)]$$

$$(2) \Delta 9 \text{ C18} = 100 \times [(C18:1 \text{ c9}) / (C18:1 \text{ c9} + C18:0)]$$

$$(3) \text{Alongase} = 100 \times [(C18:0 + C18:1 \text{ c9}) / (C16:0 + C16:1 \text{ c9} + C18:0 + C18:1 \text{ c9})]$$

2.6. Análise dos compostos orgânicos voláteis

2.6.1. Extração de COVs por HS-SPME

Os COVs foram extraídos do *headspace* das amostras *in natura* com a técnica de microextração em fase sólida (*headspace-solid phase microextraction* – HS-SPME), utilizado a fibra 75 μm de carboxeno/polidimetilsiloxano (CAR/PDMS) (Supelco, Bellefonte, EUA), com 1 cm de exposição, conforme descrito por Stetzer et al. (2008), com algumas adaptações. Foram pesados 10 g ($\pm 0,01$ g) de carne previamente moída e adicionado 1 μL de 1,2-diclorobenzeno (13,06 $\mu\text{g/kg}$ – padrão interno) em um vial de 40 mL, tampa com septo de silicone/teflon (Supelco, Bellefonte, EUA). O vial foi fechado e mantido a 35 $^{\circ}\text{C}$ (± 1 $^{\circ}\text{C}$) em banho maria por 15 min, em seguida, utilizou-se um holder (Supelco, Bellefonte, PA, USA) expondo a fibra no vial com a amostra para adsorção dos COVs por 60 minutos, sendo a fibra recolhida posteriormente. O tipo de fibra e tempo de adsorção foram definidos com base nos resultados dos ensaios prévios não mencionados neste trabalho.

2.6.2. HS-SPME/GC-MS

Após a extração por HS-SPME, os COVs adsorvidos pela fibra foram dessorvidos no injetor do cromatógrafo a gás acoplado ao espectrômetro de massas (GC-MS; Shimadzu QP2010 Plus, Japão), usando coluna capilar de sílica fundida RTx-5MS (30 m x 0,25 mm d.i. x 0,25 μm espessura de filme), por 10 min a 280 $^{\circ}\text{C}$, em modo split 1:30. A temperatura do forno iniciou a 40 $^{\circ}\text{C}$ por 1 minuto, aumentando para 240 $^{\circ}\text{C}$ a uma taxa de 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, permanecendo nessa temperatura por 4 minutos, totalizando 45 minutos. O espectro de massa foi obtido por impacto de elétrons a 70 eV de energia de ionização, em uma faixa de 40 e 450 m/z para cada composto. Foi utilizado hélio como gás de arraste, com velocidade linear de 36 cm/s. No início das análises, a fibra CAR/PDMS foi condicionada no injetor do GC-MS, conforme recomendado pelo fabricante.

Os índices de retenção linear (IRL) dos compostos foram calculados analisando uma série de n-alcanos (C7-C30) sob as mesmas condições cromatográficas e calculado de acordo com Van Den Dool e Kratz (1963) usando a Equação (4), onde: $R_t(i)$ é o tempo de retenção (RT) de cada composto alvo (i), $R_t(n)$ e $R_t(n+1)$ são os RTs dos n-alcanos eluindo diretamente antes e após o composto alvo (i) nas mesmas condições cromatográficas. O n é o número de carbonos do n-alcano eluindo antes do composto alvo (i).

A identificação dos COVs foi realizada comparando o IRL e espectro de massa com dados da biblioteca do GC-MS (Wiley 8ª ed. e FFNSC 1.3), com similaridade mínima de 85 % e sendo tentativamente identificados comparando o IRL com bases de dados NIST, Pherobase e Flavornet. A quantificação dos COVs foi realizada conforme Guo et al. (2020), utilizando a Equação (5), onde: CX é a concentração dos COVs desconhecidos em µg/kg; C0 é a concentração do padrão interno em µg/kg; SX é a área do pico dos COVs expressos em unidade de área (UA); S0 é a área do pico do padrão interno expressos em unidade de área (UA).

$$(4) \quad RI = [Rt(i) - Rt(n)] / [Rt(n+1) - Rt(n) + n] \times 100$$

$$(5) \quad C_x = (C_0 \times S_x) / S_0$$

2.7. Procedimento estatístico

O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado com fatorial 3x3, considerando três faixas de pHf (normal x intermediário x alto) e três tempos de maturação (3 x 14 x 28 dias), totalizando nove tratamentos, com sete repetições por combinação dos níveis dos fatores. O modelo estatístico é dado por:

$$Y_{ijk} = \mu + pHf_j + TM_k + pHf * TM_{(jk)} + e_{ijk}$$

Em que:

Y_{ijk} = característica avaliada no animal i abatido com pHf j com tempo de maturação k ; μ = constante inerente aos dados; pHf_j = efeito do pH final, sendo $j = 1$: alto; 2 : intermediário; 3 : normal; TM_k = efeito do tempo de maturação k , sendo $k = 1$: 3 dias; 2 : 14 dias; 3 : 28 dias; $pHf * TM_{(jk)}$ = efeito de interação entre pHf e TM; e_{ijkl} = erro experimental referente a observação Y_{ijk} que é normalmente distribuído ($\mu = 0$, constante σ^2).

Os dados de perfil de ácidos graxos e COVs são representados por médias e erro padrão. Os pressupostos do modelo de normalidade e homogeneidade da variância dos tratamentos foram examinados pelo teste de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente ($\alpha \geq 0,05$). Quando essas duas pressuposições foram atendidas, foi aplicada a análise de variância (ANOVA), seguida pelo teste Tukey com nível de significância a 5%. Para as variáveis cujas premissas do modelo não foram atendidas, a transformação Box-Cox foi usada para escolher o valor de λ que minimizou o resíduo. As variáveis que após as transformações não atenderam as premissas, foi

então realizado o teste não paramétrico, o teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste *post hoc* Dunn com ajuste de Bonferroni para comparações múltiplas, com nível de significância a 5%.

Os valores médios do perfil de ácidos graxos e COVs foram agrupados pelos tratamentos por semelhanças entre eles, sendo realizada a visualização por meio de dendrogramas (agrupamentos hierárquicos, do inglês *Hierarchical Cluster Analysis* - HCA), seguida da Análise de Componentes Principais (PCA, do inglês *Principal Component Analysis*) para identificar grupos de variáveis inter-relacionadas e, posteriormente, os valores médios correlacionados pela Análise Múltiplos Fatores (MFA, do inglês *Multiple Factor Analysis*) considerando o efeito dos tratamentos. Todas as análises dos dados foram realizadas no software estatístico R (R Core Team, 2019).

Para as análises de composição química foi utilizado apenas um fator (pHf), seguindo modelo estatístico:

$$Y_{ij} = \mu + \text{pHf}_j + e_{ijk}$$

Em que:

Y_{ijk} = característica avaliada no animal i abatido com pHf j ; μ = constante inerente aos dados; pHf_j = efeito do pH final, sendo $j = 1$: alto; 2: intermediário; 3: normal; e_{ijkl} = erro experimental referente a observação Y_{ijk} que é normalmente distribuído ($\mu = 0$, constante σ^2).

Os dados de composição química são representados por médias e erro padrão. Foi aplicada a análise de variância (ANOVA), seguida pelo teste Tukey com nível de significância a 5%.

3. Resultados e discussão

3.1. Composição química

A composição química da carne bovina (*Bos taurus indicus*) em diferentes faixas de pHf é apresentada na Tabela 3.

Foi observado que não houve diferenças entre as faixas de pHf para gordura, cinzas e colágeno. Os valores médios da composição estão de acordo com os relatados da literatura em estudos sobre a composição química da carne bovina da raça Nelore terminados em pasto (Aranha et al., 2018; da Luz et al., 2019; Lala et al., 2019; Silva et al., 2021). Em geral, a carne contém aproximadamente 75% de água,

18-20% de proteínas, 2-5% de lipídios e 1% de vitaminas e minerais (Bertram & Andersen, 2008; Boler & Woerner, 2017; Listrat et al., 2016).

Para o teor de umidade, as amostras de carne com pHf intermediário apresentaram maior percentual relação ao pH normal, não diferenciando do pHf alto. Isto se deve a interação proteína-água influenciado pela faixa de pHf, onde pHf acima do normal (>5,8) aumenta a capacidade de retenção de água (CRA) devido a movimentação das proteínas do músculo para longe do ponto isoelétrico (pH 5,0-5,5). Isto faz com que ocorra repulsão entre as moléculas de proteína, por apresentar uma carga negativa, e aumento da capacidade de se ligar à água (Wu et al., 2020), apresentando um músculo com elevado teor de umidade. Pesquisas anteriores também relataram maior teor de umidade em carne *dark cutting* em relação a carne com pHf normal (Denzer et al., 2020; English et al., 2016; Wills et al., 2017).

Em relação ao teor de proteína, o pHf intermediário apresentou menor teor quanto comparado com o pHf normal, não diferenciando do pHf alto. Isto pode ser reflexo do aumento da capacidade de retenção de água como já mencionado anteriormente, diminuindo proporcionalmente a quantidade de proteína na amostra analisada. Ressalta-se que os resultados de teor de umidade e proteína para carne com pHf alto não foram esperados.

Tabela 3. Médias $\pm$ erro padrão (%) da composição química da carne bovina (*Bos taurus indicus*) em diferentes faixas de pH final

Composição	pH final		
	Normal	Intermediário	Alto
Umidade	74,18 $\pm$ 0,39 b	75,53 $\pm$ 0,23 a	74,78 $\pm$ 0,37 ab
Gordura	1,53 $\pm$ 0,21	1,69 $\pm$ 0,33	2,09 $\pm$ 0,42
Proteína	23,18 $\pm$ 0,32 a	21,63 $\pm$ 0,46 b	22,06 $\pm$ 0,14 ab
Cinzas	1,12 $\pm$ 0,05	1,15 $\pm$ 0,04	1,07 $\pm$ 0,05
Colágeno	1,09 $\pm$ 0,08	1,34 $\pm$ 0,14	1,13 $\pm$ 0,13

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ($P \geq 0,05$) pelo teste Tukey.

3.2. Perfil de ácidos graxos

O perfil de ácidos graxos de carne bovina (*Bos taurus indicus*) está apresentada na Tabela 4. Os ácidos graxos saturados (AGS) foram os principais compostos

presente na carne bovina, representando média de 48,45%, seguido pelos monoinsaturados (AGMI) e poliinsaturados (AGPI), com 39,05 e 12,50%, respectivamente. O oleico (31,89%), palmítico (22,14%) e o esteárico (19,44%) foram os ácidos graxos com maiores percentuais na carne bovina *in natura*. Esses resultados foram consistentes com aqueles relatado por Sha et al. (2017). Segundo Söbeli et al. (2021), o ácido oleico é considerado o principal ácido graxo abundante da gordura intramuscular em carne bovina.

Foi observado, dentre os AGS, que o pHf influenciou o teor de mirístico e tricosanóico, apresentando menor e maior, respectivamente, na faixa de pHf normal relação ao pHf intermediário e final. Para os AGMI, o teor de palmitoleico e elaídico se diferenciaram em relação ao pH final, apresentando maiores teores em carne com pHf alto e intermediário quando comparado com pHf normal. Contudo, para os ácidos oleico e vacênico, apresentaram diferenças entre o pHf normal em relação ao pHf intermediário, mas não diferiu do pHf alto. Os AGMI de configuração cis são hipocolesterolêmicos com a vantagem adicional de não reduzir o colesterol HDL (lipoproteína de alta densidade) que protege contra a doença cardíaca coronária (CHD) (Mattson & Grundy, 1985).

Os AGPI apresentaram maior teor no pHf normal em relação as demais faixas de pHf, podendo considerar os ácidos linoleico, α -linolênico, eicosadienóico, dihomog- γ -linolênico principais contribuintes para esse resultado. Dentre estes, a formação de ácido eicosadienóico pode ocorrer a partir da conversão de ácido linoleico (Wood et al., 2008).

A diminuição nos teores de AGPI e n3 em carne com pHf intermediário e alto ocorreu de forma inversa para o teor AGMI. Sugere-se que o pHf acima do normal ($\geq 5,8$) contribuiu para que ocorresse as reações de oxidação dos AGPI, devido este ser mais susceptível em oxidar do que AGMI e AGS, por conta do maior grau de insaturação (Holman et al., 2019; Sha et al., 2017).

A razão n6/n3 apresentam valores elevados em pHf intermediário e alto, devido os teores de n6 serem menores, sendo que a razão AGPI/AGS ocorreu inversamente. Estas razões são consideradas importantes em relação ao valor nutricional dos alimentos para a saúde humana (Cifuni et al., 2004). De acordo com as recomendações nutricionais, a média da razão n6/n3 está abaixo do limite superior

(2,96 vs 4,0), enquanto AGPI/AGS não atingiu o recomendado limite (0,27 vs 0,45) (Gruffat et al., 2021; Wood et al., 2008).

Em relação ao tempo de maturação, foi observado que dentre os AGS, os teores de capróico e pentadecanóico apresentaram diferenças entre as faixas de pHf. O tempo de maturação da carne de 28 dias apresentou teores elevados desses ácidos graxos. Já entre os AGPI, o tempo de maturação de 3 dias apresentaram menores teores dos ácidos γ -linolênico, eicosenóico, dihomio- α -linolênico e docosadienóico. Estes resultados estão de acordo com a literatura, uma vez que o aumento do período de maturação se torna responsável pela oxidação de AGPI, devido conter ligações duplas de carbono, que enfraquecem a estrutura e a tornam propensa à oxidação (Utama et al., 2020).

Ao comparar os tratamentos em relação aos ácidos graxos, uma análise de agrupamento hierárquica (HCA) e análise de componentes principais (PCA) foram realizadas (Figura 3). No dendrograma foi observado que os tratamentos formaram dois grupos, sendo o agrupamento I (TI_14, TI_28d, TI_3d, TA_28d e TA_3d) e o agrupamento II (TN_14d, TN_3d, TA_14d e TN_28d).

Em relação ao agrupamento I, os tratamentos com pHf intermediário com todos os tempos de maturação (3, 14 e 28d) foram semelhantes entre si, seguido do pHf alto com maturação de 3 e 28 dias. Já o agrupamento II, o tratamento com pHf normal de 28 dias foi semelhante com o pHf alto de 14 dias, seguido dos demais tratamentos pHf normal de 3 e 14 dias.

Diante disso, a análise de PCA mostrou que 68,2% da variabilidade foi explicada pelos dois primeiros componentes principais, que responderam por 53% e 15,2% da variância total, respectivamente. Observou-se na primeira dimensão, os tratamentos TA_3d, TA_28d, TI_3d e TI_28d estão relacionados positivamente com os teores de AGMI e AGS. Por outro lado, TN_28d foi negativamente correlacionado com alguns AGMI, como os ácidos vacênico (t) e nervônico. Estes resultados podem sugerir que a carne com pHf elevado, independente da maturação, pode apresentar maiores teores de AGMI e AGS em relação aos AGPI, como já foi observado e discutido na Tabela 4.

Tabela 4. Médias $\pm$ erro padrão (% de ácidos graxos totais) do perfil de ácidos graxos da carne *bovina in natura* (*Bos taurus indicus*) em função das diferentes faixas de pH final (pHf) e tempo de maturação (TM)

Ácidos graxos ¹	pH final			Tempo de maturação			<i>P</i> -valor		
	Normal	Intermediário	Alto	3d	14d	28d	pHf	TM	pHf*TM
Caprótico (C6:0) ^{np}	0,12 $\pm$ 0,06	0,10 $\pm$ 0,05	0,05 $\pm$ 0,03	0,05 $\pm$ 0,04 b	0,10 $\pm$ 0,05 ab	0,13 $\pm$ 0,05 a	ns	*	ns
Mirístico (C14:0)	1,49 $\pm$ 0,17 b	1,83 $\pm$ 0,19 a	1,81 $\pm$ 0,20 a	1,74 $\pm$ 0,19	1,60 $\pm$ 0,19	1,78 $\pm$ 0,21	*	ns	ns
Miristoleico (C14:1)	0,27 $\pm$ 0,08	0,30 $\pm$ 0,07	0,31 $\pm$ 0,07	0,25 $\pm$ 0,07	0,28 $\pm$ 0,09	0,34 $\pm$ 0,06	ns	ns	ns
Pentadecanóico (C15:0) ^{np}	0,42 $\pm$ 0,06	0,44 $\pm$ 0,03	0,46 $\pm$ 0,03	0,45 $\pm$ 0,04 ab	0,40 $\pm$ 0,02 b	0,47 $\pm$ 0,06 a	ns	*	ns
Palmítico (C16:0)	21,56 $\pm$ 0,80	22,79 $\pm$ 0,65	22,06 $\pm$ 0,81	22,54 $\pm$ 0,73	21,72 $\pm$ 0,80	22,16 $\pm$ 0,78	ns	ns	ns
Palmitoleico (C16:1)	1,81 $\pm$ 0,10 b	2,01 $\pm$ 0,11 ab	2,04 $\pm$ 0,11 a	2,00 $\pm$ 0,12	1,90 $\pm$ 0,11	1,96 $\pm$ 0,11	*	ns	ns
Heptadecanóico (C17:0)	0,91 $\pm$ 0,06	0,99 $\pm$ 0,04	1,03 $\pm$ 0,12	0,97 $\pm$ 0,05	0,99 $\pm$ 0,12	0,97 $\pm$ 0,06	ns	ns	ns
Heptadecenóico (C17:1) ^{np}	0,74 $\pm$ 0,06	0,73 $\pm$ 0,03	0,77 $\pm$ 0,02	0,73 $\pm$ 0,04	0,73 $\pm$ 0,05	0,78 $\pm$ 0,03	ns	ns	ns
Esteárico (C18:0)	18,82 $\pm$ 0,96	20,32 $\pm$ 0,89	19,18 $\pm$ 0,65	20,15 $\pm$ 1,12	18,94 $\pm$ 0,60	19,23 $\pm$ 0,77	ns	ns	ns
Elaídico (t) (C18:1 t9) ^{np}	1,83 $\pm$ 0,40 b	2,04 $\pm$ 0,36 ab	2,43 $\pm$ 0,14 a	2,27 $\pm$ 0,34	1,76 $\pm$ 0,33	2,26 $\pm$ 0,28	*	ns	ns
Oleico (C18:1 n9)	30,30 $\pm$ 1,06 b	33,56 $\pm$ 0,86 a	31,80 $\pm$ 0,74 ab	32,24 $\pm$ 1,16	31,64 $\pm$ 1,03	31,78 $\pm$ 0,89	*	ns	ns
Vacênico (t) (C18:1 t11)	1,06 $\pm$ 0,11 a	0,87 $\pm$ 0,07 b	1,00 $\pm$ 0,04 ab	0,92 $\pm$ 0,09	1,00 $\pm$ 0,10	1,02 $\pm$ 0,06	*	ns	ns
Linoleico (C18:2 n6)	10,08 $\pm$ 1,15 a	6,79 $\pm$ 0,77 b	8,39 $\pm$ 1,02 ab	7,77 $\pm$ 1,17	9,17 $\pm$ 1,00	8,32 $\pm$ 1,12	*	ns	ns
Araquídico (C20:0)	0,11 $\pm$ 0,03	0,15 $\pm$ 0,02	0,10 $\pm$ 0,03	0,10 $\pm$ 0,03	0,11 $\pm$ 0,03	0,14 $\pm$ 0,03	ns	ns	ns
γ -linolênico (C18:3 n6)	0,11 $\pm$ 0,04	0,06 $\pm$ 0,03	0,05 $\pm$ 0,03	0,04 $\pm$ 0,03 b	0,10 $\pm$ 0,04 a	0,09 $\pm$ 0,03 a	ns	*	ns
Eicosenóico (C20:1 n9)	0,07 $\pm$ 0,03	0,09 $\pm$ 0,03	0,11 $\pm$ 0,04	0,03 $\pm$ 0,02 b	0,12 $\pm$ 0,04 a	0,12 $\pm$ 0,04 a	ns	*	ns
α -linolênico (C18:3 n3)	3,89 $\pm$ 0,42 a	2,37 $\pm$ 0,26 b	2,85 $\pm$ 0,31 b	2,81 $\pm$ 0,42	3,29 $\pm$ 0,41	3,01 $\pm$ 0,41	*	ns	ns
Heneicosanóico (C21:0) ^{np}	0,47 $\pm$ 0,04	0,46 $\pm$ 0,04	0,51 $\pm$ 0,06	0,47 $\pm$ 0,03	0,47 $\pm$ 0,04	0,50 $\pm$ 0,06	ns	ns	ns
Eicosadienóico (C20:2 n6) ^{np}	0,13 $\pm$ 0,05 a	0,04 $\pm$ 0,02 b	0,07 $\pm$ 0,03 ab	0,04 $\pm$ 0,03	0,11 $\pm$ 0,05	0,09 $\pm$ 0,02	*	ns	ns

(Continua na próxima página)

Tabela 4. (Continuação)

Ácidos graxos ¹	pH final			Tempo de maturação			P-valor		
	Normal	Intermediário	Alto	3d	14d	28d	pHf	TM	pHf*TM
Behênico (C22:0) ^{np}	0,03 ± 0,03	0,03 ± 0,02	0,08 ± 0,05	0,07 ± 0,05	0,04 ± 0,03	0,03 ± 0,02	ns	ns	ns
Dihomo-γ-linolênico (C20:3 n6)	0,67 ± 0,11 a	0,47 ± 0,06 b	0,56 ± 0,06 ab	0,52 ± 0,09	0,62 ± 0,08	0,56 ± 0,08	*	ns	ns
Erúcico (C22:1 n9) ^{np}	0,08 ± 0,04	0,02 ± 0,02	0,02 ± 0,02	0,02 ± 0,02	0,05 ± 0,04	0,06 ± 0,02	ns	ns	ns
Dihomo-α-linolênico (C20:3 n3)	0,12 ± 0,05	0,07 ± 0,02	0,07 ± 0,03	0,04 ± 0,03 b	0,11 ± 0,05 a	0,11 ± 0,02 a	ns	*	ns
Tricosanóico (C23:0)	3,56 ± 0,47 a	2,47 ± 0,31 b	3,00 ± 0,33 ab	2,73 ± 0,45	3,36 ± 0,34	2,94 ± 0,40	*	ns	ns
Docosadienóico (C22:2) ^{np}	0,28 ± 0,08	0,21 ± 0,03	0,22 ± 0,05	0,18 ± 0,06 b	0,31 ± 0,05 a	0,22 ± 0,05 ab	ns	*	ns
Nervônico (C24:1 n9)	1,04 ± 0,23	0,80 ± 0,10	1,02 ± 0,15	0,85 ± 0,17	1,06 ± 0,19	0,96 ± 0,16	ns	ns	ns
AGS	47,51 ± 1,53	49,57 ± 1,25	48,28 ± 0,80	49,27 ± 1,46	47,75 ± 1,01	48,34 ± 1,23	ns	ns	ns
AGMI	37,20 ± 0,99 b	40,43 ± 0,95 a	39,50 ± 0,83 a	39,33 ± 1,15	38,54 ± 1,01	39,27 ± 0,99	*	ns	ns
AGPI	15,28 ± 1,70 a	10,00 ± 1,11 b	12,22 ± 1,36 b	11,40 ± 1,72	13,71 ± 1,50	12,40 ± 1,57	*	ns	ns
n3	4,01 ± 0,43 a	2,43 ± 0,26 b	2,92 ± 0,30 b	2,85 ± 0,43	3,40 ± 0,41	3,11 ± 0,41	*	ns	ns
n6	10,99 ± 1,26 a	7,36 ± 0,84 b	9,09 ± 1,07 ab	8,37 ± 1,28	10,00 ± 1,09	9,06 ± 1,19	*	ns	ns
n6/n3	2,74 ± 0,12 b	3,02 ± 0,15 a	3,11 ± 0,14 a	2,95 ± 0,16	2,99 ± 0,16	2,93 ± 0,14	*	ns	ns
AGPI/AGS	0,33 ± 0,04 a	0,21 ± 0,03 b	0,26 ± 0,03 b	0,24 ± 0,04	0,29 ± 0,04	0,26 ± 0,04	*	ns	ns
AGMI/AGS	0,79 ± 0,03	0,82 ± 0,03	0,82 ± 0,02	0,80 ± 0,04	0,81 ± 0,03	0,82 ± 0,03	ns	ns	ns
Δ9 C16	7,80 ± 0,50	8,12 ± 0,40	8,46 ± 0,28	8,19 ± 0,49	8,05 ± 0,36	8,13 ± 0,40	ns	ns	ns
Δ9 C18	61,72 ± 1,32	62,32 ± 1,48	62,37 ± 1,10	61,59 ± 1,63	62,50 ± 1,06	62,32 ± 1,15	ns	ns	ns
Alongase	67,74 ± 0,75	68,51 ± 0,47	67,96 ± 0,71	68,08 ± 0,62	68,19 ± 0,73	67,93 ± 0,64	ns	ns	ns

^{np} teste não-paramétrico; ¹AGS: ácidos graxos saturados; AGMI: ácidos graxos monoinsaturados; AGPI: ácidos graxos poliinsaturados; AGI: ácidos graxos insaturados; n3: ômega 3; n6: ômega 6; n6/n3: razão ômega 6/ômega 3; AGPI/AGS: razão ácidos graxos poliinsaturados/ácidos graxos saturados; AGMI/AGS: razão ácidos graxos monoinsaturados/ácidos graxos saturados; Δ9 C16: índice de atividade da enzima dessaturase C16; Δ9 C18: índice de atividade da enzima dessaturase C18; Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ($P \geq 0,05$) pelo teste Tukey e Kruskal-Wallis (*post hoc* Dunn-Bonferroni); ns: não significativo; * $P < 0,05$.

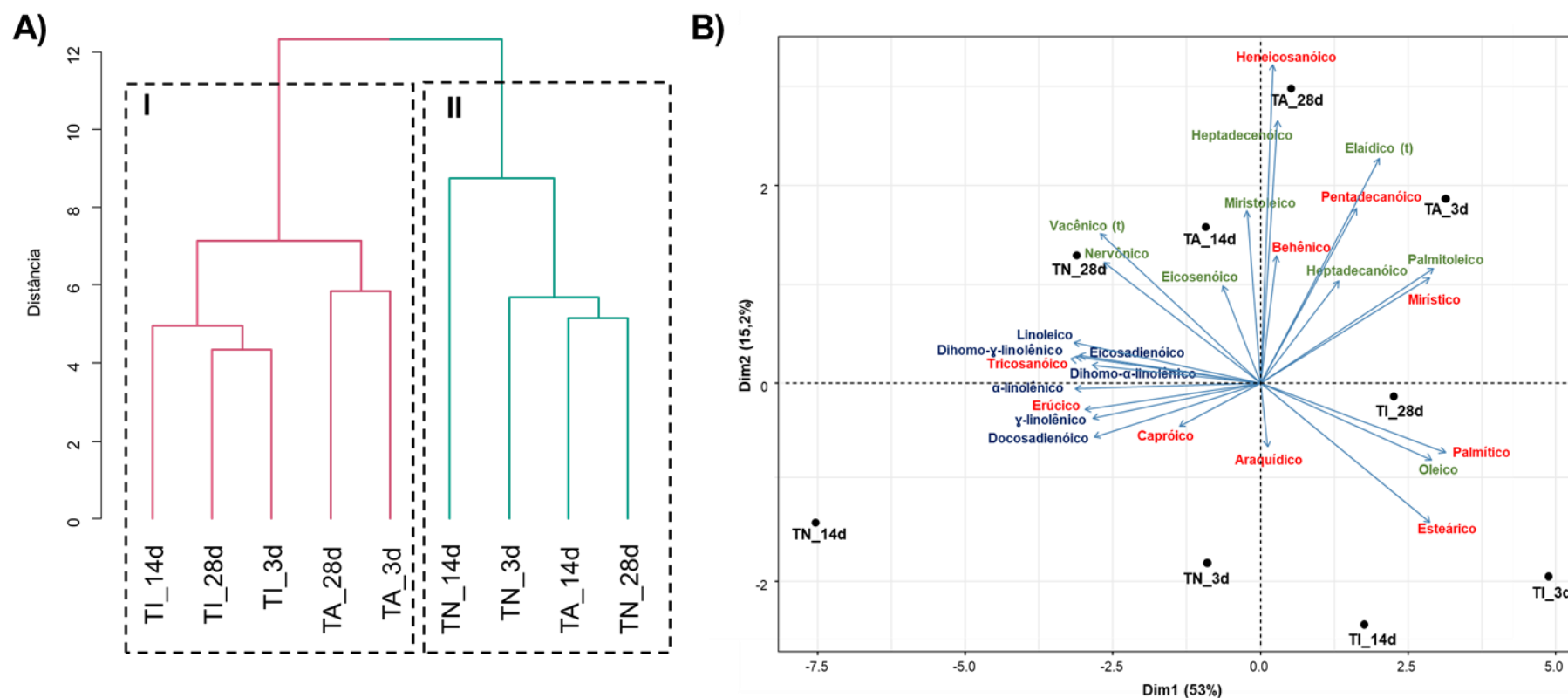


Figura 3. A) Dendrograma de agrupamento dos tratamentos em relação aos ácidos graxos; B) Análises de componentes principais (PCA) do perfil de ácidos graxos em relação aos tratamentos: Ácidos graxos saturados (vermelho); ácidos graxos monoinsaturados (verde); ácidos graxos poliinsaturados (azul); TA_3d: pHf alto com maturação 3 dias; TA_14d: pHf alto com maturação 14 dias; TA_28d: pHf alto com maturação 28 dias; TI_3d: pHf intermediário com maturação 3 dias; TI_14d: pHf intermediário com maturação 14 dias; TI_28d: pHf intermediário com maturação 28 dias; TN_3d: pHf normal com maturação 3 dias; TN_14d: pHf normal com maturação 14 dias; TN_28d: pHf normal com maturação 28 dias.

3.3. Compostos orgânicos voláteis e MFA

Os COVs da carne bovina (*Bos taurus indicus*) são mostrados na Tabela 5. Foram identificados no total de 23 compostos, sendo agrupados em sete famílias químicas na carne bovina *in natura*: álcoois (4), aldeído (1), cetonas (5), compostos sulfurados (2), éster (1), éter (1) e hidrocarbonetos (9). Poucos COVs característicos de carne bovina *in natura* de raças zebuínas relatados por Bernardo et al. (2021), puderam ser identificados neste trabalho, como hexano e octano. Os hidrocarbonetos foram os mais abundantes em carne bovina *in natura* neste estudo, corroborando com Sha et al. (2016).

Na Tabela 5 foi observado que a carne bovina *in natura* com pHf alto apresentou maiores concentrações de álcoois (1-propanol, 1-butanol, 3-metil-1-butanol e 2-etil-1-hexanol) em relação ao pHf normal, não diferindo da carne com pHf intermediário. Geralmente, maiores concentrações de álcoois ocorrem se houver maior oxidação lipídica (Marušić et al., 2014), o que pode ser confirmado em carne com pHf intermediário e alto, destacando o 1-propanol com maior concentração (1,670 µg/kg). 1-propanol apresenta aroma característico de pungente, podendo ser associado ao aroma estranho liberado durante a abertura da embalagem à vácuo. De acordo com Wang et al. (2018), os álcoois podem ser produzidos da decomposição de sacarídeos promovida por radicais livres devido à oxidação lipídica e são representativos de substâncias aromáticas. Deste modo, a carne com pHf acima do normal (>5,8) favoreceu o processo de β -oxidação principalmente dos ácidos graxos insaturados, podendo produzir estes compostos.

Ocorreu interação entre o pHf e tempo de maturação em relação aos COVs, conforme a Tabela 6. Em relação ao único aldeído detectado neste estudo, carne com pHf alto aos 28 dias de maturação apresentou maior concentração de 3-metilbutanal (1,802 µg/kg), em relação aos demais tempos de maturação, apresentando aroma de maltado/cacau/amêndoa. Resultados menores aos relatados por Frank et al. (2020), com 0,7 a 3,1 µg/kg de 3-metilbutanal em carne bovina maturadas por 84 a 140 dias. A principal via para formação deste composto é catabolismo do aminoácido ramificado, como a leucina (Olivares et al., 2009). Desta maneira, pode-se sugerir que houve maior atividade proteolítica com o aumento do tempo de maturação, ocorrendo maior disponibilidade de aminoácidos livre para reações oxidativa proteica.

Met e Şahin Yeşilçubuk (2017), relataram que 3-metilbutanal é comumente associado ao sabor estranho liberados durante a deterioração da carne, desta maneira este composto pode servir como indicador confiável para qualidade de carne *in natura*.

Dentre as cetonas, ocorreu interação para 2-propanona (pungente/azedo/sangue), 2,3-butanediona (amanteigado/caramelo) e 3-hidroxi-2-butanona (doce/amanteigado). Carne com pHf intermediário aos 28d apresentaram maiores concentrações de 2-propanona (8,124 µg/kg), 2,3-butanediona (9,929 µg/kg) e 3-hidroxi-2-butanona (10,340 µg/kg) em relação aos demais tempo de maturação. Carne com pH normal com 28 dias de maturação apresentou maior concentração para 3-hidroxi-2-butanona (34,190 µg/kg) em relação aos demais tempo de maturação, corroborando com Pérez et al. (2008). Estes hidrocarbonetos aumentaram com o aumento do tempo de maturação e podem ser usados como indicadores da degradação do aroma da carne *in natura* e negativamente correlacionados com o sabor (Insausti et al., 2002; Piao et al., 2017). Stetzer et al. (2008), relataram uma correlação entre o sabor de fígado e o 3-hidroxi-2-butanona.

Em relação ao composto contendo enxofre, dissulfeto de carbono (enxofre pútrido), carne com pHf normal aos três dias de maturação, apresentou maiores concentrações (2,482 µg/kg) em relação aos demais tempos. Este resultado é representativo nos cromatogramas de íons totais (Figura 6 e 7). O dissulfeto de carbono contribui para o aroma geral da carne bovina embalada à vácuo (Saraiva et al., 2015). Em carne *in natura* cordeiros, pode ser considerado um composto volátil típico encontrado (Karabagias, 2018).

Também houve interação entre pHf e tempo de maturação para as concentrações de hidrocarbonetos (3-metilpentano, hexano, 2,3,4-trimetilpentano e 2,2,4,4-tetrametilpentano). Estes resultados podem ser visualizados nos cromatogramas de íons totais, conforme a Figura 6 e 7.

Do ponto de vista quantitativo, o hexano (média 38,493 µg/kg) foi considerado o mais abundante entre os demais compostos detectados na amostra. Segundo Gorraiz et al. (2002), este composto é considerado um dos produtos da oxidação lipídica que tem relação com sabor gordurosa da carne.

Tabela 5. Médias $\pm$ erro padrão ($\mu\text{g/kg}$) dos compostos orgânicos voláteis (COVs) da carne bovina *in natura* (*Bos taurus indicus*) em função das diferentes faixas de pH final (pHf) e tempo de maturação (TM)

COVs	ILR ¹	Descrição do aroma ²	pH final			Tempo de maturação			P-valor		
			Normal	Intermediário	Alto	3d	14d	28d	pHf	TM	pHf*TM
Álcoois											
1-propanol ^{np}	531	Álcool/pungente	0,671 ± 0,361 b	0,891 ± 0,653 ab	1,670 ± 1,607 a	2,092 ± 0,996	1,047 ± 1,402	0,172 ± 0,096	*	ns	ns
1-butanol ^{np}	658	Remédio/ fruta/vinho	0,023 ± 0,027 b	ND	0,215 ± 0,137 a	0,040 ± 0,062	0,102 ± 0,089	0,098 ± 0,111	*	ns	ns
3-metil-1-butanol ^{np}	733	Maltado/queimado	0,023 ± 0,040 b	0,056 ± 0,049 ab	0,401 ± 0,251 a	0,046 ± 0,077 b	0,045 ± 0,055 b	0,389 ± 0,244 a	*	*	ns
2-etil-1-hexanol ^{np}	1034	Cítrico/floral/oleoso	0,046 ± 0,061 b	0,029 ± 0,049 b	0,401 ± 0,303 a	0,304 ± 0,314	0,092 ± 0,077	0,096 ± 0,098	*	ns	ns
Aldeído											
3-metilbutanal ^{np}	645	Maltado/cacau/amêndoa	ND	0,092 ± 0,107	0,648 ± 0,522	0,019 ± 0,032	0,095 ± 0,112	0,622 ± 0,525	*	ns	*
Cetonas											
2-propanona	479	Pungente/azedo/sangue	4,896 ± 1,183	5,919 ± 1,187	5,337 ± 1,247	4,969 ± 1,185	4,608 ± 1,064	6,523 ± 1,246	ns	ns	*
2,3-butanediona ^{np}	574	Amanteigado/caramelo	3,844 ± 3,268	5,045 ± 3,143	0,632 ± 0,146	0,202 ± 0,133	2,086 ± 1,474	6,964 ± 3,924	ns	*	*
4-penten-2-ona ^{np}	686	Frutado	0,015 ± 0,027	0,047 ± 0,045	0,024 ± 0,032	0,029 ± 0,034	0,040 ± 0,041	0,018 ± 0,031	ns	ns	ns
3-metil-2-botanona ^{np}	687	Acetona	0,046 ± 0,051	0,050 ± 0,049	0,038 ± 0,031	0,029 ± 0,027	0,073 ± 0,063	0,031 ± 0,031	ns	ns	ns
3-hidroxi-2-butanona	708	Doce/amanteigado	13,354 ± 8,018	12,322 ± 5,327	5,389 ± 2,059	0,948 ± 0,528	8,980 ± 4,245	20,50 ± 7,090	ns	ns	*
Compostos sulfurados											
Dimetil sulfeto ^{np}	500	Repolho/enxofre/gasolina	7,851 ± 3,557 a	1,392 ± 0,243 b	7,058 ± 3,733 ab	4,087 ± 2,361	8,537 ± 4,416	3,828 ± 1,912	*	ns	ns
Dissulfeto de carbono ^{np}	536	Enxofre pútrido	ND	0,042 ± 0,052	0,652 ± 0,521	0,180 ± 0,304	0,119 ± 0,142	0,402 ± 0,453	ns	*	*
Éter											
Éter butil isobutírico	887	Frutado	0,421 ± 0,197	0,305 ± 0,194	0,317 ± 0,161	0,135 ± 0,107 b	0,360 ± 0,175 ab	0,539 ± 0,214 a	ns	*	ns
Éster											
Butirato de metila ^{np}	721	Doce/frutado	0,136 ± 0,158	0,035 ± 0,048	0,011 ± 0,020	0,009 ± 0,015	0,039 ± 0,041	0,133 ± 0,160	ns	ns	ns

Tabela 5. (Continuação)

COVs	ILR ¹	Descrição do aroma ²	pH final			Tempo de maturação			P-valor		
			Normal	Intermediário	Alto	3d	14d	28d	pHf	TM	pHf*TM
Hidrocarbonetos											
3-metilpentano ^{np}	564	Alcano	0,247 ± 0,105	0,146 ± 0,060	0,251 ± 0,033	0,292 ± 0,026	0,273 ± 0,092	0,088 ± 0,056	ns	*	*
Hexano ^{np}	588	Alcano	39,971 ± 3,903	40,078 ± 5,697	35,667 ± 7,825	31,490 ± 3,943	40,667 ± 3,605	43,082 ± 8,298	ns	*	*
Triclorometano ^{np}	610	Adocicado/Alcano	2,979 ± 0,783	3,081 ± 1,065	1,833 ± 0,434	3,815 ± 1,078 a	2,309 ± 0,453 ab	1,809 ± 0,606 b	ns	*	ns
Metilciclopentano	620	Alcano	0,189 ± 0,045	0,184 ± 0,041	0,158 ± 0,047	0,216 ± 0,045	0,162 ± 0,042	0,154 ± 0,043	ns	ns	ns
Ciclohexano	655	Pungente	0,183 ± 0,103	0,197 ± 0,104	0,062 ± 0,051	0,285 ± 0,114 a	0,135 ± 0,080 ab	0,026 ± 0,032 b	ns	*	ns
2,3,4-trimetilpentano	747	Alcano	0,170 ± 0,119	0,129 ± 0,077	0,309 ± 0,139	0,128 ± 0,103	0,239 ± 0,135	0,241 ± 0,112	ns	ns	*
2,3,3-trimetilpentano ^{np}	752	Alcano	0,328 ± 0,232	0,083 ± 0,112	0,257 ± 0,189	0,016 ± 0,028 b	0,219 ± 0,167 ab	0,429 ± 0,252 a	ns	*	ns
2,2,4,4-tetrametilpentano ^{np}	782	Alcano	0,141 ± 0,097	ND	0,133 ± 0,075	0,014 ± 0,017	0,038 ± 0,045	0,223 ± 0,101	*	*	*
Octano ^{np}	802	Alcano	0,378 ± 0,262	0,132 ± 0,140	0,528 ± 0,271	0,114 ± 0,124	0,407 ± 0,242	0,516 ± 0,294	ns	ns	ns

^{np} teste não-paramétrico; ¹ILR: índice de retenção linear calculado para coluna RTx-5MS (30m), usando n-alcanos (C7-C30); ²As descrições de aroma foram derivadas do banco de dados: *Flavornet* (http://www.flavornet.org/f_kovats.html) e *PubChem* (<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>); ND: não detectado. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ($P \geq 0,05$) pelo teste Tukey e Kruskal-Wallis (*post hoc* Dunn-Bonferroni); ns: não significativo; * $P < 0,05$.

Tabela 6. Médias $\pm$ erro padrão ($\mu\text{g/kg}$) dos compostos orgânicos voláteis (COVs) da carne bovina *in natura* (*Bos taurus indicus*) em função do efeito da interação pH final x tempo de maturação

pH final	Tempo de maturação		
	3d	14d	28d
<i>3-metilbutanal</i>			
Alto	0,053 $\pm$ 0,053 Ab	0,089 $\pm$ 0,089 Ab	1,802 $\pm$ 0,720 Aa
Intermediário	ND	0,196 $\pm$ 0,176 Aa	0,065 $\pm$ 0,045 Aa
Normal	ND	ND	ND
<i>2-propanona</i>			
Alto	3,343 $\pm$ 0,815 Aa	5,636 $\pm$ 1,162 Aa	7,031 $\pm$ 1,372 Aa
Intermediário	4,560 $\pm$ 0,773 Ab	4,847 $\pm$ 1,286 Ab	8,124 $\pm$ 0,931 Aa
Normal	6,936 $\pm$ 1,423 Aa	3,340 $\pm$ 0,552 Aa	4,413 $\pm$ 1,035 Aa
<i>2,3-butanediona</i>			
Alto	0,491 $\pm$ 0,166 Aa	0,782 $\pm$ 0,140 Aa	0,622 $\pm$ 0,128 Aa
Intermediário	0,058 $\pm$ 0,053 Ab	4,317 $\pm$ 2,319 Aab	9,929 $\pm$ 4,149 Aa
Normal	0,034 $\pm$ 0,034 Ab	1,159 $\pm$ 0,698 Aab	10,340 $\pm$ 4,801 Aa
<i>3-hidroxi-2-butanona</i>			
Alto	2,268 $\pm$ 0,519 Aa	5,127 $\pm$ 0,962 Aa	8,772 $\pm$ 2,996 Ba
Intermediário	0,239 $\pm$ 0,218 Bb	16,158 $\pm$ 5,725 Aa	18,555 $\pm$ 4,791 ABa
Normal	0,217 $\pm$ 0,217 Bc	5,655 $\pm$ 3,478 Ab	34,190 $\pm$ 8,559 Aa
<i>Dissulfeto de carbono</i>			
Alto	1,903 $\pm$ 1,540 Aa	2,838 $\pm$ 2,390 Aa	0,269 $\pm$ 0,131 Aa
Intermediário	1,850 $\pm$ 0,310 Aa	0,219 $\pm$ 0,071 Aa	0,139 $\pm$ 0,079 Aa
Normal	2,482 $\pm$ 0,824 Aa	0,084 $\pm$ 0,069 Ab	0,107 $\pm$ 0,070 Ab
<i>3-metilpentano</i>			
Alto	0,256 $\pm$ 0,016 Aa	0,268 $\pm$ 0,004 Aa	0,229 $\pm$ 0,058 Aa
Intermediário	0,293 $\pm$ 0,016 Aa	0,171 $\pm$ 0,058 Aab	ND
Normal	0,328 $\pm$ 0,035 Aa	0,380 $\pm$ 0,146 Aab	0,034 $\pm$ 0,034 Ab
<i>Hexano</i>			
Alto	37,97 $\pm$ 5,590 Aa	42,59 $\pm$ 4,697 Aa	26,43 $\pm$ 11,27 Aa
Intermediário	26,00 $\pm$ 0,976 Ab	38,71 $\pm$ 4,320 Aab	53,16 $\pm$ 4,093 Aa
Normal	29,58 $\pm$ 1,897 Aa	40,69 $\pm$ 1,402 Aa	49,63 $\pm$ 2,421 Aa
<i>2,3,4-trimetilpentano</i>			
Alto	0,363 $\pm$ 0,130 A	0,354 $\pm$ 0,189 Aa	0,210 $\pm$ 0,102 Aa
Intermediário	ND	0,253 $\pm$ 0,088 Aa	0,115 $\pm$ 0,073 Aa
Normal	ND	0,112 $\pm$ 0,112 Ab	0,398 $\pm$ 0,138 Aa
<i>2,2,4,4-tetrametilpentano</i>			
Alto	0,040 $\pm$ 0,027 Aa	0,114 $\pm$ 0,072 Aa	0,244 $\pm$ 0,094 Aa
Intermediário	ND	ND	ND
Normal	ND	ND	0,425 $\pm$ 0,089 Aa

ND: não detectado; Médias seguida da mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si ($P \geq 0,05$) pelo teste Tukey e Kruskal-Wallis (post hoc Dunn-Bonferroni).

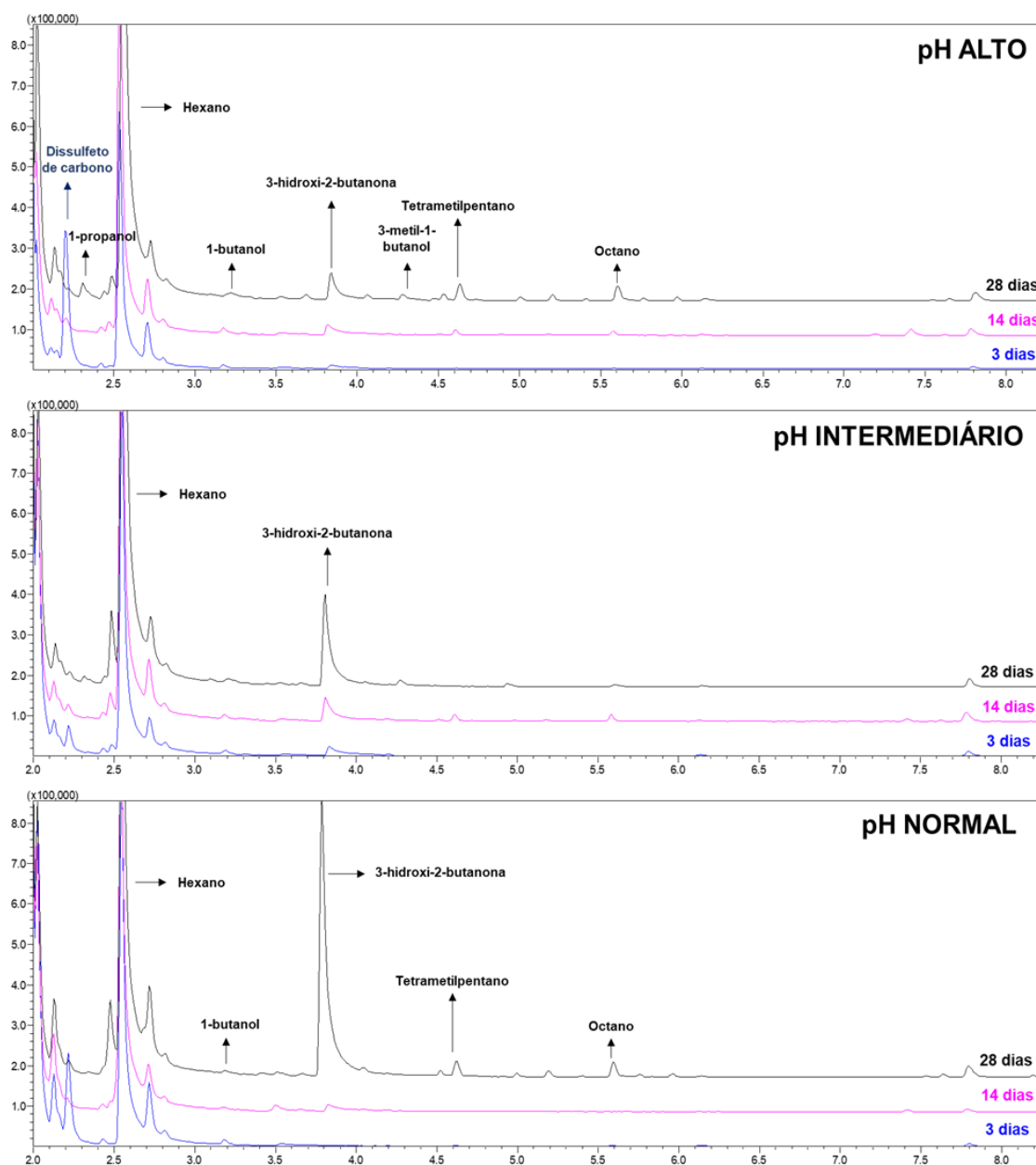


Figura 4. Cromatogramas de íons totais de compostos orgânicos voláteis em carne bovina *in natura* (*Bos taurus indicus*) em diferentes faixas de pHf por tempo de maturação.

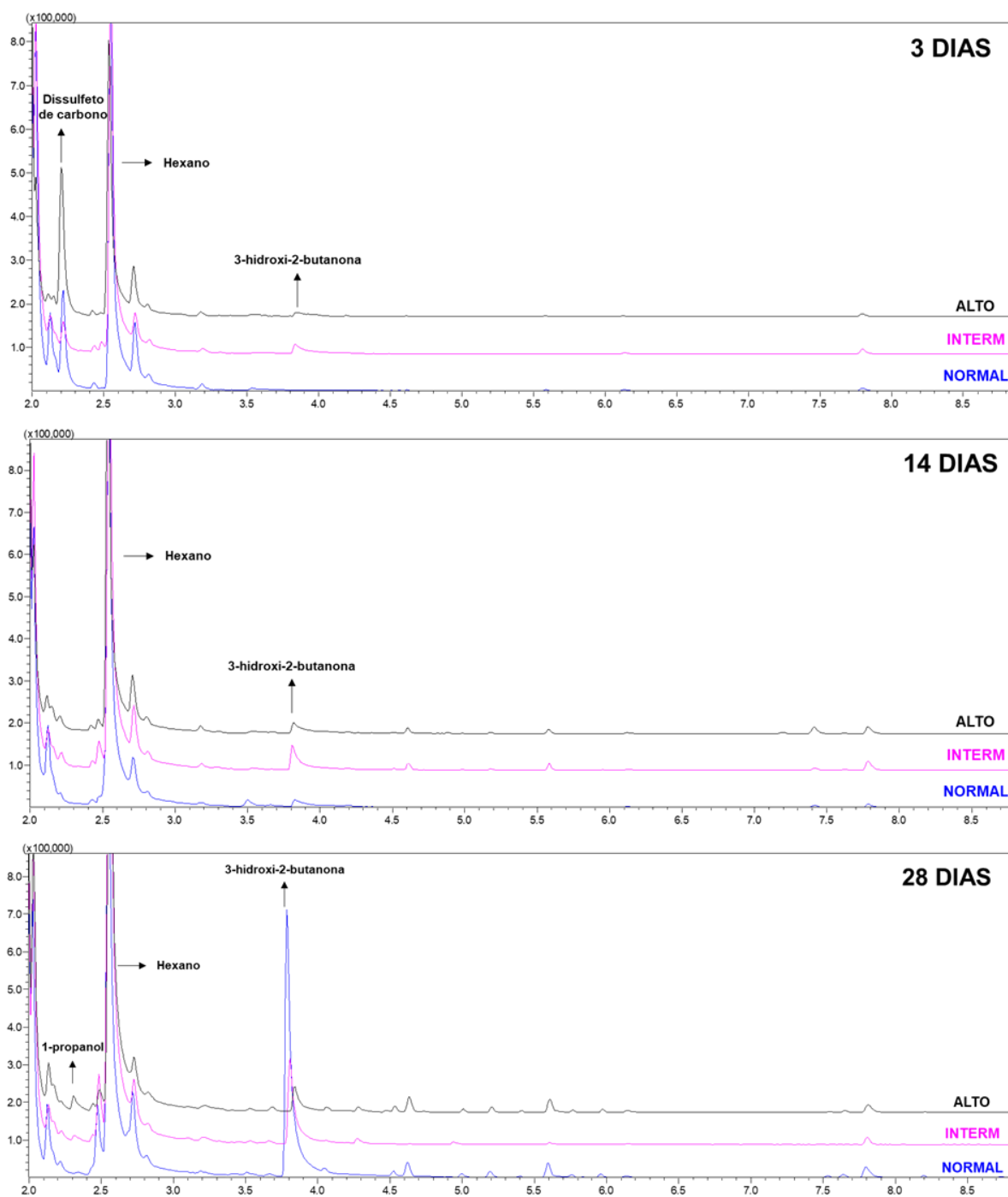


Figura 5. Cromatogramas de íons totais de compostos orgânicos voláteis em carne bovina *in natura* (*Bos taurus indicus*) em diferentes tempos de maturação por faixas de pHf.

Para comparação dos tratamentos em relação aos COVs, uma análise de agrupamento hierárquica (HCA) e PCA foram realizadas (Figura 4). Pode ser obtido com base no dendrograma, nove tratamentos foram evidentemente classificados em 2 grupos. Sete tratamentos (TI_3d, TN_3d, TI_28d, TA_14d, TA_3d, TI_14d e TN_14d) pertenciam ao agrupamento I e dois tratamentos (TA_28d e TN_28d) pertenciam ao agrupamento II. Consequentemente, este HCA revelou que os COVs dos tratamentos do agrupamento II eram relativamente semelhantes entre si e correlacionados negativamente em relação aos demais tratamentos do agrupamento II, com exceção do tratamento TA_14d e TI_28d. Pode-se concluir que o tempo de maturação influenciou o perfil volátil de forma geral, principalmente na produção de aldeído, alcoois e cetonas.

A análise de PCA mostrou que 63,1% da variabilidade foi explicada pelas duas primeiras dimensões ou componentes principais, sendo que a Dim1 representou 38,4% e a Dim2 representou 24,7% da variância total. Consistente com os resultados do HCA, os 23 compostos foram divididos em 4 quadrantes. No quadrante 1, o TA_28d apresentaram uma correlação positiva com álcoois (1-propanol, 3-metil-1-butanol e 1-butanol) e aldeído (3-metilbutanal). Contudo, observa-se que o TN_28d apesar de pertecerem ao mesmo grupo, estão relacionados a outros compostos, como cetonas (3-hidroxi-2-butanona, 2,3-butanediona), éter (éter butil isobutílico), éster (butirato de metila) e hidrocarboneto (hexano).

No quadrante 2, observou-se que dissulfeto de carbono está correlacionado com os tratamentos que apresentam tempo de maturação de 3 dias independente da faixa de pHf, podendo inferir que o composto diminuiu com maior tempo de maturação, ocorrendo uma correlação negativa. O dissulfeto de carbono (enxofre pútrido), por ser composto sulfurado, é considerado também como produto da degradação de aminoácidos contendo enxofre, como a cisteína (Lee et al., 2021; Machiels et al., 2004). Além de contribuir para o aroma geral da carne bovina *in natura* (Bhadury et al., 2021; Kilgannon et al., 2020; Lee et al., 2021; Saraiva et al., 2015).

Para explorar a relação entre o perfil de ácidos graxos e COVs, um MFA foi realizado, conforme a Figura 5A. Para a carne bovina *in natura*, as duas primeiras dimensões representam 54,49% da variabilidade dos dados. Além

disso, o tamanho das setas que representam os ácidos graxos e COVs é proporcional com a contribuição e explicação desses compostos com o MFA. Pode-se observar também na Figura 5B que existe muita proximidade nas respostas de ácidos graxos com COVs, entendendo-se como elevada correlação entre eles. Este resultado corrobora com Elmore et al. (2002) e Piao et al. (2017). A maioria dos COVs é o resultado da oxidação química ou enzimática de ácidos graxos insaturados e posterior interação com proteínas, peptídeos e aminoácidos livres (Marušić et al., 2014). Portanto, pode ser entendido que a formação de COVs deve-se à presença de determinados ácidos graxos.

Entende-se que a formação de determinados COVs significa a diminuição dos ácidos graxos que as formam, dito de outra forma, haveria correlação negativa entre eles. Nesse sentido, foi destacado as correlações negativas entre ácidos graxos e COVs na tentativa de explicar a procedência da formação dos COVs:

Observa-se que na primeira dimensão, os AGPI, situados no quadrante 3, estão correlacionados negativamente com alguns hidrocarbonetos, como o ciclohexano, metilciclopentano e 3-metilpentano. Pode-se inferir que esses ácidos graxos sofrem oxidação para formação destes compostos. Ácidos graxos com cadeias de carbono mais longas e um maior grau de insaturação são mais propensos à peroxidação e gerar compostos secundários que podem causar ranço e sabor desagradável (Holman et al., 2019; Stetzer et al., 2008).

Na segunda dimensão, destaca-se também uma correlação negativa entre os AGPI, situados no quadrante 4 e alguns álcoois (1-propanol, 3-metil-1-butanol e 1-butanol) e aldeído (3-metilbutanal), situados no quadrante 2. Isto significa que pode ocorrer a formação de COVs devido ao processo de β -oxidação desses ácidos graxos. De acordo com Piao et al. (2017), ocorre interações significativas entre os aldeídos e os teores de ácidos graxos insaturados, devido o processo de oxidação.

De acordo com Van Ba et al. (2013), os compostos oxidados por AGPI, em sua maioria álcoois e aldeídos, são mais voláteis e têm baixo limiar de detecção de odor e podem ser associados aos sabores negativos, não sendo agradáveis ao consumidor.

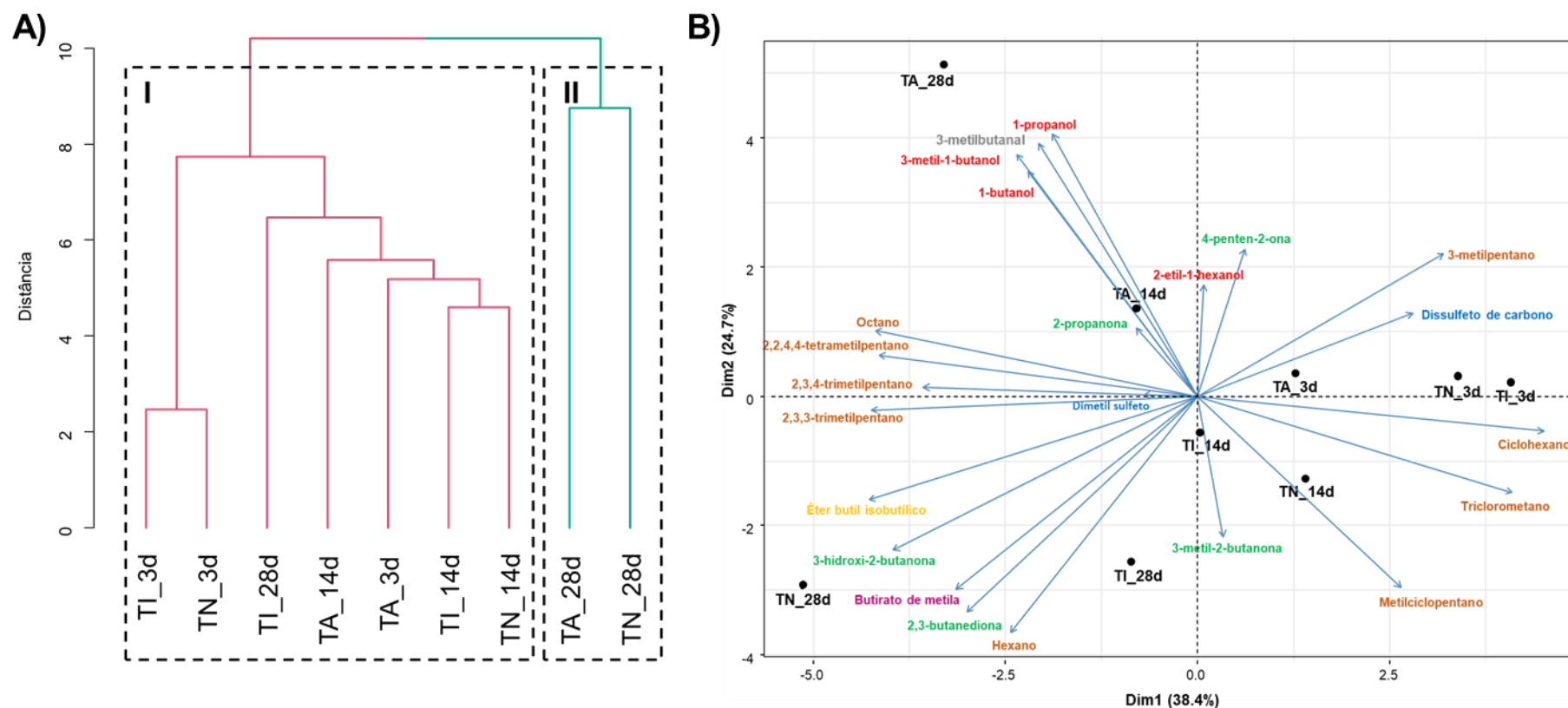
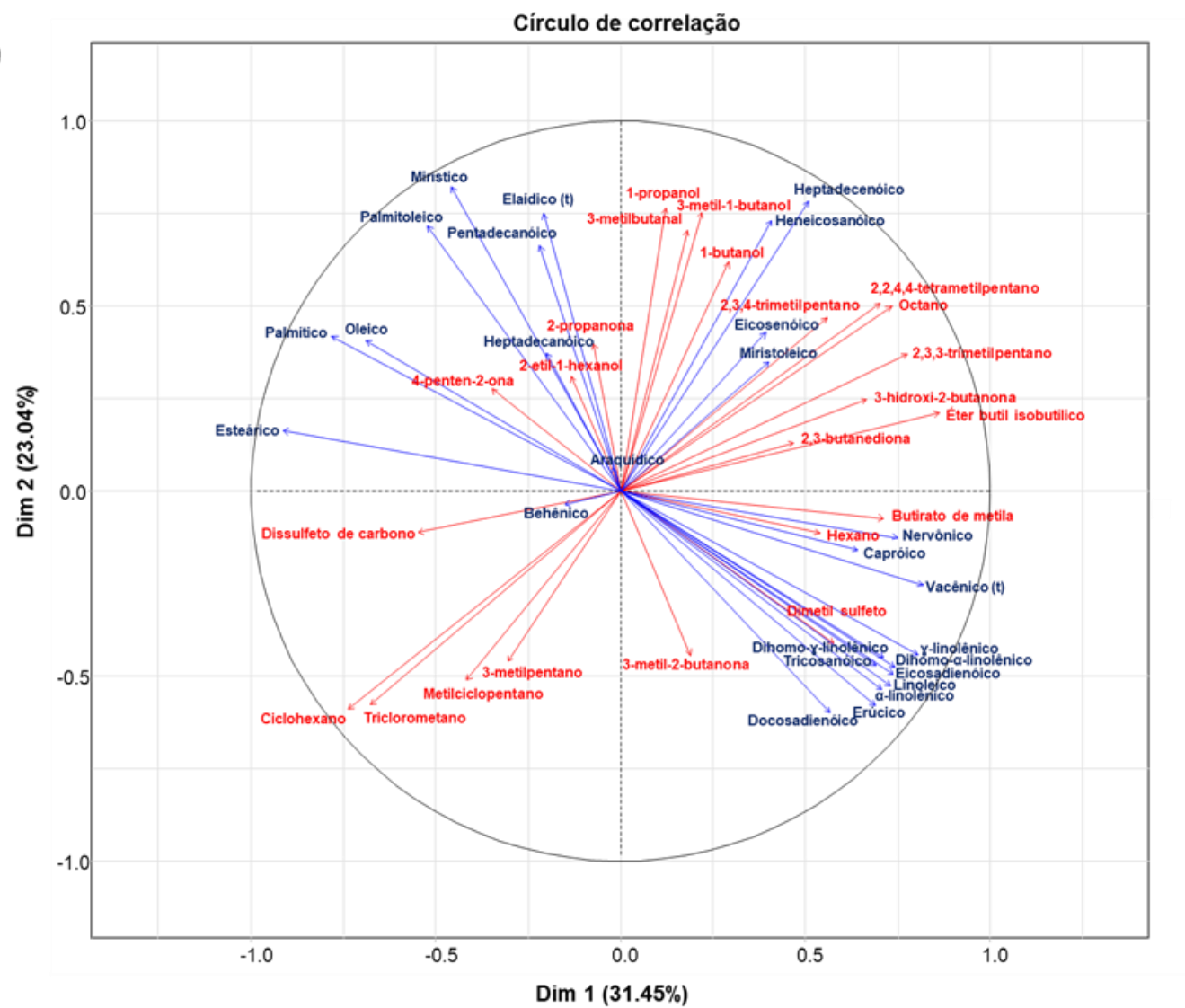


Figura 6. A) Dendrograma de agrupamento dos tratamentos em relação aos compostos orgânicos voláteis; B) Análises de componentes principais (PCA) dos compostos orgânicos voláteis em relação aos tratamentos: Álcoois (vermelho); aldeído (cinza); cetonas (verde); compostos sulfurados (azul); éter (amarelo); éster (rosa); hidrocarbonetos (marron); TA_3d: pHf alto com maturação 3 dias; TA_14d: pHf alto com maturação 14 dias; TA_28d: pHf alto com maturação 28 dias; TI_3d: pHf intermediário com maturação 3 dias; TI_14d: pHf intermediário com maturação 14 dias; TI_28d: pHf intermediário com maturação 28 dias; TN_3d: pHf normal com maturação 3 dias; TN_14d: pHf normal com maturação 14 dias; TN_28d: pHf normal com maturação 28 dias.

A)



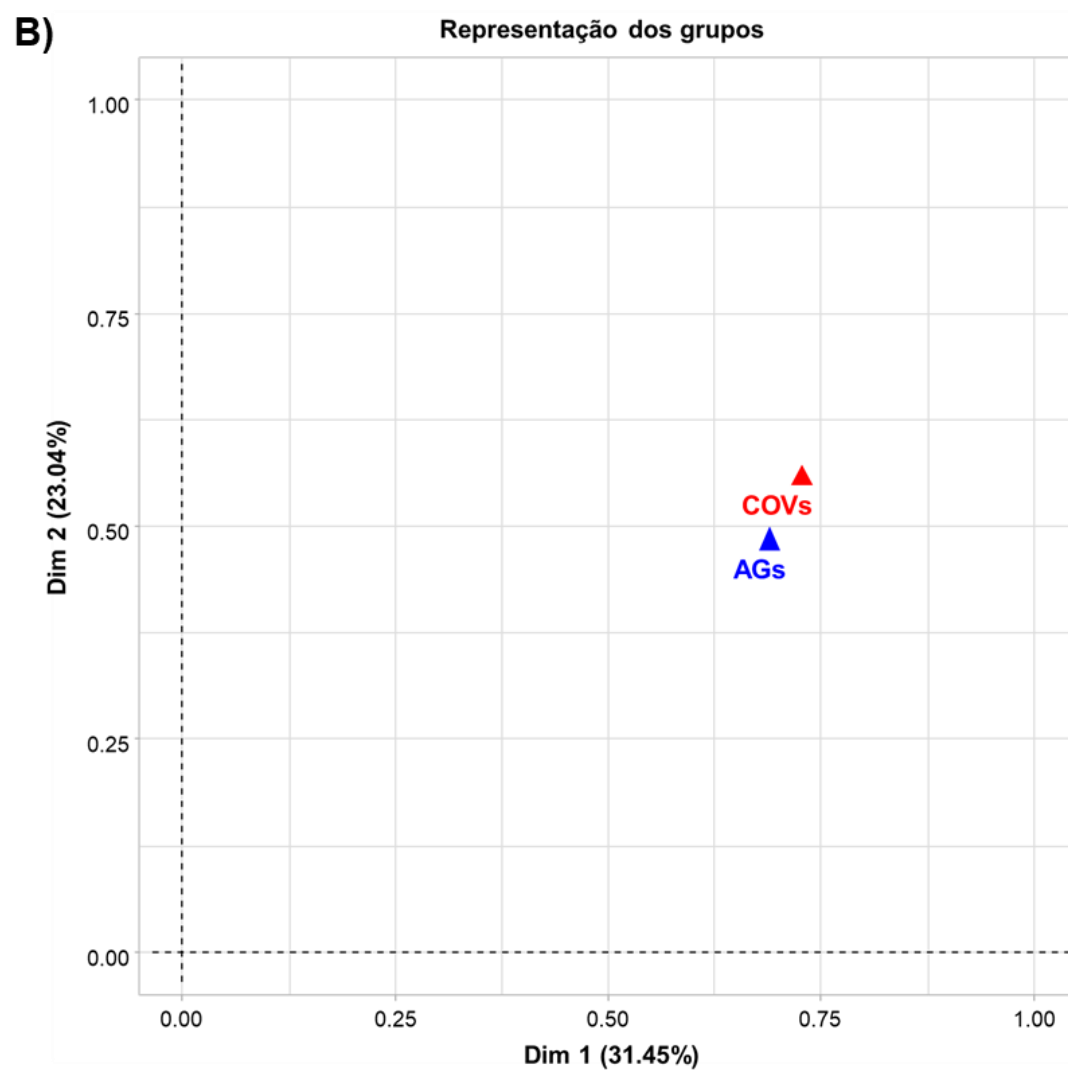


Figura 7. A) Análise de múltiplos fatores (MFA); B) Representação dos grupos de perfil de ácidos graxos (AGs) e compostos orgânicos voláteis (COVs)

4. Conclusões

O pHf intermediário e alto da carne bovina (*Bos taurus indicus*) *in natura* embalada a vácuo e maturadas aos 28 dias contribuíram para perfil de compostos aromáticos típico de carne *in natura*, como álcoois, aldeído e cetonas. Estes compostos são considerados indicadores de oxidação lipídica, por meio da β -oxidação dos ácidos graxos insaturados presentes neste estudo.

Agradecimentos

Este estudo foi aprovado pela Comissão de Ética no Uso de Animais da ESALQ, USP - Piracicaba, SP (Protocolo nº 2019/22) e financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e corresponde a uma extensão do Projeto de Pesquisa com Auxílio à Pesquisa – Temático (Processo FAPESP nº. 17/26667-2), intitulado “Qualidade de carne em bovinos *Bos indicus*: marcadores biológicos para atributos do produto cárneo em diferentes faixas de pH final” sob a responsabilidade da Prof^a. Dra. Carmen J. Contreras Castillo – ESALQ/USP, Piracicaba, SP.

Referências

- Anderson, S. (2007). Determination of fat, moisture, and protein in meat and meat products by using the FOSS FoodScan™ near-infrared spectrophotometer with FOSS artificial neural network calibration model and associated database: Collaborative study. *Journal of AOAC International*, 90(4), 1073–1083. <https://doi.org/10.1093/jaoac/90.4.1073>
- Aranha, A. S., Andrighetto, C., Lupatini, G. C., Mateus, G. P., Ducatti, C., Roça, R. O., Martins, M. B., Santos, J. A. A., Luz, P. A. C., Utsunomiya, A. T. H., & Athayde, N. B. (2018). Performance, carcass and meat characteristics of two cattle categories finished on pasture during the dry season with supplementation in different forage allowance. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 70(2), 517–524. <https://doi.org/10.1590/1678-4162-9576>
- Bernardo, A. P. da S., Marinelli Saraiva Ferreira, F., Muniz Da Silva, A. C., Souza Prestes, F., Francisco, V. C., Tieko Nassu, R., Da Silva Do Nascimento, M., & Bertelli Pflanzner, S. (2021). Dry-aged and wet-aged beef: Effects of aging time and temperature on microbiological profile, physicochemical characteristics, volatile compound profile and weight loss of meat from Nellore cattle (*Bos indicus*). *Animal Production Science*, 61(14), 1497–1509. <https://doi.org/10.1071/AN20120>
- Bertram, H. C., & Andersen, H. J. (2008). Proton NMR Relaxometry in Meat Science. *Modern Magnetic Resonance*, 1729–1733. https://doi.org/10.1007/1-4020-3910-7_194
- Bhadury, D., Nolvachai, Y., Marriott, P. J., Tanner, J., & Tuck, K. L. (2021). Detection of Volatiles from Raw Beef Meat from Different Packaging Systems Using Solid-

- Phase Microextraction GC – Accurate Mass Spectrometry. *Foods*, 10.
- Boler, D. D., & Woerner, D. R. (2017). What is meat? A perspective from the American Meat Science Association. *Animal Frontiers*, 7(4), 8–11. <https://doi.org/10.2527/af.2017.0436>
- Calkins, C. R., & Hodgen, J. M. (2007). A fresh look at meat flavor. *Meat Science*, 77(1 SPEC. ISS.), 63–80. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.04.016>
- Casaburi, A., Piombino, P., Nychas, G. J., Villani, F., & Ercolini, D. (2015). Bacterial populations and the volatilome associated to meat spoilage. *Food Microbiology*, 45(PA), 83–102. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.02.002>
- Cifuni, G. F., Napolitano, F., Riviezz, A. M., Braghieri, A., & Girolami, A. (2004). Fatty acid profile, cholesterol content and tenderness of meat from Podolian young bulls. *Meat Science*, 67(2), 289–297. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2003.10.017>
- Contreras-Castillo, C. J., Lomiwes, D., Wu, G., Frost, D., & Farouk, M. M. (2016). The effect of electrical stimulation on post mortem myofibrillar protein degradation and small heat shock protein kinetics in bull beef. *Meat Science*, 113, 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.11.012>
- da Luz, P. A. C., Andrighetto, C., Lupatini, G. C., Aranha, H. S., Trivelin, G. A., Mateus, G. P., Santos, C. T., Francisco, C. de L., Castilhos, A. M., & Jorge, A. M. (2019). Effect of integrated crop-livestock systems in carcass and meat quality of Nellore cattle. *Livestock Science*, 220(July 2018), 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2018.11.018>
- Dashdorj, D., Amna, T., & Hwang, I. (2015). Influence of specific taste-active components on meat flavor as affected by intrinsic and extrinsic factors: an overview. *European Food Research and Technology*, 241(2), 157–171. <https://doi.org/10.1007/s00217-015-2449-3>
- Denzer, M. L., Cassens, A. M., Wills, K. M., Pfeiffer, M. M., Mafi, G. G., VanOverbeke, D. L., & Ramanathan, R. (2020). Effects of Enhancement and Modified Atmosphere Packaging on Flavor and Tenderness of Dark-Cutting Beef. *Meat and Muscle Biology*, 4(1). <https://doi.org/10.22175/mmb.11157>
- Elmore, J. S., Campo, M. M., Enser, M., & Mottram, D. S. (2002). Effect of lipid composition on meat-like model systems containing cysteine, ribose, and polyunsaturated fatty acids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(5), 1126–1132. <https://doi.org/10.1021/jf0108718>
- English, A. R., Wills, K. M., Harsh, B. N., Mafi, G. G., VanOverbeke, D. L., & Ramanathan, R. (2016). Effects of aging on the fundamental color chemistry of dark-cutting beef. *Journal of Animal Science*, 94(9), 4040–4048. <https://doi.org/10.2527/jas.2016-0561>
- Frank, D., Hughes, J., Piyasiri, U., Zhang, Y., Kaur, M., Li, Y., Mellor, G., & Stark, J. (2020). Volatile and non-volatile metabolite changes in 140-day stored vacuum packaged chilled beef and potential shelf life markers. *Meat Science*, 161(December 2018), 108016. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.108016>
- Gorraiz, C., Beriain, M. J., Chasco, J., & Insausti, K. (2002). Effect of aging time on volatile compounds, odor, and flavor of cooked beef from Pirenaica and Friesian bulls and heifers. *Journal of Food Science*, 67(3), 916–922. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb09428.x>
- Gruffat, D., Bauchart, D., Thomas, A., Parafita, E., & Durand, D. (2021). Fatty acid composition and oxidation in beef muscles as affected by ageing times and cooking methods. *Food Chemistry*, 343(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128476>

- Guo, R., Yu, F., Wang, C., Jiang, H., Yu, L., Zhao, M., & Liu, X. (2020). Determination of the Volatiles in Fermented Bamboo Shoots by Head Space–Solid-Phase Micro Extraction (HS-SPME) with Gas Chromatography–Olfactory–Mass Spectrometry (GC-O-MS) and Aroma Extract Dilution Analysis (AEDA). *Analytical Letters*, 0(0), 1–18. <https://doi.org/10.1080/00032719.2020.1795667>
- Holman, B. W. B., Ponnampalam, E. N., Kilgannon, A. K., Collins, D., Plozza, T., & Hopkins, D. L. (2019). Moisture content, fatty acid profile and oxidative traits of aged beef subjected to different temperature-time combinations. *Meat Science*, 157(June), 107876. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.107876>
- Insausti, K., Beriain, M. J., Gorraiz, C., & Purroy, A. (2002). Volatile compounds of raw beef from 5 local Spanish cattle breeds stored under modified atmosphere. *Journal of Food Science*, 67(4), 1580–1589. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb10325.x>
- Karabagias, I. K. (2018). Volatile profile of raw lamb meat stored at $4 \pm 1^\circ\text{C}$: The potential of specific aldehyde ratios as indicators of lamb meat quality. *Foods*, 7(3), 1–11. <https://doi.org/10.3390/foods7030040>
- Kilgannon, A. K., Holman, B. W. B., Frank, D. C., Mawson, A. J., Collins, D., & Hopkins, D. L. (2020). Temperature-time combination effects on aged beef volatile profiles and their relationship to sensory attributes. *Meat Science*, 168(February), 108193. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108193>
- Lala, B., Cecato, U., Pereira, V., Mari, G., Grande, P., Müller, L., Claudino-Silva, S., & Bridi, A. M. (2019). Grazing Height of Xaraés Grass Improve Longissimus Muscle Fatty. *Revista Valore*, 4, 196–209.
- Lee, D., Lee, H. J., Yoon, J. W., Kim, M., & Jo, C. (2021). Effect of different aging methods on the formation of aroma volatiles in beef strip loins. *Foods*, 10(1), 1–16. <https://doi.org/10.3390/foods10010146>
- Listrat, A., Lebre, B., Louveau, I., Astruc, T., Bonnet, M., Lefaucheur, L., & Bugeon, J. (2016). How muscle structure and composition determine meat quality. *Productions Animales*, 28(2), 125–136.
- Machiels, D., Istasse, L., & Van Ruth, S. M. (2004). Gas chromatography-olfactometry analysis of beef meat originating from differently fed Belgian Blue, Limousin and Aberdeen Angus bulls. *Food Chemistry*, 86(3), 377–383. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.09.011>
- Mansur, A. R., Song, E. J., Cho, Y. S., Nam, Y. Do, Choi, Y. S., Kim, D. O., Seo, D. H., & Nam, T. G. (2019). Comparative evaluation of spoilage-related bacterial diversity and metabolite profiles in chilled beef stored under air and vacuum packaging. *Food Microbiology*, 77(September 2018), 166–172. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2018.09.006>
- Marušić, N., Vidaček, S., Janči, T., Petrak, T., & Medić, H. (2014). Determination of volatile compounds and quality parameters of traditional Istrian dry-cured ham. *Meat Science*, 96(4), 1409–1416. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.12.003>
- Mattson, F. H., & Grundy, S. M. (1985). Comparison of effects of dietary saturated, monounsaturated, and polyunsaturated fatty acids on plasma lipids and lipoproteins in man. *Journal of Lipid Research*, 26(2), 194–202. [https://doi.org/10.1016/s0022-2275\(20\)34389-3](https://doi.org/10.1016/s0022-2275(20)34389-3)
- Olivares, A., Navarro, J. L., & Flores, M. (2009). Distribution of volatile compounds in lean and subcutaneous fat tissues during processing of dry fermented sausages. *Food Research International*, 42(9), 1303–1308. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.03.017>
- Piao, M. Y., Yong, H. I., Lee, H. J., Fassah, D. M., Kim, H. J., Jo, C., & Baik, M.

- (2017). Comparison of fatty acid profiles and volatile compounds among quality grades and their association with carcass characteristics in longissimus dorsi and semimembranosus muscles of Korean cattle steer. *Livestock Science*, 198(February), 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2017.02.021>
- R Core Team. (2019). An Introduction to dplR. *Foundation for Statistical Computing*. www.R-project.org.
- Saraiva, C., Oliveira, I., Silva, J. A., Martins, C., Ventanas, J., & García, C. (2015). Implementation of multivariate techniques for the selection of volatile compounds as indicators of sensory quality of raw beef. *Journal of Food Science and Technology*, 52(6), 3887–3898. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1447-y>
- Schindler, S., Krings, U., Berger, R. G., & Orlie, V. (2010). Aroma development in high pressure treated beef and chicken meat compared to raw and heat treated. *Meat Science*, 86(2), 317–323. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.04.036>
- Sha, K., Lang, Y. M., Sun, B. Z., Su, H. W., Li, H. P., Zhang, L., Lei, Y. H., Li, H. B., & Zhang, Y. (2017). Changes in Lipid Oxidation, Fatty Acid Profile and Volatile Compounds of Traditional Kazakh Dry-Cured Beef during Processing and Storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(4), 1–9. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13059>
- Silva, L. F., Barbosa, A. M., Júnior, J. M. da S., Oliveira, V. da S., Gouvêia, A. A., Silva, T. M., Lima, A. G. V. de O., Nascimento, T. V. C., Bezerra, L. R., & Oliveira, R. L. (2021). Growth, physicochemical properties, fatty acid composition and sensorial attributes from longissimus lumborum of young bulls fed diets with containing licuri cake. *Livestock Science*, October, 104775. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104775>
- Sirtori, F., Dimauro, C., Bozzi, R., Aquilani, C., Franci, O., Calamai, L., Pezzati, A., & Pugliese, C. (2020). Evolution of volatile compounds and physical, chemical and sensory characteristics of Toscano PDO ham from fresh to dry-cured product. *European Food Research and Technology*, 246(3), 409–424. <https://doi.org/10.1007/s00217-019-03410-0>
- Söbeli, C., Uyarcan, M., & Kayaardı, S. (2021). Pulsed UV-C radiation of beef loin steaks: Effects on microbial inactivation, quality attributes and volatile compounds. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 67(June 2020). <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102558>
- Stetzer, A. J., Cadwallader, K., Singh, T. K., McKeith, F. K., & Brewer, M. S. (2008). Effect of enhancement and ageing on flavor and volatile compounds in various beef muscles. *Meat Science*, 79(1), 13–19. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.07.025>
- Tait, E., Perry, J. D., Stanforth, S. P., & Dean, J. R. (2014). Identification of volatile organic compounds produced by bacteria using HS-SPME-GC-MS. *Journal of Chromatographic Science*, 52(4), 363–373. <https://doi.org/10.1093/chromsci/bmt042>
- Utama, D. T., Kim, Y. J., Jeong, H. S., Kim, J., Barido, F. H., & Lee, S. K. (2020). Comparison of meat quality, fatty acid composition and aroma volatiles of dry-aged beef from Hanwoo cows slaughtered at 60 or 80 months old. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 33(1), 157–165. <https://doi.org/10.5713/ajas.19.0205>
- Van Ba, H., Amna, T., & Hwang, I. (2013). Significant influence of particular unsaturated fatty acids and pH on the volatile compounds in meat-like model systems. *Meat Science*, 94(4), 480–488. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.04.029>

- Wang, X., Zhu, L., Han, Y., Xu, L., Jin, J., Cai, Y., & Wang, H. (2018). Analysis of volatile compounds between raw and cooked beef by HS-SPME–GC–MS. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(2), 1–8. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13503>
- Wills, K. M., Mitacek, R. M., Mafi, G. G., Vanoverbeke, D. L., Jaroni, D., Jadeja, R., & Ramanathan, R. (2017). Improving the lean muscle color of dark-cutting beef by aging, antioxidant-enhancement, and modified atmospheric packaging. *Journal of Animal Science*, 95(12), 5378–5387. <https://doi.org/10.2527/jas2017.1967>
- Wood, J. D., Enser, M., Fisher, A. V., Nute, G. R., Sheard, P. R., Richardson, R. I., Hughes, S. I., & Whittington, F. M. (2008). Fat deposition, fatty acid composition and meat quality: A review. *Meat Science*, 78(4), 343–358. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.07.019>
- Wu, S., Luo, X., Yang, X., Hopkins, D. L., Mao, Y., & Zhang, Y. (2020). Understanding the development of color and color stability of dark cutting beef based on mitochondrial proteomics. *Meat Science*, 163(November 2019), 108046. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108046>
- Yancey, E. J., Dikeman, M. E., Hachmeister, K. A., Chambers IV, E., & Milliken, G. A. (2005). Flavor characterization of top-blade, top-sirloin, and tenderloin steaks as affected by pH, maturity, and marbling. *Journal of Animal Science*, 83(11), 2618–2623. <https://doi.org/10.2527/2005.83112618x>
- Yang, J., Dashdorj, D., & Hwang, I. (2018). Effect of the calpain system on volatile flavor compounds in the beef longissimus lumborum muscle. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 38(3), 515–529. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2018.38.3.515>

CAPÍTULO III

(Implicações)

IMPLICAÇÕES

O aroma da carne bovina *in natura* são fatores capazes de determinar a escolha do produto no momento da compra pelos consumidores no mercado. O consumidor ao abrir uma embalagem à vácuo, os aromas formados devem permanecer após esta abertura e serem aceitáveis pelo consumidor.

Na literatura, em sua grande maioria, se encontram trabalhos publicados com produtos cárneos e carne bovina cozida. Contudo, há uma carência de informações do perfil de ácidos graxos e compostos orgânicos voláteis (COVs) resultantes principalmente de corte de carne *dark cutting* armazenadas em embalagens à vácuo de animais da raça Nelore.

Esta pesquisa implicou-se na oportunidade de caracterizar um produto que seja representativo das condições de produção brasileira, considerando a raça Nelore em sistema de produção à pasto. As informações geradas permitiram identificar perfil de ácidos graxos e vários grupos químicos de voláteis (aldeídos, álcoois, cetonas, compostos sulfurados, hidrocarbonetos, éster e éter) como principais indicadores característicos relacionados principalmente ao aroma da carne bovina *in natura* da raça Nelore.

Destaca-se também que os COVs podem estar correlacionados com o perfil de ácidos graxos. Desta forma, com base nos resultados, implica-se dizer que teores de ácidos graxos poliinsaturados pode contribuir para produção de álcoois e hidrocarbonetos e cetonas, podendo ser considerados indicadores da atividade de oxidação lipídica, sendo esta principal via para formação dos compostos relatados nesta pesquisa.

Novos estudos relacionados a outros fatores, bem como estações do ano e sistema de produção animal, devem ser realizados para caracterizar principalmente o perfil aromático na carne bovina (*Bos taurus indicus*) *in natura* e relacionar com a carne bovina cozida para melhor entendimento da formação e alteração destes compostos.