



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CAMPUS PROFESSORA CINOBELINA ELVAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA TROPICAL

SUED FELIPE LACERDA BARJUD

**MODELAGEM E EFEITOS AMBIENTAIS SOBRE A CURVA DE LACTAÇÃO DE
VACAS MISTIÇAS**

TERESINA – PI
2025

SUED FELIPE LACERDA BARJUD

**MODELAGEM E EFEITOS AMBIENTAIS SOBRE A CURVA DE LACTAÇÃO DE
VACAS MISTIÇAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Zootecnia Tropical - PPGZT da Universidade Federal
do Piauí - UFPI como requisito para obtenção do
título de Doutor em Zootecnia Tropical.

Área de concentração: Produção Animal nos Trópicos

Linha de Pesquisa: Genética, Melhoramento Genético
e Reprodução Animal nos Trópicos

Orientador: Prof. Dr. Severino Cavalcante de Sousa
Júnior

TERESINA – PI

2025

SUED FELIPE LACERDA BARJUD

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Setorial Campus Professora Cinobelina Elvas
Setor de Processamento Técnico

B253m Barjud, Sued Felipe Lacerda.
Modelagem e efeitos ambientais sobre a curva de lactação de vacas
mestiças / Sued Felipe Lacerda Barjud. -- 2025.
73 f.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Piauí. Programa de
Pós-Graduação em Zootecnia Tropical, Bom Jesus, Piauí, 2025.
"Orientador: Prof. Dr. Severino Cavalcante de Sousa Júnior".

1. Zootecnia. 2. Cruzamentos bovinos. 3. Modelos não lineares. I.
Sousa Júnior, Severino Calvacante de. II. Título.

CDD 636

Bibliotecária: Nayra Fontinele Feijão – CRB3/1249

SUED FELIPE LACERDA BARJUD

**MODELAGEM E EFEITOS AMBIENTAIS SOBRE A CURVA DE LACTAÇÃO DE
VACAS MISTIÇAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Zootecnia Tropical - PPGZT da Universidade Federal
do Piauí - UFPI como requisito para obtenção do
título de Doutor em Zootecnia Tropical.

Área de concentração: Produção Animal nos Trópicos

Linha de Pesquisa: Genética, Melhoramento Genético
e Reprodução Animal nos Trópicos

Orientador: Prof. Dr. Severino Cavalcante de Sousa
Júnior

Aprovada em 06 de outubro de 2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **SEVERINO CAVALCANTE DE SOUSA JÚNIOR**
Data: 10/04/2026 14:08:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Severino Cavalcante de Sousa Júnior
(Presidente) / UFPI

Documento assinado digitalmente
 **KARINA RODRIGUES DOS SANTOS**
Data: 10/04/2026 14:35:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^ª. Dr^ª. Karina Rodrigues dos Santos
(Externo ao Programa) / UFPI

Documento assinado digitalmente
 **SINEVALDO GONCALVES DE MOURA**
Data: 10/04/2026 14:57:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Sinevaldo Gonçalves de Moura
(Externo ao Programa) / UFPI

Documento assinado digitalmente
 **JOASHLENNY ALVES DE OLIVEIRA**
Data: 10/04/2026 16:48:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^ª. Dr^ª. Joashlenny Alves de Oliveira
(Externo à Instituição) / Livestock Solutions/INEAGRO/UFPI

Documento assinado digitalmente
 **AMAURI FELIPE EVANGELISTA**
Data: 10/04/2026 15:15:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Amauri Felipe Evangelista
(Externo à Instituição) / UEG

Dedico à minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por toda a misericórdia, fortalecimento e pelo milagre da vida.

Ao Programa de Pós-Graduação em Zootecnia Tropical (PPGZT/UFPI), pela oportunidade de realizar o curso, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor e orientador Dr. Severino Cavalcante de Sousa Júnior, pela valiosa colaboração e pelos ensinamentos durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Dra. Joashlenny Alves de Oliveira, pela persistência e significativa contribuição para a realização desta pesquisa.

Ao professor Dr. Amauri Felipe Evangelista, pela colaboração e pelos ensinamentos que enriqueceram este trabalho.

Aos professores Karina Rodrigues dos Santos e Sinevaldo Gonçalves de Moura, pela participação e contribuições durante a banca de avaliação.

Ao amigo André Campelo de Araújo, pela paciência e constante disponibilidade em me ajudar.

À minha mãe, Maria Gorete Lacerda da Silva, por sua força, proteção e apoio incondicional.

Aos meus filhos, Felipe Coelho Barjud e Yoranes Medeiros Barjud, pela força e inspiração ao longo desta trajetória.

À minha esposa, Elizete Pereira Lopes, por todo apoio, compreensão e pelas abdições feitas por mim durante essa jornada.

A todos os docentes do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia Tropical, pelos ensinamentos compartilhados e contribuições ao meu processo de formação acadêmica.

*"No tempo certo, eu, o SENHOR, farei acontecer."
Isaías 60.22*

RESUMO

BARJUD, Sued Felipe Lacerda. **Modelagem e efeitos ambientais sobre a curva de lactação de vacas mestiças**. 2025. Tese (Doutorado em Zootecnia Tropical) – Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2025.

A bovinocultura leiteira é uma atividade estratégica para o agronegócio brasileiro, desempenhando papel relevante na geração de renda, segurança alimentar e desenvolvimento socioeconômico. No país, predominam vacas mestiças, resultado de cruzamentos entre raças taurinas especializadas e zebuínas adaptadas, capazes de aliar rusticidade, tolerância ao estresse térmico e bom potencial produtivo em condições tropicais. A compreensão da curva de lactação, que descreve o padrão de produção de leite ao longo do ciclo produtivo, é fundamental para avaliar a eficiência dos rebanhos, permitindo ajustes no manejo nutricional e reprodutivo, além de subsidiar estratégias de melhoramento genético. Nesse contexto, a modelagem matemática tem se consolidado como ferramenta indispensável, oferecendo parâmetros biologicamente interpretáveis, como produção inicial, pico de lactação, persistência e produção acumulada. O presente estudo buscou compreender, de forma integrada, a dinâmica produtiva de vacas cruzadas em sistemas tropicais, considerando aspectos genéticos, ambientais e de ordem de parto. Foram comparados diferentes modelos não lineares para descrever curvas de lactação em grupos genéticos variados, o que evidenciou diferenças quanto à capacidade de ajuste e à representatividade biológica dos parâmetros estimados. Entre os modelos avaliados, o proposto por Wilmlink destacou-se pela maior robustez e aplicabilidade, especialmente em rebanhos mestiços, seguido por Wood, que também apresentou bom desempenho em determinadas situações. Além da escolha do modelo, verificou-se que a produção de leite e a forma da curva sofrem forte influência da composição genética dos animais, da paridade e das variações sazonais, confirmando a complexidade das interações entre fatores biológicos e ambientais. De maneira geral, vacas multíparas apresentaram maior produção, curvas mais estáveis e persistentes em relação às primíparas, enquanto os cruzamentos com maior proporção de sangue Holandês demonstraram desempenho superior, com maior resiliência às variações ambientais. Ainda assim, a ordem de parto e a estação do ano mostraram-se determinantes no comportamento produtivo, reforçando a necessidade de estratégias de manejo adaptadas às condições locais. Esses resultados reforçam que a integração entre genética, ambiente e manejo é essencial para a sustentabilidade e eficiência da pecuária leiteira nos trópicos, e que a utilização de modelos matemáticos adequados representa uma ferramenta valiosa para orientar decisões técnicas, otimizar recursos e potencializar o desempenho dos rebanhos.

Palavras-chave: persistência da produção, cruzamentos bovinos, modelos não lineares

ABSTRACT

BARJUD, Sued Felipe Lacerda. **Modeling and environmental effects on the lactation curve of crossbred cows.** 2025. Thesis (Doctorate in Tropical Animal Science) – Federal University of Piauí, Teresina, 2025.

Dairy farming is a strategic activity for Brazilian agribusiness, playing a relevant role in income generation, food security, and socioeconomic development. In the country, crossbred cows predominate, resulting from crosses between specialized taurine breeds and adapted zebu breeds, capable of combining hardiness, tolerance to heat stress, and good productive potential under tropical conditions. Understanding the lactation curve, which describes the milk production pattern throughout the productive cycle, is essential for assessing herd efficiency, enabling adjustments in nutritional and reproductive management, as well as supporting genetic improvement strategies. In this context, mathematical modeling has become an indispensable tool, providing biologically interpretable parameters such as initial yield, peak production, persistence, and accumulated production. The present study sought to comprehensively understand the productive dynamics of crossbred cows in tropical systems, considering genetic, environmental, and parity aspects. Different nonlinear models were compared to describe lactation curves in diverse genetic groups, which highlighted differences in goodness of fit and biological representativeness of the estimated parameters. Among the evaluated models, the Wilmink model stood out for its robustness and applicability, especially in crossbred herds, followed by Wood, which also showed good performance in certain situations. Beyond model choice, it was found that milk yield and curve shape are strongly influenced by the animals' genetic composition, parity, and seasonal variations, confirming the complexity of interactions between biological and environmental factors. Overall, multiparous cows showed higher yields, more stable and persistent curves compared to primiparous cows, while crossbreds with a higher proportion of Holstein blood demonstrated superior performance, with greater resilience to environmental variations. Nevertheless, parity and season of the year proved decisive in productive behavior, reinforcing the need for management strategies adapted to local conditions. These findings emphasize that the integration of genetics, environment, and management is essential for the sustainability and efficiency of tropical dairy farming, and that the use of appropriate mathematical models represents a valuable tool to guide technical decisions, optimize resources, and enhance herd performance.

Keywords: production persistence, cattle crossbreeding, nonlinear models

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

- Figura 1.** Touro da raça Holandesa de pelagem preta e branca (a); vaca de pelagem vermelha e branca da raça Holandesa (b) 22
- Figura 2.** Esquema da curva de lactação em vacas leiteiras 25

CAPÍTULO II

- Figura 1.** Curvas de lactação de vacas leiteiras de diferentes grupos genéticos e ordens de lactação utilizando dados observados e obtidas a partir dos modelos de Wilmink (1987) e Wood (1967) 43

CAPÍTULO III

- Figura 1.** Curvas de lactação de vacas primíparas de diferentes grupos genéticos..... 60
- Figura 2.** Curvas de lactação de vacas múltíparas de diferentes grupos genéticos 60

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II

Tabela 1. Descrição do banco de dados por lactação.....	40
Tabela 2. Modelos para descrever a curva de lactação.....	40
Tabela 3. Critérios de comparação de modelos utilizados para ajustar as curvas de lactação em vacas primíparas de diferentes grupos genéticos	41
Tabela 4. Critérios de comparação de modelos utilizados para ajustar as curvas de lactação em vacas múltiparas de diferentes grupos genéticos	42

CAPÍTULO III

Tabela 1. Características das curvas de lactação segundo modelo Wood.....	56
Tabela 2. Parâmetros da curva de lactação estimados pelo modelo de Wood em vacas de diferentes composições genéticas e ordens de lactação	58
Tabela 3. Efeito de estação sobre os parâmetros da curva de lactação estimados pelo modelo de Wood em vacas de diferentes composições genéticas e ordens de lactação	61
Tabela 4. Correlações de Pearson entre os parâmetros da curva de lactação estimados pelo modelo Wood para vacas de diferentes composições genéticas e ordens de lactação	63

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
CAPÍTULO I: Bases conceituais da bovinocultura leiteira: raças, curvas de lactação e modelos matemáticos aplicados à produção de leite.....	17
1. Introdução.....	19
2. Panorama da bovinocultura leiteira.....	19
2.1 Raças mais exploradas para a produção de leite.....	21
2.1.1 Holandesa.....	21
2.1.2 Gir.....	23
2.1.3 Girolanda.....	24
2.2 Curva de lactação.....	25
2.3 Modelos matemáticos	27
3. Referências Bibliográficas.....	30
CAPÍTULO II: Modelagem de curvas de lactação em vacas de diferentes composições genéticas.....	37
1. Introdução.....	39
2. Materiais e Métodos.....	40
3. Resultados.....	41
4. Discussão.....	44
5. Conclusão	46
6. Referências	47
CAPÍTULO III: Influência de fatores ambientais na produção de leite e parâmetros da curva de lactação de vacas de diferentes composições genéticas.....	49
1. Introdução.....	53
2. Materiais e Métodos.....	55
3. Resultados.....	57
4. Discussão.....	64
5. Conclusão	71
6. Referências Bibliográficas.....	71
CONSIDERAÇÕES FINAIS	75

INTRODUÇÃO GERAL

A produção de leite é uma das atividades agropecuárias de maior relevância econômica e social no Brasil e em diversos países de clima tropical. A eficiência produtiva dos rebanhos leiteiros depende de fatores genéticos, ambientais e de manejo, cuja interação complexa influencia o desempenho das vacas ao longo do ciclo de lactação (Souza et al., 2020). Nesse contexto, a análise da curva de lactação, que é uma representação matemática da variação da produção de leite ao longo do tempo, tem sido amplamente utilizada como ferramenta para compreender e prever o comportamento produtivo dos animais (WOOD, 1967; WILMINK, 1987).

Nesse contexto, modelos não lineares vêm sendo propostos e utilizados para descrever com maior precisão a curva de lactação, permitindo estimar parâmetros biologicamente interpretáveis, como produção inicial, tempo ao pico, pico de produção, persistência e produção acumulada (ROOK et al., 1993; COBUCI et al., 2005). Entre os modelos mais usados para descrever curvas de lactação, estão os propostos por Wood (1967); Wilmink (1987), que se destacam pela simplicidade e boa capacidade de ajuste, especialmente em rebanhos submetidos a diferentes condições ambientais (HERNÁNDEZ-ZAMUDIO et al., 2022; HABIMANA et al., 2024). No entanto, a escolha do modelo mais adequado depende do contexto produtivo e dos objetivos específicos da análise.

Vários fatores inerentes as vacas e externos a elas podem afetar a curva leiteira, consequentemente o desempenho, ajuste e parâmetros da curva estimados por modelos não lineares (Daltro et al., 2019a). Por exemplo, Vacas cruzadas com diferentes proporções de sangue Holandês são amplamente utilizadas em sistemas de produção leiteira de clima tropical devido à sua maior rusticidade, adaptabilidade ao estresse térmico e bom potencial produtivo, porém apresentam diferenças marcantes nas curvas de lactação quando comparadas as raças puras (DALTRO et al., 2019a; 2019b; 2020; 2021). Contudo, a resposta produtiva desses animais, no entanto, pode variar consideravelmente em função da composição genética, da ordem de parto (primíparas *versus* multíparas) e de fatores ambientais, especialmente os associados às variações sazonais (SILVESTRE et al., 2006; BERNABUCCI et al., 2010). Assim, as condições climáticas adversas, como as observadas em períodos secos, afetam diretamente a produção de leite e os parâmetros da curva de lactação, alterando o tempo ao pico, a persistência e a quantidade total produzida (SOUZA et al., 2020; HABIMANA et al., 2024).

Apesar da importância prática, estudos que avaliem simultaneamente os efeitos da composição genética, da ordem de parto e das condições climáticas sobre os parâmetros da curva de lactação em rebanhos cruzados ainda são escassos. Uma melhor compreensão desses efeitos é essencial para embasar estratégias de manejo alimentar, reprodutivo e genético que otimizem a produção ao longo da lactação em diferentes grupos de animais e cenários ambientais.

Neste contexto, busca-se modelar as curvas de lactação de vacas cruzadas com diferentes composições genéticas e ordens de parto, e ainda avaliar os efeitos ambientais sobre os parâmetros produtivos estimados, utilizando modelos não lineares adequados à realidade de sistemas leiteiros tropicais.

A tese foi estruturada conforme as normas para elaboração de dissertações do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia Tropical da UFPI de acordo com a seguinte organização: INTRODUÇÃO GERAL; CAPÍTULO I: Bases conceituais da bovinocultura leiteira: raças, curvas de lactação e modelos matemáticos aplicados à produção de leite; elaborado de acordo com as normas da *Revista Científica de Produção Animal* e CAPÍTULO II: Artigo científico intitulado: Modelagem de curvas de lactação em vacas de diferentes composições genéticas; elaborado de acordo com as normas da *Revista Arquivos Brasileiros de Medicina Veterinária e Zootecnia*; CAPÍTULO III: Influência de fatores ambientais na produção de leite e parâmetros da curva de lactação de vacas de diferentes composições genéticas; elaborado de acordo com as normas da *Revista Tropical Animal Health and Production*; e CONSIDERAÇÕES FINAIS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERNABUCCI, U.; BAUMGARD, L.H.; RHOADS, R.P.; RHOADS, M.L.; SPERONI, M.; TRANA, A.D.; NARDONE, A. The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, v.93, n.1, p.577-586, 2010. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-0947>.
- COBUCI, J.A.; EUCLYDES, R.F.; COSTA, C.N.; LOPES, P.S.; TORRES, R.A. Avaliação da curva de lactação de vacas da raça Holandesa utilizando modelos não lineares. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.34, n.3, p.1025-1034, 2005. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982005000300028>.

DALTRO, D.S.; PADILHA, A.H.; GAMA, L.T. et al. Heterosis in the components of lactation curves of Girolando cows. **Italian Journal of Animal Science**, v.18, n.1, p.267-278, 2019a. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2018.1507627>.

DALTRO, D.S.; PADILHA, A.H.; GAMA, L.T.; SILVA, M.V.G.B.; COBUCCI, J.A. Breed, heterosis, and recombination effects for lactation curves in Brazilian cattle **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.50, e20200085, 2021. <https://doi.org/10.37496/rbz5020200085>

DALTRO, D.S.; SILVA, M.V.G.B.; GAMA, L.T. et al. Estimates of genetic and crossbreeding parameters for 305-days milk yield of Girolando cows. **Italian Journal of Animal Science**, v.19, p.86-94, 2020. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2019.1702110>.

HABIMANA V, NGULUMA AS, NZIKU ZC, et al. Heat stress effects on physiological and milk yield traits of lactating Holstein Friesian crossbreds reared in Tanga region, Tanzania. **Animals**, v.14, n.13, p.1914, 2024. <https://doi.org/10.3390/ani14131914>

HERNÁNDEZ-ZAMUDIO, J.A.; VILLAGÓMEZ-CORTÉS, J.A.; VEGA-MURILLO, V.E. et al. Comparison of models for lactation curves of Holstein, Brown Swiss, and F1 crossbred cows under subtropical conditions. **Tropical Animal Health and Production**, v.54, n.192, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11250-022-03144-4>

ROOK, A. J.; FRANCE, J.; BROADBENT, J. Some interpretations of lactation curve models. **Livestock Production Science**, Amsterdam, v.35, n.3-4, p.311-325, 1993. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(93\)90019-V](https://doi.org/10.1016/0301-6226(93)90019-V)

SILVESTRE, A.M.; MARTINS, A.M.; CARVALHEIRA, J.; COSTA, A.; SANTOS, V.A. Lactation curves for dairy cattle under production conditions. **Archiv Tierzucht**, Dummerstorf, v. 49, n. 2, p. 145-156, 2006.

SOUZA, L. L.; FERREIRA, W. J.; LIMA, M. O.; GUIMARÃES, J. L.; MARTINS, M. F. Seasonal effects on milk production traits in crossbred dairy cows in tropical climate. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v.42, p.e46848, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v42i1.46848>.

WILMINK, J. B. M. Adjustment of test-day milk, fat and protein yield for age, season and stage of lactation. **Livestock Production Science**, v. 16, p. 335-348, 1987.

WOOD, P.D.P. Algebraic model of the lactation curve in cattle. **Nature**, n.216, p.164-165, 1967.

CAPÍTULO I

Bases conceituais da bovinocultura leiteira: raças, curvas de lactação e modelos matemáticos aplicados à produção de leite

Conforme as normas da:
Revista Científica de Produção Animal

Bases conceituais da bovinocultura leiteira: raças, curvas de lactação e modelos matemáticos aplicados à produção de leite: Uma revisão

BARJUD, S.F.L.^{a*}, SOUSA JÚNIOR, S.C.^b

^a *Doutorando em Zootecnia Tropical, Pós-Graduação em Zootecnia Tropical, Universidade Federal do Piauí - UFPI, Campus professora Cinobelina Elvas, Bom Jesus, Piauí, Brasil.*

^b *Professor do programa de pós-graduação, em Zootecnia Tropical, Universidade Federal do Piauí - UFPI, Campus Ministro Petrônio Portela, Teresina, Piauí, Brasil.*

*Autor correspondente: S.F.L. Barjud; E-mail: suedfelipelacerdabarjud@mail.com

Resumo: Este capítulo de revisão apresenta um panorama da bovinocultura leiteira no Brasil, destacando sua evolução histórica, relevância socioeconômica e importância no contexto agropecuário nacional. São abordadas as principais raças utilizadas na produção leiteira – Holandesa, Gir e Girolando – com ênfase em suas características zootécnicas, adaptabilidade e papel nos sistemas de cruzamentos. Além disso, discute-se a curva de lactação como parâmetro essencial para compreender o desempenho produtivo das vacas leiteiras, relacionando fatores genéticos, fisiológicos e ambientais que influenciam a persistência e o pico de produção. Por fim, apresentam-se os principais modelos matemáticos empregados na descrição das curvas de lactação, evidenciando suas contribuições para o manejo, a seleção genética e a eficiência produtiva dos rebanho.

Palavras-chave: Persistência da lactação; Eficiência produtiva; Manejo nutricional

Conceptual bases of dairy cattle farming: breeds, lactation curves and mathematical models applied to milk production

Abstract: This chapter provides an overview of dairy cattle farming in Brazil, emphasizing its historical development, socioeconomic relevance, and role in the national agricultural sector. It explores the main dairy breeds – Holstein, Gir, and Girolando – highlighting their zootechnical characteristics, adaptability, and contribution to crossbreeding systems. The lactation curve is discussed as a key parameter for evaluating milk production, considering genetic, physiological, and environmental factors that influence persistence and peak yield. Finally, the chapter presents the main mathematical models used to describe lactation curves, underlining their importance for herd management, genetic selection, and production efficiency.

Keywords: Lactation persistence; Productive efficiency; Nutritional management

1. Introdução

A bovinocultura leiteira desempenha papel estratégico no agronegócio brasileiro, sendo responsável por significativa geração de renda, emprego e segurança alimentar. O Brasil ocupa a terceira posição no ranking mundial de produção de leite, com mais de 34 bilhões de litros anuais e atividade presente em quase todos os municípios, predominando pequenas e médias propriedades rurais (BRASIL, 2025). Apesar do elevado potencial produtivo, a eficiência média dos sistemas de produção nacionais ainda se encontra abaixo da observada em países de clima temperado, em função de limitações relacionadas ao manejo, à genética dos rebanhos e às condições ambientais (LOPES et al., 2016).

A introdução de raças zebuínas e, posteriormente, de raças taurinas especializadas como a Holandesa, promoveu avanços significativos na pecuária leiteira, sobretudo por meio de programas de cruzamentos e melhoramento genético. Nesse contexto, a raça Girolando consolidou-se como base da produção nacional, por reunir rusticidade e adaptação ao clima tropical herdadas do Gir, associadas à elevada produtividade da Holandesa (CANAZA-CAYO et al., 2014; ABCG, 2025). No entanto, é imprescindível o estudo da curva de lactação de vacas cruzadas através de modelos matemáticos, pois é sabido que esta pode variar quando comparada as raças originais (Daltro et al., 2019b).

A compreensão da curva de lactação das vacas leiteiras é fundamental para avaliar a persistência, o pico produtivo e a eficiência biológica e econômica dos rebanhos, possibilitando ajustes no manejo nutricional, reprodutivo e sanitário (QUINTERO et al., 2007; GENGLER, 1996). Além disso, modelos matemáticos de lactação, como os propostos por Wood (1967), Brody (1923), Wilmink (1987) e Dijkstra (1997), vêm sendo amplamente aplicados na zootecnia para descrever o padrão produtivo e apoiar decisões de seleção genética e planejamento de sistemas leiteiros (CUNHA et al., 2010; DALTRO et al., 2021).

Diante desse cenário, este capítulo reúne os principais fundamentos teóricos relacionados à bovinocultura leiteira, abordando a importância do setor no Brasil, as características das principais raças utilizadas, os fatores que influenciam a curva de lactação e os modelos matemáticos aplicados à produção de leite.

2. Panorama da bovinocultura leiteira no Brasil

A produção de bovinos no Brasil teve início com os portugueses, por volta do século XVI. O manejo extensivo foi o sistema de criação adotado e, ainda hoje, continua sendo tradicionalmente praticado pelos produtores. Esse sistema de criação é caracterizado pela utilização de grandes extensões de áreas de pasto e pouca ou nenhuma tecnologia. Condições

favoráveis na região Nordeste, como o cultivo da cana-de-açúcar e o desenvolvimento de tecnologias no campo, impulsionaram o crescimento da bovinocultura de corte ao longo dos anos (TEIXEIRA; HESPANHOL, 2014).

Atualmente, a bovinocultura de corte e de leite possui grande relevância para os mercados interno e externo. Desde a colonização, a expansão das áreas urbanas contribuiu para o aumento do consumo desses produtos. A introdução do gado zebu no Brasil Central foi uma das grandes contribuições para a revolução da pecuária bovina no país, aprimorando a genética do rebanho. Após a introdução do gado zebuino, técnicas como fecundação in vitro, produção de embriões e clonagem, entre outras, foram desenvolvidas e utilizadas para a disseminação dessas raças (CARVALHO et al., 2023). Pesquisas foram realizadas para aperfeiçoar características genéticas por meio de cruzamentos entre diversas raças, resultando em ganhos em rusticidade, resistência a doenças e parasitas, desempenho, eficiência e qualidade.

A bovinocultura de leite é um dos setores de grande importância, tanto econômica quanto social, sendo um dos pilares do setor agropecuário, pois movimenta a economia em diversas regiões do país e apresenta uma pluralidade inerente aos diferentes climas, biomas e costumes. O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de leite, com mais de 34 bilhões de litros por ano, sendo a produção registrada em 98% dos municípios brasileiros, com predominância de pequenas e médias propriedades (BRASIL, 2025). No país, não há um padrão único no sistema de produção, mas ainda assim, o setor possui grande potencial de crescimento.

As regiões Sul e Sudeste são as que apresentam os maiores índices de produção, mas a atividade leiteira ocorre em todo o território nacional brasileiro. A captação formal de leite alcançou 6,48 bilhões de litros no primeiro trimestre de 2025, representando um crescimento de 4,3% na captação diária de leite em relação ao ano de 2024 (IBGE, 2025). A criação dos rebanhos é predominantemente realizada a pasto, pois esse sistema é o mais econômico, impactando diretamente os custos de produção, e as pastagens são a principal fonte de nutrientes para os animais (SILVA et al., 2008). Contudo, o Brasil detém o maior rebanho bovino comercial do mundo, composto principalmente por raças zebuínas (*Bos indicus*), que, por sua vez, apresentam um potencial genético de produção inferior ao dos animais de origem taurina (*Bos taurus*).

O leite de vaca é o tipo mais produzido globalmente, com uma produção anual de aproximadamente 860 milhões de toneladas. O Brasil ocupa a quinta colocação no ranking dos países que mais produzem leite no mundo (FAO, 2025). O aumento do rebanho bovino ao longo dos anos, em escala global, contribuiu para a elevação da produção mundial de leite, uma vez que essa atividade demanda constante expansão (ÖRS; OĞUZ, 2019). No Brasil, a ampla

diversidade geográfica favorece a adaptação dos sistemas de produção às diferentes realidades climáticas e econômicas do país.

O desempenho produtivo e reprodutivo de vacas leiteiras no Brasil ainda é considerado baixo, principalmente devido às condições climáticas (tropical e subtropical), quando comparado a países de clima temperado, como Estados Unidos, Holanda e Canadá. Apesar dos avanços tecnológicos e dos ganhos genéticos ao longo dos anos, a produtividade leiteira ainda é considerada insatisfatória (LOPES et al., 2016), em razão da baixa eficiência nos processos de produção, das deficiências no manejo dos animais e da qualidade genética limitada dos rebanhos. Diante disso, para melhorar os índices produtivos, os produtores têm recorrido à melhoria das práticas de manejo, à utilização de animais geneticamente superiores e à adoção de cruzamentos estratégicos.

2.1 Raças mais exploradas para a produção de leite

2.1.1 Holandesa

A raça Holandesa (Holstein-Friesian) é de origem europeia, sendo reconhecida mundialmente pela alta produção de leite. Devido a essa característica e longos períodos de lactação, diversos países importaram animais dessa raça na forma de animais puros para a produção ou para cruzamentos com raças mais adaptadas ao clima local (FREITAS et al., 2004). Estima-se que tenha sido domesticada há aproximadamente 2.000 anos nas terras planas e pantanosas da Holanda Setentrional e da Frísia (Países Baixos), bem como na Frísia Oriental (Alemanha). No entanto, há apenas suspeitas sobre sua origem exata, não havendo plena certeza quanto a esses relatos (ABCBRH, 2025).

Esta raça é conhecida por sua capacidade de produzir grandes volumes de leite. Os animais apresentam características como docilidade, grande porte, pelagem preta e branca ou vermelha e branca, alta produtividade, boa longevidade e fertilidade quando bem manejados. Trata-se de um *Bos taurus taurus* altamente especializado na produção de leite em volume (AUGUSTO, 2023), amplamente utilizado em programas de melhoramento genético. É uma das principais raças empregadas em cruzamentos absorventes ou na formação de raças compostas, com o objetivo de aumentar a produtividade (ARAUJO; FIUZA, 2023).

As características zootécnicas da raça Holandesa incluem diferentes variedades de pelagem. Na variedade Frísia, a pelagem é malhada de branco e preto, podendo haver predominância de uma das cores em alguns animais. Já na variedade Mosa, Reno e Yssel (vermelha e branca), observa-se predominância da coloração vermelha em regiões como pescoço e cauda, enquanto o branco se destaca no ventre, úbere e vassoura da cauda. A pele é

espessa, podendo apresentar tonalidades preta e branca ou vermelha e branca. Os animais são de grande porte, dóceis, possuem boa longevidade e fertilidade, e apresentam pelagem característica nas cores preta e branca ou vermelha e branca (Figura 1).



Figura 1. Touro da raça Holandesa de pelagem preta e branca (a); vaca de pelagem vermelha e branca da raça Holandesa (b).

O padrão racial da Associação Brasileira de Criadores de Bovinos da Raça Holandesa (ABCBRH) estabelece que, na idade adulta (60 meses), o peso médio é de 680 kg para as fêmeas e 950 kg para os machos. A idade média para a primeira cobertura varia entre 16 e 18 meses; para o primeiro parto, entre 25 e 27 meses. O intervalo entre partos é de 15 a 17 meses, e a duração média da gestação é de 280 dias.

O gado Holandês possui maior exigência por clima frio devido à sua origem, tornando mais difícil a adaptação a climas mais quentes, como o do Brasil. A raça é amplamente utilizada como matriz em cruzamentos, para transmitir genes de alta produção para as novas linhagens. Apesar das limitações climáticas, os animais da raça Holandesa representam a maior parcela do material genético importado para o Brasil, contribuindo para a melhora dos índices de produção de leite no país.

A raça Holandesa, embora apresente características favoráveis para a produção de leite, exige condições específicas quanto ao sistema de criação e ao ambiente. Fatores como sensibilidade ao calor e a parasitas fazem com que esses animais expressem melhor seu potencial produtivo em sistemas de confinamento, que oferecem melhor controle do conforto térmico e instalações adequadas. A produção de leite diminui drasticamente nos dias mais quentes, sendo ideal uma temperatura entre 5°C e 26°C (ABCBRH, 2025). Assim, instalações com ventilação e aspersão tornam-se necessárias para garantir o máximo desempenho produtivo e reprodutivo das vacas.

Além de ser uma das principais raças responsáveis pela produção de leite no Brasil, tanto como raça pura quanto em cruzamentos com raças zebuínas, como Gir leiteiro e Guzerá, a raça Holandesa desempenha papel fundamental no aumento da produtividade leiteira (FREITAS et al., 2004).

Os objetivos dos cruzamentos são gerar animais mais produtivos por meio da combinação de características e do vigor híbrido. Por isso, vacas Gir são cruzadas com touros Holandeses para obter melhores índices de produção de leite nos trópicos, resultando em mais de 70% da produção de leite proveniente de vacas mestiças, originárias do cruzamento entre raças taurinas e zebuínas. A ênfase desses cruzamentos está nas características de volume de leite, maturidade e duração da lactação.

2.1.2 Gir

A raça Gir é originária da Índia, da Península de Katiavar, e foi introduzida no Brasil em 1906. Originalmente, era utilizada apenas para a produção de leite, mas no Brasil tornou-se, inicialmente, uma raça de dupla finalidade, para carne e leite.

O gado Gir (*Bos indicus*) é uma raça utilizada principalmente para a produção de leite em climas tropicais, sendo reconhecida como a raça zebuína de maior produtividade leiteira nessas condições (LAGROTTA et al., 2010). Por ser originária da Índia, país tropical com condições edafoclimáticas semelhantes às do Brasil, essa raça encontrou no país um ambiente propício para expressar seu potencial produtivo (ABCGIL, 2025). Devido às suas características, o Gir tornou-se uma alternativa importante para incrementar a pecuária leiteira, seja como raça pura, seja como base para diversos sistemas de cruzamento.

A raça Gir representa mais de 80% dos rebanhos leiteiros, seja como raça pura ou em cruzamentos com animais da raça Holandesa. Essa predominância se deve à capacidade dos animais de serem criados em pastagens e à sua resistência a endo e ectoparasitas, além da alta tolerância a temperaturas elevadas. A produção máxima de leite pode chegar a 14 kg por dia (PEREIRA et al., 2012). Além de fornecer genética leiteira, a raça Gir é também a base para a formação de outras raças, como a Girolanda. A produção média por lactação é de 3.745,50 kg, com 4,43% de gordura e 3,34% de proteína. O peso médio ao desmame é de 149 kg para machos e 139 kg para fêmeas, enquanto o peso adulto médio é de 272 kg para machos e 236 kg para fêmeas (ABCGIL, 2025).

O gado Gir é utilizado em programas de melhoramento do gado leiteiro, nos quais a seleção para produção é o principal critério. Entretanto, é necessário avaliar as associações com outras características e como estas respondem ao processo de seleção, pois, nas raças taurinas,

sabe-se que a intensa seleção para aumento da produção de leite levou a declínios na fertilidade (LUCY, 2007).

2.1.3 Girolanda

O uso de cruzamentos entre bovinos zebuínos e raças leiteiras especializadas europeias tem sido adotado para intensificar a produtividade dos sistemas de produção de leite, combinando características de resistência, como a adaptação ao clima, por exemplo. Esses animais destacam-se progressivamente na produção de leite, especialmente devido à grande extensão territorial e às adversidades climáticas do país.

Por volta das décadas de 1940 e 1950, produtores de gado leiteiro iniciaram cruzamentos entre animais das raças Gir e Holandesa, com o objetivo de obter exemplares que combinassem a alta capacidade de produção de leite do gado Holandês com a rusticidade da raça Gir (CANAZA-CAYO et al., 2014).

No Brasil, adotaram-se os cruzamentos entre a raça Holandesa e a raça Gir, com a finalidade de aproveitar ao máximo o desempenho produtivo de ambas as raças. Com a intensificação desses cruzamentos, surgiu a raça Girolando, que apresenta características e qualidades adequadas para a produção de leite em regiões tropicais. A capacidade de adaptação e a rusticidade foram herdadas do Gir, enquanto a elevada produção de leite veio da raça Holandesa (ABCG, 2025).

De acordo com a Associação Brasileira dos Criadores da Raça, esta é responsável por 80% do leite produzido no Brasil. O Girolando é uma raça resultante do cruzamento entre o Gir, uma raça zebuína originária da Índia, e a Holandesa, conhecida por sua alta produtividade leiteira. O Gir leiteiro é uma das raças mais utilizadas pelos produtores para a produção de vacas leiteiras cruzadas. O Gir e o Holandês possuem características fenotípicas e genotípicas específicas que os diferenciam, e essas características garantem a manutenção da qualidade genética, funcionalidade e produtividade dos animais, bem como a preservação das características desejáveis nos animais registrados, conforme definido pela Associação Brasileira dos Criadores de Girolando.

A raça Girolando é considerada essencial para o desenvolvimento do setor pecuário, pois a maior parte do leite produzido no Brasil provém de vacas dessa raça (CANAZA-CAYO, 2016). Basicamente, a combinação genética do Girolando resulta do cruzamento de 5/8 da raça Holandesa com 3/8 da raça Gir (ABCG, 2025), proporção que favorece a retenção da heterose e complementa, equilibrando as características desejáveis das duas raças.

A raça Girolando é resultado do cruzamento das raças Holandesa (H) e Gir (G), envolvendo diversos grupos genéticos, que variam de $1/4H + 3/4G$ até $7/8H + 1/8G$. O direcionamento dos acasalamentos tem como objetivo a fixação do padrão racial do grupo genético $5/8H + 3/8G$, visando produzir um gado padronizado que atenda às necessidades dos produtores de leite brasileiros (SILVA et al., 2014).

Para combinar as características importantes de diferentes raças produtoras de leite, algumas raças mestiças vêm sendo desenvolvidas. Os cruzamentos entre raças de origens distintas são uma estratégia recomendada para aumentar a tolerância às condições ambientais adversas.

2.2 Curva de lactação

A produção de leite é caracterizada pela curva de lactação, que, por sua vez, é dividida em fases: a primeira é ascendente; a segunda, relativamente constante, corresponde ao pico; e a terceira é descendente, que vai do pico de lactação até o final, podendo ser representada graficamente (NEGRI, 2017; Figura 1). Entre as vantagens do estudo das curvas de lactação, destacam-se o controle da suplementação dos animais e o planejamento nutricional dos bezerros para a produção de carne, desde a lactação até a terminação (HENRIQUES et al., 2011).



Figura 2. Esquema da curva de lactação em vacas leiteiras. Fonte: Adaptado de Negri (2017).

Os resultados da produção de leite dependem substancialmente dos manejos nutricionais e reprodutivos. Esse entendimento e as adequações necessárias são fundamentais para o conhecimento da curva de lactação, que pode ser representada graficamente pela evolução da produção de leite desde o parto até a secagem da vaca, e pode ser descrita por uma função

matemática que estima o processo fisiológico do período produtivo do leite (QUINTERO et al., 2007). Nesse sentido, a produção de leite durante o período de lactação pode sofrer alterações conforme o manejo, a alimentação, os descartes e a seleção de animais com padrão desejável para a produção (FREIRE, 2020).

A representação gráfica da curva de lactação em determinado período é utilizada no desenvolvimento de modelos dinâmicos de simulação, seleção genética e predição da produção de leite a partir de registros parciais (CUNHA et al., 2010; VAL-ARREOLA et al., 2004; VANRADEN et al., 2006). Quando associada às curvas de compostos como proteínas e gorduras, essa representação estabelece uma ferramenta importante para a avaliação das respostas produtivas diante do manejo nutricional utilizado. As informações sobre curvas de lactação são essenciais na atividade leiteira, pois auxiliam no manejo nutricional, reprodutivo, nas avaliações genéticas e na identificação de enfermidades. Além disso, fornecem dados úteis para a avaliação da eficiência biológica, econômica e genética dos animais (NADERI, 2018).

A estimativa do pico produtivo, da produção total por lactação e da persistência de lactação (PAPAJCSIK; BODERO, 1988) são características de eficiência fundamentais para a determinação e implementação dos manejos. A partir dos modelos matemáticos, é possível alcançar esses parâmetros aos 305 dias.

O pico de lactação é caracterizado pela máxima produção, geralmente ocorrendo entre 30 e 90 dias após o parto, e está altamente correlacionado com a produção total aos 305 dias (MACCIOTA et al., 2005; WILMINK, 1987; WOOD, 1967), sendo dependente da raça, manejo, entre outros fatores (MACCIOTA et al., 2005). A persistência da lactação corresponde ao período em que a vaca mantém a capacidade constante de produção de leite após o pico de lactação (GENGLER, 1996) e, de acordo com Cobuci et al. (2003), pode ser mensurada por diferentes métodos, como razões entre as produções em diferentes fases da lactação, parâmetros de funções matemáticas, variações na produção de leite no dia do controle e valores genéticos estimados via regressão aleatória.

Devido à importância do relacionamento entre o tempo e a produção no pico, na persistência e na produção total de leite, é fundamental entender como essas variáveis estão associadas. Vacas com maiores produções no pico de lactação tendem a apresentar menor persistência, enquanto maiores tempos até o pico de lactação estão altamente correlacionados com maiores persistências da lactação (TEKERLI et al., 2000). A produção total de leite é função da persistência na lactação, do pico de produção e da duração da lactação, sendo a persistência o principal componente da curva de lactação (WOOD, 1967). Nesse sentido, vale destacar que características como maior produção de leite e longevidade são observadas em

vacas com maior persistência na curva de lactação, podendo ser consideradas produtoras eficientes em função do retorno econômico e do tempo de vida útil.

A curva de lactação descreve o padrão de produção de leite ao longo do ciclo lactacional e reflete as interações entre genética, fisiologia e ambiente. Em vacas Holandesas, raça especializada em alta produção, a curva caracteriza-se por um rápido aumento da produção logo após o parto, atingindo o pico entre três e oito semanas, seguido por um declínio gradual até aproximadamente o décimo mês de lactação (BONFÁ, 2012). Diversos estudos evidenciam a influência de fatores ambientais sobre esses parâmetros: Li et al. (2022) relataram que vacas Holandesas que pariram na primavera e no inverno atingiram o pico de lactação mais cedo e apresentaram maior produção total de leite, respectivamente; já Innes et al. (2024) observaram que primíparas possuem curvas mais planas e picos mais baixos do que vacas em lactações subsequentes. No Brasil, Evangelista et al. (2024) destacaram que a ordem e a estação do parto influenciam a forma da curva de lactação, com maior produção quando os partos ocorrem entre inverno e primavera.

Em contraste, vacas zebuínas (*Bos indicus*), como as raças Gir e Guzerá, apresentam curvas de lactação distintas, geralmente caracterizadas por picos mais baixos, declínio mais suave e maior persistência ao longo do ciclo (SANTOS et al., 2019). Essa configuração está relacionada a uma menor produção potencial, porém maior adaptação às condições tropicais, resistência ao estresse térmico e parasitário, além de longevidade produtiva superior em sistemas extensivos.

As vacas cruzadas Holandês × Zebu combinam características dos dois grupos genéticos. Estudos brasileiros mostram que esses cruzamentos resultam em curvas de lactação intermediárias: os picos de produção são mais baixos do que os observados em Holandesas puras, mas superiores aos das vacas zebuínas, enquanto a persistência da lactação é maior do que a das Holandesas (COBUCI et al., 2004; VERNEQUE et al., 2019). Essa combinação – maior produção que os zebuínos e melhor adaptação que os holandeses – torna esses cruzamentos estratégicos para sistemas leiteiros em regiões tropicais, garantindo melhor eficiência produtiva sob estresse térmico e menor exigência de manejo intensivo.

2.3 Modelos matemáticos

Os modelos matemáticos, de modo geral, servem para representar partes de um todo de forma simplificada. Assim, eles não proporcionam a explicação científica em si, mas interpretam hipóteses sob um ponto de vista quantitativo, permitindo deduzir informações e, conseqüentemente, indicar quais detalhes devem ser aceitos ou rejeitados (BONFÁ, 2012).

Na literatura, vários modelos, como os propostos por Wood (1967), Brody (1923), Sikka (1950), Wilmink (1987), Rook (1993) e Dijkstra (1997), baseados em diferentes abordagens, satisfazem os pré-requisitos e apresentam resultados satisfatórios na predição de curvas de lactação. As curvas de lactação são utilizadas para modelar a produção em diversas raças e são ajustadas por meio de modelos de regressão lineares e não lineares, cada um apresentando vantagens e desvantagens do ponto de vista estatístico.

Os modelos de curva de lactação tornaram-se comuns a partir do modelo não linear de Wood (1967), embora as primeiras representações matemáticas nesse contexto tenham surgido na década de 1920, com os estudos de Brody et al. (1923) e Brody et al. (1924). Modelos não lineares foram propostos para descrever as curvas de lactação de vacas leiteiras. A curva de lactação é um comportamento característico de uma equação não linear clássica, por isso vários modelos não lineares têm sido amplamente estudados para representar essas características.

Em sistemas caracterizados por maior heterogeneidade ambiental e rebanhos com diferentes graus de sangue entre raças especializadas e adaptadas, a modelagem das curvas de lactação torna-se ainda mais desafiadora (CARVALHO et al., 2020). Por isso, diversos estudos têm sido realizados para determinar o melhor modelo nessas condições, considerando vacas com diferentes composições genéticas (DALTRO et al., 2021; RIBEIRO et al., 2012).

A avaliação correta dos modelos de curvas de lactação em diferentes grupos genéticos e ordens de parto é crucial, pois garante representações precisas da produção e orienta alterações que auxiliam no manejo e no melhoramento animal. Dessa forma, serão abordados os modelos de Wood (1967), Brody (1923), Sikka (1950), Wilmink (1987), Rook (1993) e Dijkstra (1997).

O modelo de Wood (1967), baseado em uma função alométrica, é amplamente utilizado devido à sua simplicidade e interpretação direta. Esse modelo, denominado “função Gama incompleta” por alguns autores, é dado por: $Y_t = at^b \exp(-ct) + \varepsilon$, em que, Y_t é a produção de leite no dia em lactação t ; a representa a produção de leite no início da lactação (um parâmetro desconhecido), e que tem como característica abaixar ou elevar toda a curva de lactação, não alterando seu formato geral; b também é um parâmetro desconhecido que está associado à fase de elevação da produção de leite no início da lactação; c é outro parâmetro desconhecido que está ligado à fase de declínio da produção de leite após o pico. A principal vantagem do modelo de Wood (1967) é sua interpretação biológica, que permite obter informações sobre a persistência da lactação e o pico de produção (COLDEBELLA et al., 2003; MELO et al., 2011).

A primeira referência à modelagem da curva de lactação foi descrita por Brody et al. (1923). Os primeiros modelos foram caracterizados por transformações logarítmicas, funções exponenciais, polinomiais e outras funções lineares.

O modelo matemático proposto por Sikka (1950) para descrever a curva de lactação é o modelo exponencial: $Yt = a \cdot \exp(bs - cs^2)$ em que: Yt = produção de leite; a = fator de escala que expressa a fase inicial da lactação; $\exp$ = função exponencial; b = fator associado à inclinação da curva que expressa a fase ao redor do pico da lactação; c = parâmetro de estimação que define a persistência da lactação; e s = semana de lactação. Esse modelo se ajusta bem aos dados no início da lactação, mas apresenta menor precisão no final do ciclo, possivelmente porque a função exponencial se ajusta melhor ao redor do pico (SHERCHAND et al., 1995).

O modelo de Wilmink (1987) é dado por: $Y = a + bt + c \exp(-dt) + \varepsilon$. Segundo o autor, o parâmetro a está associado à produção inicial; b com a diminuição da produção após o pico de produção, c com aumento da produção inicial até direção ao pico e o parâmetro d representa o pico de produção. O modelo de Wilmink introduziu um componente exponencial negativo que melhora a representação do declínio tardio da produção.

O modelo de Rook et al. (1993) é dado por: $Y = a + b \cdot t + c \cdot t^2 + d \cdot \exp(-e \cdot t)$, onde o parâmetro a representa a produção inicial; b e c modelam o crescimento e a curvatura da produção ao longo do tempo, enquanto os parâmetros d e e controlam o componente exponencial negativo responsável por modelar o declínio da lactação após o pico. Esse modelo combina elementos polinomiais e exponenciais, oferecendo maior flexibilidade para representar diferentes formas de curvas de lactação, especialmente em rebanhos com padrões de produção mais irregulares. O termo quadrático permite acomodar variações na taxa de crescimento inicial, enquanto o termo exponencial melhora a capacidade de modelar a persistência e o declínio tardio da produção. Apesar da sua complexidade, o modelo de Rook pode proporcionar ajustes mais precisos em contextos produtivos específicos, especialmente quando há interesse em representar curvas com picos bem definidos e fases distintas de crescimento e queda na produção.

O modelo mecanicista desenvolvido por Dijkstra et al. (1997) envolve a proliferação e morte das células da glândula mamária durante a gestação e lactação. Esse modelo oferece uma compreensão dos fatores que controlam a variação na produção de leite durante a lactação, aspectos geralmente não considerados pela maioria dos modelos empíricos. Ele permite o cálculo simples da posição e magnitude do rendimento máximo, embora possa estimar uma produção igual a zero no momento do parto, o que não é real (DIJKSTRA et al., 2010).

Os modelos matemáticos são avaliados por critérios de qualidade que incluem a qualidade do ajuste (capacidade de previsão), o coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado), o desvio padrão residual ou a raiz do erro quadrático médio (RMSE), a estatística de Durbin-Watson (DW) e os Critérios de Informação de Akaike (AIC) (GHAVI HOSSEIN-

ZADEH, 2016). Outra técnica comum para avaliar e comparar modelos é a análise dos resíduos, que consiste na diferença entre os valores observados e os valores preditos pela equação de regressão gerada pelo modelo.

3. Referências Bibliográficas

ABCBRH - **Associação Brasileira de Criadores de Bovinos da Raça Holandesa**. Disponível em: <https://www.gadoholandes.com.br/a-raca>. Acesso em: 05 mar. 2025.

ABCG – **Associação Brasileira dos Criadores do Girolando**. Disponível em: www.girolando.com.br/girolando/sobre-a-raca. Acesso em 10 mai. 2025.

ABCGIL - **Associação Brasileira dos Criadores de Gir Leiteiro**. 2025. Disponível em: <http://girleiteiro.org.br/>. Acesso em: 07 abr. de 2025.

ARAÚJO, F.F.; FIUZA, I.C.S. Raça de Gado Holandês. **Revista de trabalhos acadêmicos - universo Belo Horizonte**, v.1, n.8, 2023.

AUGUSTO, B.S. **Importância da raça holandesa na pecuária leiteira: revisão bibliográfica**. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2023. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/>. Acesso em 12 jun. 2023.

BONFÁ, C.S. **Modelagem da curva de lactação de vacas da raça Holandesa em diferentes ordens de parto**. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2012.

BRODY, S.; TURNER, C.W.; AND RAGSDALE, A.C. The relation between the initial rise and the subsequent decline of milk secretion following parturition. **Journal of General Physiology**, v.6, p.541-545, 1924

BRODY, S.A.; RAGSDALE, A.C.; TURNER, C.W. The rate of decline of milk secretion with the advance of the period of lactation. **Journal of General Physiology**, v.5, p.441-444, 1923.

CANAZA-CAYO A.W., LOPES, P S., SILVA, M.V.G.B., COBUCI, J.A., TORRES, R.A. MARTINS, M.F., ARBEX, W.A. Estrutura populacional da raça Girolando. **Ciência Rural**, **Santa Maria**, v.44, n.11, p.2072-2077, 2014.

CARVALHO, V. H. S.; DO CARMO, R. B.; PINTO, S. C. C. Impacto da utilização das biotécnicas da reprodução animal e o melhoramento genético na pecuária de corte. **PUBVET**, v. 17, n. 8, e1427, 2023. <https://doi.org/10.31533/pubvet.v17n8e1427>

COBUCI, J.A., EUCLYDES, R.F., PEREIRA, C.S., AMEIDA TORRES, R., COSTA, C.N., LOPES, P.S. Persistência na lactação - uma revisão. **Archivos Latinoamericanos de Producción Animal**, v.11; n.3, p.163-173, 2003.

COBUCI, J.A.; EUCLYDES, R.F.; COSTA, C.N.; LOPES, P.S.; TORRES, R.A. Avaliação da curva de lactação de vacas da raça Holandesa utilizando modelos não lineares. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.34, n.3, p.1025-1034, 2005. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982005000300028>.

COBUCI, J.A.; EUCLYDES, R.F.; LOPES, P.S.; COSTA, C.N.; PEREIRA, C.S.; TORRES, R.A. Estimativas de parâmetros genéticos para a curva de lactação de vacas mestiças Holandês × Zebu. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.33, n.5, p.1110-1117, 2004. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982004000500008>.

CUNHA, D.N.F.V.; PEREIRA, J.C.; SILVA, F.F.; CAMPOS, O.F.; BRAGA, J.L.; MARTUSCELLO, J.A. Selection of models of lactation curves to use in models of milk production simulation systems. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.39, p.891-902, 2010.

DALTRO, D.S.; PADILHA, A.H.; GAMA, L.T. et al. Heterosis in the components of lactation curves of Girolando cows. **Italian Journal of Animal Science**, v.18, n.1, p.267-278, 2019a. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2018.1507627>.

DALTRO, D.S.; PADILHA, A.H.; GAMA, L.T.; SILVA, M.V.G.B.; COBUCI, J.A. Breed, heterosis, and recombination effects for lactation curves in Brazilian cattle. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.50, e20200085, 2021. <https://doi.org/10.37496/rbz5020200085>

DALTRO, D.S.; PADILHA, A.H.; SILVA, M.V.G.B. et al. Heterosis in the lactation curves of Girolando cows with emphasis on variations of the individual curves. **Journal of Applied Animal Research**, v.47, n.1, p.85-95, 2019b. <https://doi.org/10.1080/09712119.2019.1575223>.

DALTRO, D.S.; SILVA, M.V.G.B.; GAMA, L.T. et al. Estimates of genetic and crossbreeding parameters for 305-days milk yield of Girolando cows. **Italian Journal of Animal Science**, v.19, p.86-94, 2020. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2019.1702110>.

DIJKSTRA, J.J. France; M. S. Dhanoa, J A. Maas, M. D. Hanigan, A. J. Rook, and D. E. Beever. A model to describe growth patterns of the mammary gland during pregnancy and lactation. **Journal of Dairy Science**, v.80, p.2340-2354. 1997.

DIJKSTRA, J.; LOPEZ, S.; BANNINK, S.; DHANOA, M. S.; KEBREAB, E.; ODONGO, N.E.; FATHI NASRI, M.H.; BEHERA, K.; HERNANDEZ-FERRER, D.; FRANCE, J. Evaluation of a mechanistic lactation model using cow, goat and sheep data. **Journal of Agricultural Science**, v.148, p.249-262, 2010.

EVANGELISTA, A.F., MARTINS, R., VALOTTO, A.A., DIAS, L.T., TEIXEIRA, R.A. Fatores ambientais na predição da curva de lactação de vacas holandesas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.59(AB), e03366, 2024. Recuperado de <https://apct.sede.embrapa.br/pab/article/view/27829>

EVANGELISTA, A.F.; PEREIRA, R.J.; LOPES, P.S.; CARNEIRO, P.L.S.; TORRES, R.A.; SILVA, M.V.G.B. Environmental factors affecting lactation curve traits of Holstein cows in Brazil. **Tropical Animal Health and Production**, v.56, n.2, p.129, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11250-024-03894-5>

FAO - Food and Agriculture Organization of the United States Nations. **Dairy production and products: milk production**. Rome: FAO, 2020. Recuperado 04 de maio de 2025, de <http://www.fao.org/dairy-production-products/production/en/>

FREIRE, D.D.S. **Estudo de curvas de lactação em bovinos mestiços leiteiros na região do brejo paraibano**. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2020.

GENGLER, N. Persistency of lactation yields: A review. **Proc. Int. Workshop on Genetic Improvement of functional Traits in Cattle. Interbull Bulletin.** v.12, p.97-102, 1996.

GHAVI HOSSEIN-ZADEH, N. Comparison of non-linear models to describe the lactation curves for milk yield and composition in buffaloes (*Bubalus bubalis*). **Animal**, v.10, n.2, p.248-261, 2016.

HENRIQUES, L.T.; VALADARES FILHO, S.C.; FONSECA, M.A.; PAULINO, P.V.R.; DETMANN, E.; VALADARES, R.F.D. Evaluation of non-linear models and the effects of primiparous cows and calves intake on the lactation curve of Nelore cows. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.40, n.6, p.1287-1295. 2011.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa trimestral do leite, 2025.** Disponível em: Primeiros resultados | IBGE. Acesso em: 10 jul. 2025.

INNES, D.J.; POT, L.J.; SEYMOUR, D.J.; FRANCE, J.; DIJKSTRA, J.; DOELMAN, J.; CANT, J.P. Fitting mathematical functions to extended lactation curves and forecasting late-lactation milk yields of dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v.107, p.342-358, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23478>.

INNES, K.; WELLS, A.; PONTES, F.; DOHERTY, R.; KENNEDY, E. Parity impacts lactation curve shape in Holstein dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v.107, n.3, p.2451-2463, 2024. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23968>

LAGROTTA, M.R.; EUCLYDES, R.F.; VERNEQUE, R.S.; SANTANA JÚNIOR, M.L.S.; PEREIRA, R.J.; TORRES, R.A. Relação entre características morfológicas e produção de leite em vacas da raça Gir. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, n.4, 2010.

LI, M.; ROSA, G.J.M.; REED, K.F.; CABRERA, V.E. Investigating the effect of temporal, geographic, and management factors on US Holstein lactation curve parameters. **Journal of Dairy Science**, v.105, p.7525-7538, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2022-21882>.

LI, X.; WANG, Z.; CHEN, J.; LIU, L.; LI, Y. Seasonal effects on lactation curve and milk yield in Holstein cows under subtropical conditions. **Animals**, v.12, n.22, p.3094, 2022. <https://doi.org/10.3390/ani12223094>

LOPES, M.A.; REIS, E.M.; DEMEUI, F.A.; MESQUITA, A.A.; ROCHA, A.G.; BENEDICTO, G.C. Uso de ferramentas de gestão na atividade leiteira: um estudo de caso no sul de Minas Gerais. **Revista Científica de Produção Animal**, v.18, n.1, p.26-44, 2016. <http://dx.doi.org/10.5935/21764158/rcpa.v18n1p26-44>

LUCY, M.C. Fertility in high-producing dairy cows: reasons for decline and corrective strategies for sustainable improvement. **Society Reproduction and Fertility Supply**, v. 54, p.64-237, 2007.

MAPA - Ministério da Agricultura e Abastecimento. **Mapa do leite, 2025**. Disponível: Mapa do Leite - Ministério da Agricultura e Pecuária. Acesso: 02 jun. 2025.

NADERI, Y. Appropriate mathematical models to describe the lactation curves of milk production traits of Iranian Holstein dairy cattle. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v.40, e37895, 2018. DOI: <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v40i1.37895>.

ÖRS, A.; OĞUZ, C. Comparison of economic analysis of dairy farms supported and non supported by IPARD program: a case study of Konya Province, Turkey. **Custos e Agronegócio Online**, v.15, n.2, p.192-212, 2019.

PAPAJCSIK, I.A.; BODERO, J. Modeling lactation curves of Friesian cow in a subtropical climate. **Animal Production**, v. 47, n. 2, p. 201-207, 1988.

QUINTERO, J.C.; SERNA, J.I.; HURTADO, N.A. Modelos matemáticos para curvas de lactancia en ganado lechero. **Revista Colombiana Ciencias Pecuárias**, v.20, p.149 156, 2007.

RIBEIRO, J.R. da G.; BERGMANN, J.A.G.; QUIRINO, C.R.; RUAS, J.R.M.; PEREIRA, J.C.C.; REIS, R.B.; COELHO, S.G.; SILVA, M.A. de. Environmental and genetic effects on the lactation curves of four genetic groups of crossbred Holstein-Zebu cows. **Revista Brasileira**

de Zootecnia, v.41, n.11, p.2309–2315, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982012001100002>

ROOK, A.; FRANCE, J.; BROADBENT, J. Some interpretations of lactation curve models. **Livestock Production Science**, Amsterdam, v.35, n.3-4, p.311-325, 1993. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(93\)90019-V](https://doi.org/10.1016/0301-6226(93)90019-V).

SANTOS, D.J.A.; VERNEQUE, R.S.; LOPES, P.S.; COSTA, C.N.; RIBEIRO, A.C. Lactation curve parameters and milk yield of Zebu dairy breeds in Brazil. **Animal Production Science**, v.59, n.4, p.654–662, 2019. <https://doi.org/10.1071/AN17788>

SHERCHAND, L.; McNEW, R.W.; KELLOGG, D.W. et al. Selection of a mathematical model to generate lactation curves using daily milk yields of Holstein cows. **Journal of Dairy Science**, v.78, p.2507-2513, 1995.

SIKKA, L.C. A study of lactation as affected by heredity and environment. **Journal of Dairy Research**, n.17, p.231-252, 1950.

SILVA, M.V.G.B. et al. **Programa de Melhoramento Genético da Raça Girolando: Sumário de Touros Resultado do Teste de Progénie**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2014. 64p. (Documentos, 170).

TEIXEIRA, J.C.; HESPANHOL, A.N. A trajetória da pecuária bovina brasileira. **Caderno Prudentino de Geografia**, n.36, v.1, p.26-38, 2014.

TEKERLI, M., AKINCI, Z., DOGAN, I., AND AKCAN, A. Factors affecting the shape of lactation curves of Holstein cows from the Balikesir province of Turkey. **Journal of Dairy Science**, v.83, n.6, p.1381-1386, 2000.

VAL-ARREOLA, D.; KEBREAB, E.; DIJKSTRA, J.; FRANCE, J. Study of the lactation curve in dairy cattle on farms in Central Mexico. **Journal of Dairy Science**, v. 80, p. 3789-3799, 2004.

VANRADEN, P.M.; DEMATAWEWA, C.M.B.; PEARSON, R.E.; TOOKER, M.E. Productive life including all lactations and longer lactations with diminishing credits. **Journal of Dairy Science**, v. 89, p. 32133220, 2006.

VERNEQUE, R.S.; SANTOS, D.J.A.; RIBEIRO, A.C.; COBUCI, J.A.; COSTA, C.N. Genetic evaluation of crossbred Holstein × Zebu dairy cows for lactation curve traits in Brazil. **Livestock Science**, v.230, p.103841, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2019.103841>

WILMINK, J. B. M. Adjustment of test-day milk, fat and protein yield for age, season and stage of lactation. **Livestock Production Science**, v. 16, p. 335-348, 1987.

WOOD, P.D.P. Algebraic model of the lactation curve in cattle. **Nature**, n.216, p.164-165, 1967.

CAPÍTULO II

Modelagem de curvas de lactação em vacas de diferentes composições genéticas

Artigo conforme as normas da revista:

Arquivos Brasileiros de Medicina Veterinária e Zootecnia

1 **MODELAGEM DE CURVAS DE LACTAÇÃO EM VACAS DE DIFERENTES** 2 **COMPOSIÇÕES GENÉTICAS**

3
4 *[MODELING LACTATION CURVES IN COWS WITH DIFFERENT GENETIC*
5 *COMPOSITIONS]*

6
7 Sued Felipe Lacerda **Barjud**^{1*}, Severino Cavalcante de **Sousa Junior**²

8
9 ¹Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Universidade Federal do Piauí –
10 (UFPI), Teresina, Piauí.

11 ²Professor(a) do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Depto. Zootecnia, (UFPI),
12 Teresina, Piauí.

13
14 *autor para correspondência: suedfelipelacerdabarjud@gmail.com

15 **RESUMO**

16
17
18 O objetivo do presente estudo foi comparar diferentes modelos para ajustar a curva de lactação
19 de vacas leiteiras de diferentes grupos genéticos em diferentes ordens de lactação. Dados
20 referentes ao controle leiteiro de vacas primíparas e multíparas cruzadas de Holandês (H) nas
21 proporções 1/2H, 3/4H e 5/8H foram utilizados. Seis modelos não lineares foram ajustados
22 separadamente à cada lactação utilizando-se o método modificado de Gauss-Newton. Os
23 modelos ajustados foram comparados com base em medidas de qualidade de ajuste, por meio
24 do coeficiente de determinação ajustado (R^2_{adj}) e raiz do erro quadrático médio (RMSE), e
25 critérios de informação de Akaike (AIC) e bayesiano (BIC). Na primeira lactação, o modelo
26 Wilmink apresentou o melhor ajuste da curva de lactação para todos os grupos genéticos,
27 enquanto nas vacas multíparas o modelo Wilmink e Wood apresentaram melhor qualidade de
28 ajuste. Ainda para vacas multíparas, o modelo Rook apresentou melhor resultado para os
29 critérios de informação no grupo genético 1/2H, enquanto o modelo Wilmink foi o melhor nos
30 demais grupos genéticos. Conclui-se, que o modelo Wilmink é o modelo recomendado para
31 vacas leiteiras de diferentes ordens de parto e grupo genético, podendo ser utilizado para
32 estimação de parâmetros da curva de lactação e estudos genéticos.

33
34 **Palavras-chave:** Comparação de modelos, Cruzamento, Gado leiteiro, Modelos não lineares e
35 Produção de Leite.

36 **ABSTRACT**

37
38
39 The objective of this study was to compare different models to adjust the lactation curve of
40 dairy cows of different genetic groups in different lactation orders. Data related to the milk
41 control of primiparous and multiparous Holstein crossbred cows (H) in the proportions 1/2H,
42 3/4H and 5/8H were used. Six nonlinear models were adjusted separately for each lactation
43 using the modified Gauss-Newton method. The adjusted models were compared based on
44 goodness-of-fit measures, through the adjusted coefficient of determination (R^2_{adj}) and root
45 mean square error (RMSE), and Akaike (AIC) and Bayesian (BIC) information criteria. In the
46 first lactation, the Wilmink model presented the best adjustment of the lactation curve for all
47 genetic groups, while in multiparous cows the Wilmink and Wood models presented better
48 goodness of fit. For multiparous cows, the Rook model presented better results for the
49 information criteria in the 1/2H genetic group, while the Wilmink model was the best in the
50 other genetic groups. It is concluded that the Wilmink model is the recommended model for

dairy cows of different calving orders and genetic groups and can be used to estimate lactation curve parameters and genetic studies.

Keywords: Model comparison, Crossbreeding, Dairy, Non-linear modeling, and Milk production.

1. Introdução

A curva de lactação descreve a trajetória da produção de leite ao longo do tempo, sendo uma ferramenta fundamental para a compreensão da fisiologia da lactação e para o aprimoramento do manejo nutricional, reprodutivo e genético de vacas leiteiras (WOOD, 1967; MACCIOTTA et al., 2005). A forma da curva reflete o equilíbrio entre a secreção e a involução dos alvéolos mamários, apresentando, tipicamente, um aumento inicial após o parto, seguido por um pico de produção e uma fase de declínio gradual até o final da lactação (SÖLKNER & FUCHS, 1987).

A modelagem matemática das curvas de lactação permite sintetizar grandes volumes de dados em parâmetros biologicamente interpretáveis, como pico de lactação, persistência e produção total. Além disso, curvas bem ajustadas são essenciais para corrigir os efeitos de ambiente e de estágio de lactação em avaliações genéticas, bem como para prever a produção futura de leite em programas de seleção (SCHAEFFER, 2004; MUIR et al., 2007). Por isso, o estudo e a implementação de modelos para o ajuste da curva de lactação são fundamentais em programas leiteiros e de melhoramento genético (MORAIS et al., 2023; SALVADOR et al., 2021).

Diversos modelos não lineares foram propostos ao longo do tempo para descrever as curvas de lactação, entre os quais se destacam os modelos de Wood (1967) e Wilmink (1987). O modelo de Wood, descrito como uma função alométrica, é amplamente utilizado devido à sua simplicidade e interpretação direta, enquanto o modelo de Wilmink introduziu um componente exponencial negativo que melhora a representação do declínio tardio da produção. No entanto, a escolha do modelo que melhor se ajusta aos dados depende de diversos fatores, como a ordem de lactação, estação de parto, região, grupo genético, ambiente de produção e a estrutura dos dados disponíveis (SILVESTRE et al., 2006; MACCIOTTA et al., 2011; EVANGELISTA et al., 2024). Esses aspectos tornam a seleção do modelo uma tarefa específica para cada sistema de produção, e vários outros modelos também têm sido testados, como os de Brody et al. (1923), Sikka (1950), Rook et al. (1993) e Dijkstra (1997).

Em sistemas tropicais, caracterizados por maior heterogeneidade ambiental e pela presença de rebanhos com diferentes graus de sangue entre raças especializadas e adaptadas, a modelagem das curvas de lactação torna-se ainda mais desafiadora (CARVALHO et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2020). Nesses contextos, é fundamental avaliar o desempenho dos modelos em diferentes grupos genéticos e ordens de parto (HERNÁNDEZ-ZAMUDIO et al., 2022), a fim de garantir representações precisas da dinâmica produtiva e subsidiar decisões de manejo e melhoramento animal. Por esse motivo, diversos estudos têm avaliado diferentes modelos e métodos para determinar qual se ajusta melhor a vacas com distintas composições genéticas (DALTRO et al., 2021; HERNÁNDEZ-ZAMUDIO et al., 2022; RAHMAN et al., 2023; RIBEIRO et al., 2012), sendo frequentemente observados melhores ajustes para diferentes modelos, dependendo da composição genética da população estudada.

Dessa forma, o objetivo deste estudo foi identificar os modelos mais adequados para descrever as curvas de lactação de vacas primíparas e multíparas, pertencentes a distintos grupos genéticos, mantidas sob condições tropicais.

2. Materiais e Métodos

Os dados de produção de leite foram obtidos na Fazenda São Francisco, localizada no município de Parnaíba, estado do Piauí, e referem-se a lactações ocorridas entre os anos de 2021 e 2024. As vacas avaliadas eram oriundas de cruzamentos com a raça Holandesa (H), apresentando graus de sangue de 1/2H, 3/4H e 5/8H. Foram utilizados registros mensais de produção de leite, coletados no dia do controle leiteiro, de vacas primíparas e multíparas, acompanhadas do 5º dia pós-parto (excluindo-se o colostro) até o 305º dia de lactação.

Inicialmente, foram realizadas análises de consistência com o objetivo de excluir outliers, decorrentes de possíveis erros de anotação nas fichas de controle. Foram eliminadas as informações de vacas que apresentaram menos de 2 ou mais de 10 controles leiteiros durante a lactação, bem como de animais com produções inferiores a 2 kg ou superiores a 40 kg de leite por dia. As estatísticas descritivas dos dados editados estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Descrição do banco de dados por lactação

Lactação	GG	Proporção do gene Holandês (%)	N	Leite	DP
Primíparas	1/2H	50,0	598	12,70	4,15
	3/4H	75,00	788	13,28	3,83
	5/8H	62,5	364	11,91	4,09
Multíparas	1/2H	50,0	575	17,78	6,45
	3/4H	75,00	672	17,65	6,05
	5/8H	62,5	246	16,98	6,66

GG: Grupo Genético; N: Número de observações; Leite: Produção de Leite/diário; DP: Desvio-Padrão.

Para o ajuste das curvas de lactação, foram utilizados seis modelos não lineares, os quais estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Modelos para descrever a curva de lactação

Modelo	Função
Brody, 1923	$y = a(1 - e^{-bt})$
Sikka, 1950	$y = a(1 - e^{-(bt+ct^2)})$
Wood, 1967	$y = a(1 - e^{-bt})^c$
Wilmlink, 1987	$y = a + b(1 - e^{-ct}) + d(1 - e^{-kt})$
Rook, 1993	$y = a \left(\frac{1}{1 + \frac{b}{c} + \frac{d}{c}e^{-ct}} \right) e^{-dt}$
Dijkstra, 1997	$y = \frac{a(1 - e^{-ct})}{c} - dt$

a, b, c e d são parâmetros a serem estimados; e t é o período de tempo (em dias) após o parto em que foi medida a produção de leite; e é a função exponencial.

As análises foram realizadas por meio do procedimento NLIN, utilizando o método iterativo de Newton-Gauss, no software SAS (SAS Institute, 2014). Para evitar que irregularidades nos dados comprometessem o ajuste dos modelos de curvas de lactação, as produções de leite registradas nos dias de controle leiteiro foram agrupadas em classes mensais.

Cada modelo foi ajustado individualmente às informações de produção de leite mensal por controle leiteiro, separadas por ordem de lactação. A qualidade do ajuste foi avaliada por

meio do coeficiente de determinação ajustado (R^2_{adj}), da raiz do erro quadrático médio (RMSE), do critério de informação de Akaike (AIC) e do critério de informação bayesiano (BIC)

O R^2_{adj} foi calculado usando a seguinte fórmula: $R^2_{adj} = 1 - ((n - 1) / (n - p)) \times (1 - R^2)$,

onde R^2 é o coeficiente de determinação $R^2 = 1 - (SQR/SQT)$, em que n é o número de observações da amostra, p é o número de parâmetros na equação, SQR é a soma de quadrados do resíduo e SQT é a soma de quadrados total.

O RMSE foi calculado pela equação: $\sqrt{SQR / \sqrt{n-p-1}}$.

O critério de informação de Akaike (AIC) foi obtido pela seguinte expressão: $AIC = n \ln (SQR/n) + 2p$

Já o critério de informação bayesiano (BIC) foi calculado como: $BIC = n \ln (SQR/n) + p \ln(n)$, em que $\ln$ representa o logaritmo natural. Valores mais altos de R^2_{adj} e valores mais baixos de RMSE, AIC e BIC indicam melhor ajuste do modelo, respectivamente, sendo utilizados como critérios comparativos entre os modelos testados para a modelagem das curvas de lactação.

3. Resultados

Para vacas primíparas, o modelo Wilmink apresentou valores de R^2_{adj} superiores a 0,80 na maioria dos grupos, com baixos valores de RMSE ($< 1,5$), conforme mostrado na Tabela 3. Além disso, os critérios de informação utilizados para comparar os modelos (AIC e BIC) foram menores para o modelo Wilmink em todos os grupos genéticos avaliados, indicando melhor ajuste. Os valores de AIC foram 3898,36; 5191,44 e 2117,17 para os grupos 1/2H, 3/4H e 5/8H, respectivamente, enquanto os valores de BIC foram 411,60; 225,01 e 167,26 para esses mesmos grupos. Após o modelo Wilmink, o modelo Brody apresentou os segundos maiores valores de R^2_{adj} , abaixo de 0,70, e baixos valores de RMSE ($< 1,6$). Em seguida, o modelo Wood mostrou valores de R^2_{adj} entre 0,60 e 0,80, e RMSE entre 2,00 e 3,00, além de apresentar valores intermediários nos critérios de informação analisados. Os demais modelos (Dijkstra, Rook e Sikka) apresentaram menores valores de R^2_{adj} ($< 0,60$), valores intermediários a altos para RMSE ($> 1,5$), e maiores valores de AIC e BIC em todos os grupos genéticos

Tabela 3. Critérios de comparação de modelos utilizados para ajustar as curvas de lactação em vacas primíparas de diferentes grupos genéticos

Grupo Genético ^b	Modelos	Critérios de Ajuste ^a			
		R^2_{adj}	RMSE	AIC	BIC
1/2H	Brody, 1923	0.79	1.56	3991.70	500.62
	Dijkstra, 1997	0.74	1.67	4072.77	590.33
	Rook, 1993	0.57	1.45	3915.08	432.64
	Sikka, 1950	0.28	5.74	5437.23	1950.47
	Wilmink, 1987	0.80^c	1.43	3898.36	411.60
	Wood, 1967	0.67	2.30	4423.83	937.07
3/4H	Brody, 1923	0.83	1.43	5514.46	543.41
	Dijkstra, 1997	0.77	1.68	5766.72	804.91
	Rook, 1993	0.48	1.70	5780.24	818.44
	Sikka, 1950	0.17	6.32	7755.17	2788.74
	Wilmink, 1987	0.90	1.15	5191.44	225.01
	Wood, 1967	0.71	2.24	6196.39	1229.96

	Brody, 1923	0.80	1.57	2268.31	314.58
	Dijkstra, 1997	0.72	1.76	2344.10	398.01
5/8H	Rook, 1993	0.53	1.62	2288.06	341.97
	Sikka, 1950	0.23	5.26	3081.77	1131.87
	Wilmink, 1987	0.88	1.26	2117.17	167.26
	Wood, 1967	0.73	2.13	2474.51	524.60

^aCritérios: R^2_{adj} = coeficiente de determinação ajustado, RMSE = Raiz quadrada do quadrado médio do resíduo, AIC = critério de informação de Akaike, BIC = critério de informação Bayesiano. ^b1/2H = meio sangue Holandês, 3/4H = três quartos Holandês e 5/8H = cinco oitavos Holandês. ^cValores em negrito e itálico indicam os melhores valores para o critério de escolha

dos modelos dentro de cada grupo genético (mais alto para R^2_{adj} e menores para RMSE, AIC e BIC).

Os resultados dos critérios de comparação e ajuste dos modelos foram mais dependentes dos grupos contemporâneos nas vacas multíparas do que nas primíparas (Tabela 4). Para o modelo Wilmink, os valores de R^2_{aj} foram os mais altos, superiores a 0,80, semelhante ao observado em vacas primíparas. No entanto, o modelo Wood apresentou valores de R^2_{aj} próximos aos do Wilmink, chegando a igualá-los nos grupos 1/2H e 5/8H. Quanto ao RMSE nas vacas multíparas, houve divergência sobre qual modelo foi o melhor, variando entre os grupos genéticos. No grupo 1/2H, o menor RMSE foi obtido pelo modelo Rook (1,65), enquanto nos grupos 3/4H e 5/8H, os menores RMSE foram observados no modelo Wilmink. O modelo Wood apresentou valores intermediários de RMSE em todos os grupos, ocupando a segunda posição em termos de menor erro. Os maiores valores de RMSE foram geralmente observados nos modelos Brody, Dijkstra e Sikka.

Tabela 4. Critérios de comparação de modelos utilizados para ajustar as curvas de lactação em vacas multíparas de diferentes grupos genéticos

Grupo Genético ^b	Modelos	Critérios de Ajuste ^a			
		R^2_{adj}	RMSE	AIC	BIC
1/2H	Brody, 1923	0.76	2.71	3658.09	910.04
	Dijkstra, 1997	0.54	3.67	3932.16	1192.33
	Rook, 1993	0.27	1.65^c	3209.08	469.25
	Sikka, 1950	0.24	7.76	4606.97	1863.03
	Wilmink, 1987	0.82	2.46	3571.51	827.57
	Wood, 1967	0.82	2.44	3563.22	819.28
3/4H	Brody, 1923	0.74	2.57	4502.00	1047.47
	Dijkstra, 1997	0.66	3.04	4687.09	1241.18
	Rook, 1993	0.25	2.46	4454.00	1008.08
	Sikka, 1950	0.25	7.98	5745.14	2294.92
	Wilmink, 1987	0.82	2.26	4361.00	910.78
	Wood, 1967	0.81	2.30	4380.30	930.08
5/8H	Brody, 1923	0.80	1.96	2417.01	463.28
	Dijkstra, 1997	0.56	2.74	2644.41	698.32
	Rook, 1993	0.17	1.71	2327.32	381.24
	Sikka, 1950	0.26	5.87	3156.22	1206.31
	Wilmink, 1987	0.88	1.58	2271.45	321.54
	Wood, 1967	0.88	1.60	2278.82	328.92

^aCritérios: R^2_{adj} = coeficiente de determinação ajustado, RMSE = Raiz quadrada do quadrado médio do resíduo, AIC = critério de informação de Akaike, BIC = critério de informação Bayesiano. ^b1/2H = meio sangue Holandês, 3/4H = três quartos Holandês e 5/8H = cinco oitavos Holandês. ^cValores em negrito e itálico indicam os melhores valores para o critério de escolha

dos modelos dentro de cada grupo genético (mais alto para R^2_{adj} e menores para RMSE, AIC e BIC).

Na Figura 1 são apresentadas as curvas de lactação observadas e previstas pelos modelos de Wilmink e Wood. Observou-se que as formas das curvas variaram conforme a ordem de lactação e os grupos genéticos, tanto nos dados observados quanto nas previsões dos modelos. As vacas primíparas apresentaram, ao longo da curva de lactação, uma produção de leite menor que as multíparas, além de menor persistência, evidenciada por um declínio mais acentuado na produção. O efeito do grupo genético sobre a curva foi mais evidente nas vacas primíparas: as vacas do grupo 1/2H não apresentaram um pico definido, com uma queda acentuada logo após o quinto dia de lactação. Já os demais grupos genéticos exibiram um pico claro por volta do 35º dia de lactação.

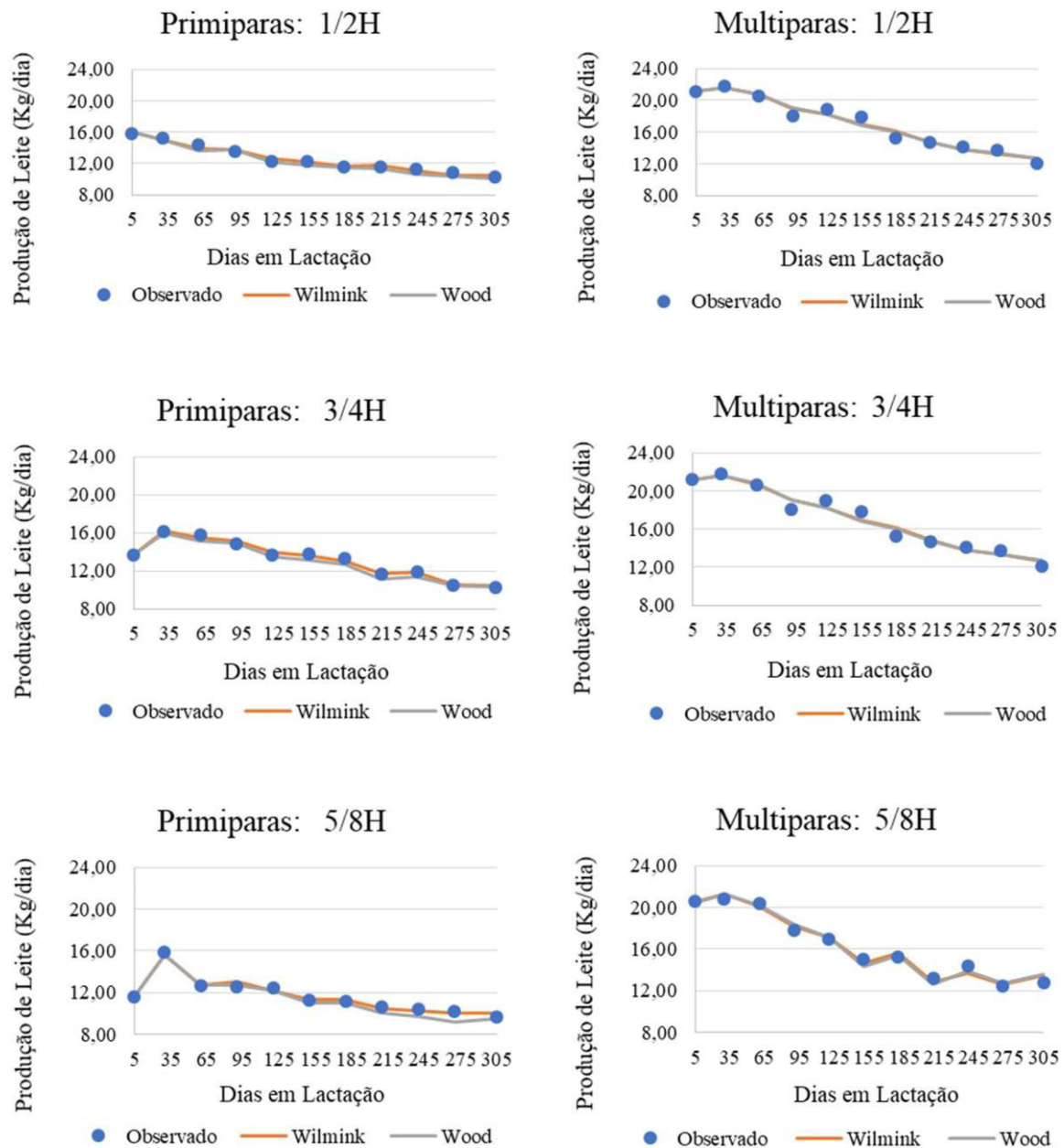


Figura 1. Curvas de lactação de vacas leiteiras de diferentes grupos genéticos e ordens de lactação utilizando dados observados e obtidas a partir dos modelos de Wilmink (1987) e Wood (1967). 1/2H = meio sangue Holandês, 3/4H = três quartos Holandês e 5/8H = cinco oitavos Holandês.

A forma da curva de lactação nas vacas multíparas foi consistente entre os diferentes grupos genéticos, apresentando um pico próximo ao 35º dia e uma persistência constante ao longo da lactação. Apenas o grupo 5/8H exibiu uma flutuação um pouco mais acentuada em comparação aos demais grupos.

Além disso, os comportamentos descritos foram semelhantes tanto nos dados observados quanto nas curvas estimadas pelos modelos de Wilmink e Wood. Para as vacas multíparas, as estimativas de produção de leite fornecidas pelos dois modelos foram praticamente iguais, independentemente do grupo genético.

No entanto, para as vacas primíparas, o modelo de Wood tendia a subestimar a produção de leite em comparação aos valores observados e às estimativas do modelo Wilmink.

4. Discussão

A correta modelagem das curvas de lactação é fundamental para compreender a dinâmica produtiva de vacas leiteiras ao longo do ciclo lactacional, contribuindo tanto para o manejo zootécnico quanto para estratégias de seleção genética. Diversos autores têm investigado as curvas de lactação sob diferentes aspectos, buscando determinar a função matemática mais adequada para descrever esse processo (Daltro et al., 2021; Pizarro Inostroza et al., 2022; Santos et al., 2021). No presente estudo, diferentes modelos não lineares foram ajustados para descrever as curvas de lactação de vacas primíparas e multíparas pertencentes a distintos grupos genéticos. A avaliação da qualidade do ajuste foi realizada com base nos coeficientes de determinação ajustados (R^2_{adj}), raiz do erro quadrático médio (RMSE), critério de informação Akaike (AIC) e critério de informação bayesiano (BIC), proporcionando uma análise abrangente do desempenho dos modelos.

De maneira geral, o modelo de Wilmink (1987) apresentou desempenho superior na maioria dos grupos genéticos e ordens de lactação avaliados (Tabelas 3 e 4), indicando excelente capacidade para descrever a variação da produção de leite ao longo dos dias de lactação. Os menores valores de AIC e BIC reforçam a eficiência do modelo em equilibrar qualidade de ajuste e simplicidade paramétrica. Além disso, observa-se que o efeito do grupo genético na primeira lactação é irrelevante para o ajuste dos modelos, pois a ordem dos critérios de ajuste foi a mesma independentemente do grupo genético estudado. Isso pode estar relacionado ao fato de que, na primeira lactação, as vacas geralmente ainda não atingiram a maturidade produtiva (Kincaid; Touchberry, 1966).

Espera-se que o grupo genético (ou composição racial) influencie a curva de lactação de vacas leiteiras (Walsh et al., 2008; Santos et al., 2021; Hernandez-Zamudio et al., 2022). Por isso, havia a hipótese de que esse efeito também afetaria a qualidade do ajuste dos modelos neste estudo. No entanto, isso não foi observado em vacas primíparas, conforme descrito anteriormente. Diferentemente dos nossos resultados, Daltro et al. (2020) verificaram que o melhor modelo dependia da composição genética do grupo avaliado em vacas primíparas. Esses autores utilizaram vacas provenientes de vários cruzamentos entre Holandês e Gir (1/4H, 3/4G, 3/8H, 5/8G, 1/2H, 1/2G, 5/8H, 3/4H, 1/4G, 7/8H, 1/8G, entre outros). O modelo de Wood apresentou os melhores resultados para vacas puras Holandês e aquelas com maior proporção dessa raça, enquanto o modelo de Wilmink foi superior para vacas Gir e com maior proporção dessa raça. Em estudo semelhante, Daltro et al. (2019) observaram que o modelo de Ali e Schaeffer (1987) proporcionou o melhor ajuste para a curva de lactação de vacas primíparas oriundas de diferentes cruzamentos entre Holandês e Gir, utilizando R^2_{adj} , RMSE e AIC como critérios de comparação.

Resultados semelhantes foram observados para vacas multíparas, nas quais o modelo de Wilmink apresentou algumas vantagens em relação aos demais, considerando a qualidade do ajuste (R^2_{adj}), embora os modelos Wilmink e Wood tenham mostrado desempenhos similares.

Em vacas múltíparas, o efeito do grupo genético pode ser mais relevante para a forma da curva de lactação, podendo influenciar a qualidade do ajuste dos modelos devido às diferenças nas funções que descrevem as curvas. Por exemplo, o modelo de Rook foi considerado o melhor para vacas múltíparas do grupo 1/2H, segundo os critérios de informação utilizados na comparação (Tabela 4), o que difere dos resultados encontrados para os outros grupos genéticos.

O bom desempenho do modelo de Wilmink pode ser atribuído à sua estrutura funcional, que combina um termo linear com um componente exponencial negativo, permitindo representar adequadamente o rápido aumento da produção após o parto, o pico de lactação e o declínio subsequente. Isso está alinhado com estudos anteriores (Macciotta et al., 2006; Silvestre et al., 2006; Daltro et al., 2021), que também relataram bons resultados desse modelo em diferentes ambientes, sistemas produtivos e grupos genéticos. Autores como Sitkowska et al. (2020) também destacaram a importância do modelo Wilmink para o ajuste das curvas de lactação. Além disso, por possuir apenas quatro parâmetros, o modelo minimiza o risco de superajuste, característica importante em contextos com dados limitados por animal, como em rebanhos tropicais ou experimentais. No entanto, é importante ressaltar que a qualidade do ajuste dos modelos pode variar conforme o tipo e a homogeneidade dos dados (Daltro et al., 2021), além de depender da raça (Santos et al., 2021; Hernández-Zamudio et al., 2022), idade, estação de parto, nível de produção (Gantner et al., 2010), ordem de parto (Seahin et al., 2015) e tipo de ordenha (Pizarro Inostroza et al., 2022).

Em contrapartida, os modelos de Sikka (1950) e Rook et al. (1993) apresentaram os piores desempenhos (Tabelas 3 e 4), conforme evidenciado pelos baixos valores de R^2 ajustado e pelos altos valores dos critérios AIC e BIC. Esses resultados indicam uma baixa qualidade de ajuste e pouca parcimônia, com penalizações associadas à complexidade estrutural dos modelos. Essa má performance pode estar relacionada à menor flexibilidade desses modelos para representar as curvas de lactação observadas neste estudo, que se caracterizam por picos menos definidos e maior persistência – padrões comuns em vacas mestiças ou adaptadas, ao contrário do que se observa em vacas Holandesas puras. Portanto, os resultados sugerem que os modelos de Sikka e Rook são menos adequados para capturar a dinâmica da lactação em rebanhos com diversidade genética e sob condições ambientais tropicais. Por isso, não são recomendados para ajuste da curva de lactação nesse tipo de sistema.

O modelo de Wood (1967) apresentou desempenho intermediário, com bom ajuste especialmente em vacas múltíparas, nas quais sua estrutura logarítmica permitiu representar adequadamente a persistência da lactação. Esse resultado pode refletir mudanças fisiológicas associadas à experiência reprodutiva e à maior capacidade produtiva das múltíparas (Wood, 1967; López et al., 2000). Daltro et al. (2021) relataram comportamento semelhante entre os modelos de Wood e Wilmink em diferentes grupos genéticos (Holandês, Gir e Girolando), justificando sua escolha conjunta em estudos genéticos posteriores. No entanto, em vacas primíparas, o modelo de Wood tende a subestimar o pico de lactação e superestimar o declínio, o que pode comprometer a qualidade do ajuste. Apesar disso, Salvador et al. (2021) relataram que o modelo frequentemente apresentou menor AIC e bom desempenho global. Da mesma forma, Santos et al. (2021) identificaram o modelo de Wood como o mais adequado para vacas cruzadas em clima tropical, destacando sua boa interpretação biológica.

Do ponto de vista prático, a utilização de modelos adequados para descrever a curva de lactação oferece diversas aplicações relevantes. Em primeiro lugar, possibilita a estimativa precisa de parâmetros biológicos como pico de produção, tempo até o pico e persistência, que são essenciais para o manejo alimentar, reprodutivo e sanitário dos animais. Além disso, curvas bem ajustadas podem ser incorporadas em avaliações genéticas, como covariáveis em modelos de regressão aleatória, contribuindo para o aumento da acurácia na predição dos valores genéticos para produção de leite ao longo das diferentes fases da lactação (Schaeffer, 2004).

A escolha inadequada de modelos pode gerar erros sistemáticos na estimativa da produção total e na identificação de animais superiores, comprometendo a eficácia de programas de melhoramento genético. No presente estudo, os resultados indicam que o modelo de Wilmink é o mais apropriado para descrever a produção de leite ao longo da lactação, independentemente do grupo genético e da ordem de parto, nas condições tropicais avaliadas. Essa consistência o torna especialmente útil em sistemas de produção com múltiplos grupos genéticos ou em situações onde a coleta de dados ocorre em dias aleatórios da lactação. Ainda assim, o modelo de Wood apresentou desempenho satisfatório e ajustes comparáveis ao modelo de Wilmink, configurando-se como uma alternativa viável.

As curvas de lactação obtidas neste estudo evidenciaram diferenças significativas associadas à ordem de lactação e à composição genética das vacas, com implicações diretas para o manejo reprodutivo e nutricional em rebanhos leiteiros de regiões tropicais (Figura 1). Como apontado por estudos anteriores, vacas primíparas apresentaram menor produção de leite e menor persistência em comparação às múltíparas, possivelmente devido ao crescimento corporal ainda em curso e ao menor desenvolvimento mamário (Macciotta et al., 2005; Silvestre et al., 2006). Esse padrão foi bem representado tanto nos dados observados quanto nas curvas ajustadas pelos modelos de Wilmink e Wood, reforçando a aplicabilidade desses modelos na descrição da dinâmica produtiva em diferentes grupos genéticos e ordens de parto.

As diferenças relacionadas à composição racial também foram evidentes, especialmente entre as vacas primíparas 1/2H, que não apresentaram um pico de lactação bem definido. Esse comportamento sugere menor aptidão leiteira nesse grupo genético, o que condiz com a menor proporção de genética Holandesa e, possivelmente, com maior influência de raças adaptadas aos trópicos, geralmente associadas a menor persistência na lactação (Ragab et al., 2016; Daltro et al., 2021). Em contraste, os grupos 3/4H e 5/8H apresentaram picos de produção mais evidentes entre o 30º e o 60º dia de lactação, compatíveis com os padrões típicos de vacas com maior grau de sangue Holandês (Grossman; Koops, 2003).

O modelo de Wilmink apresentou o melhor ajuste geral, especialmente nas fases iniciais e intermediárias da lactação, como já relatado na literatura para rebanhos sob condições tropicais (Silvestre et al., 2009; Souza et al., 2020). Esse desempenho reforça sua aplicabilidade prática em sistemas de produção caracterizados por variabilidade climática e genética, como os analisados neste estudo. Já o modelo de Wood, embora seja tradicional e biologicamente interpretável (Wood, 1967), tendeu a superestimar ou suavizar certas transições da curva, especialmente em grupos com menor nível produtivo.

Do ponto de vista prático, os resultados deste estudo destacam a importância de considerar a interação entre genética, manejo e ordem de parto na modelagem da curva de lactação. Vacas primíparas com menor grau de sangue Holandês podem demandar programas nutricionais diferenciados para sustentar a persistência da produção, enquanto múltíparas com maior proporção de genética Holandesa tendem a manter produções mais elevadas e persistentes, sendo candidatas preferenciais em estratégias voltadas à maximização da produção (Bouraoui et al., 2002; Bernabucci et al., 2010). Além disso, a ausência de um pico de lactação bem definido em alguns grupos, especialmente nas primíparas 1/2H, aponta para a necessidade de revisar estratégias de manejo no periparto, uma vez que falhas nesse período podem comprometer o desempenho global da lactação (Garcia-Ispuerto et al., 2007).

5. Conclusão

Os modelos de Wilmink e Wood apresentaram os melhores ajustes às curvas de lactação das vacas avaliadas, independentemente da composição genética e da ordem de parto, sendo, portanto, recomendados para utilização em programas leiteiros com características semelhantes às deste estudo. Por outro lado, os modelos de Sikka e Rook mostraram os piores desempenhos,

possivelmente devido à menor flexibilidade para representar curvas com picos menos acentuados e maior persistência, como observado nas populações analisadas. Observou-se ainda que o efeito do grupo genético não influenciou significativamente a qualidade do ajuste dos modelos em vacas primíparas, mas pode ter impacto relevante nas multíparas, devendo ser considerado em estudos futuros e aplicações práticas.

6. Referências

- ALI, T.E.; SCHAEFFER, L.R. Accounting for covariances among test day milk yields in dairy cows. *Can. Journal of Animal Science*, v.67, p.637-644, 1987.
- BERNABUCCI, U.; BAUMGARD, L.H.; RHOADS, R.P.; RHOADS, M.L.; GABAI, G. Metabolic and hormonal acclimation to heat stress in domesticated ruminants. *Animal*, v.4, n.7, p.1167-1183, 2010. <https://doi.org/10.1017/S175173111000090X>
- BOURAOUI, R.; LAHMIBI, H.; MAJDOUB, A.; DAKKAK, A.; BELYEA, R. The relationship of temperature-humidity index with milk production of dairy cows in a Mediterranean climate. *Animal Research*, v.51, p.479-491, 2002. <https://doi.org/10.1051/animres:2002036>
- CARVALHO, A.A.M.; BARBOSA, R.S.; SILVA, M.C. et al. Nonlinear modeling of lactation curves of Girolando cows in different environmental conditions. *Tropical Animal Health and Production*, v.52, p.227-234, 2020.
- DALTRO, D.S.; PADILHA, A.H.; GAMA, L.T. et al. Heterosis in the components of lactation curves of Girolando cows. *Italian Journal of Animal Science*, v.18, n.1, p.267-278, 2019. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2018.1507627>
- DALTRO, D.S.; PADILHA, A.H.; GAMA, L.T.; SILVA, M.V.G.B.; COBUCCI, J.A. Breed, heterosis, and recombination effects for lactation curves in Brazilian cattle. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v.50, e20200085, 2021. <https://doi.org/10.37496/rbz5020200085>
- DALTRO, D.S.; PADILHA, A.H.; SILVA, M.V.G.B. et al. Heterosis in the lactation curves of Girolando cows with emphasis on variations of the individual curves. *Journal of Applied Animal Research*, v.47, n.1, p.85-95, 2019. <https://doi.org/10.1080/09712119.2019.1575223>
- DALTRO, D.S.; SILVA, M.V.G.B.; GAMA, L.T. et al. Estimates of genetic and crossbreeding parameters for 305-days milk yield of Girolando cows. *Italian Journal of Animal Science*, v.19, p.86-94, 2020. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2019.1702110>
- GANTNER, V.; JOVANOVA, S.; RAGUZ, N. et al. Nonlinear vs. linear regression models in lactation curve prediction. *Bulg. Journal of Agricultural Science*, v.16, p.794-800, 2010.
- GARCIA-ISPIERTO, I.; LÓPEZ-GATIUS, F.; BECH-SÀBAT, G.; SANTOLARIA, P.; YÁNIZ, J.L.; NOGAREDA, C.; DE RABADÁN, M.; LÓPEZ-BÉJAR, M. Climate factors affecting conception rate of high producing dairy cows in northeastern Spain. *Theriogenology*, v.67, n.9, p.1379-1385, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2007.02.009>
- GROSSMAN, M.; KOOPS, W.J. Modeling extended lactation curves of dairy cattle: a biological perspective. *Livestock Production Science*, v.80, p.15-24, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(02\)00139-6](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(02)00139-6)
- HERNÁNDEZ-ZAMUDIO, J.A. et al. Performance of lactation curve models for Holstein, Brown Swiss, and crossbred cows. *Tropical Animal Health and Production*, v. 54, art. 192, 2022.

- 395 KINCAID, H.L.; TOUCHBERRY, R.W. Effects of parity order on production and body
396 measurements. *Journal of Dairy Science*, v.49, p.301-306, 1966.
- 397 LÓPEZ, S.; FRANCE, J.; GERRITS, W.J.J. et al. A generalized Michaelis–Menten equation
398 for the analysis of growth. *Journal of Animal Science*, v.78, p.1816-1828, 2000.
- 399 MACCIOTTA, N.P.P.; DIMAURO, C.; CAPPIO-BORLINO, A. The mathematical modelling
400 of lactation curves in dairy cattle. *Italian Journal of Animal Science*, v.10, p.e18, 2011.
- 401 MACCIOTTA, N.P.P.; VICARIO, D.; CAPPIO-BORLINO, A. Detection of different shapes
402 of lactation curve for milk yield using a test day model. *Animal Science*, v.80, p.435-441, 2005.
- 403 MACCIOTTA, N.P.P.; VICARIO, D.; CAPPIO-BORLINO, A. Use of mathematical functions
404 to model milk lactation curves of dairy cattle. *Italian Journal of Animal Science*, v.5, p.103-
405 111, 2006.
- 406 MORAIS, R.F. et al. Mathematical models for lactation curves in Holstein × Zebu crossbred
407 cows under tropical conditions. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 52, e20220217, 2023.
- 408 MUIR, B.L.; FATEHI, J.; SCHAEFFER, L.R. Genetic relationships between persistency and
409 reproductive performance in first-lactation Canadian Holsteins. *Journal of Dairy Science*, v.90,
410 p.1999-2008, 2007.
- 411 OLIVEIRA, C.S. et al. Nonlinear model fitting to lactation curves of dairy cows in tropical
412 systems. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, v. 72, n. 5, p. 1897–1905,
413 2020.
- 414 PIZARRO INOSTROZA, L. et al. Selection of mathematical models to describe lactation
415 curves using data from automatic milking systems. *Journal of Dairy Science*, v. 105, p. 3936–
416 3950, 2022.
- 417 RAGAB, M.; ALI, A.; GHONEIM, I.; SALEM, A. Comparison of different nonlinear models
418 to estimate milk yield lactation curve parameters in Egyptian buffaloes. *ournal of Animal*
419 *Science and Technology*, v.58, 2016. <https://doi.org/10.1186/s40781-016-0120-0>
- 420 RAHMAN, M. et al. Genetic aspects of wood's lactation curve parameters in jersey crossbred
421 cattle using bayesian approach. *Journal of Dairy Research*, v. 90, n. 4, p. 332–338, 2023.
- 422 ROOK, A.J.; FRANCE, J.; DHANOA, M.S. On the mathematical description of lactation
423 curves. *Journal of Agricultural Science*, v.121, p.97-102, 1993.
- 424 SALVADOR, J.M. et al. Performance of mathematical models in predicting lactation curves of
425 dairy cows in semi-intensive systems. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, v. 43, e53818, 2021.
- 426 SANTOS, M.V. et al. Lactation curve modeling for crossbred cows under tropical conditions.
427 *Tropical Animal Health and Production*, v. 53, p. 333, 2021.
- 428 SCHAEFFER, L.R. Application of random regression models in animal breeding. *Livestock*
429 *Production Science*, v.86, p.35-45, 2004.
- 430 ŞEAHIN, A.; ULUTAŞ, Z.; ARDA, Y. et al. Lactation curve and persistency of Anatolian
431 Buffaloes. *Italian Journal of Animal Science*, v.14, p.150–157, 2015.
- 432 SIKKA, L.C. A study of lactation as affected by heredity and environment. *Journal of Dairy*
433 *Research*, v.17, p.211-221, 1950.
- 434 SILVESTRE, A.M.; MARTINS, A.M.; SANTOS, V.A. et al. Lactation curves for milk, fat and
435 protein in dairy cows: A full approach. *Livestock Production Science*, v.104, p.250-257, 2006.

- 436 SILVESTRE, A.M.; PETIM-BATISTA, F.; COLAÇO, J. The accuracy of seven mathematical
 437 functions in modeling dairy cattle lactation curves based on test-day records from varying
 438 sample schemes. *Journal of Dairy Science*, v.92, p.5951–5963, 2009.
 439 <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1905>
- 440 SITKOWSKA, B.; KOLENDA, M.; PIWCZYŃSKI, D. Comparison of the fit of automatic
 441 milking system and test-day records with the use of lactation curves. Asian-Australas. *Journal*
 442 *of Animal Science*, v.33, p.408-415, 2020. <https://doi.org/10.5713/ajas.19.0190>
- 443 SÖLKNER, J.; FUCHS, W. A comparison of different models of lactation curve. *Livestock*
 444 *Production Science*, v.16, p.305-319, 1987.
- 445 SOUZA, F.R.P.; SILVA, M.V.G.B.; COBUCCI, J.A.; CARDOSO, V.L.; DALTRO, D.S.;
 446 RAMOS, A.F. Fitting lactation curves for test-day milk yield in Brazilian Gyr cows using
 447 different nonlinear functions. *Tropical Animal Health and Production*, v.52, p.121–128, 2020.
 448 <https://doi.org/10.1007/s11250-019-01988-1>
- 449 WALSH, S.; BUCKLEY, F.; PIERCE, K. et al. Effects of breed and feeding system on milk
 450 production, body weight, body condition score, reproductive performance, and postpartum
 451 ovarian function. *Journal of Dairy Science*, v.91, p.4401-4413, 2008.
- 452 WILMINK, J.B.M. Adjustment of test-day milk, fat and protein yield for age, season and stage
 453 of lactation. *Livestock Production Science*, v.16, p.335-348, 1987.
- 454 WOOD, P.D.P. Algebraic model of the lactation curve in cattle. *Nature*, v.216, p.164-165,
 455 1967.

CAPÍTULO III

Influência de fatores ambientais na produção de leite e parâmetros da curva de lactação de vacas de diferentes composições genéticas

Artigo conforme as normas da revista:
Tropical Animal Health and Production

Influência de fatores ambientais na produção de leite e parâmetros da curva de lactação de vacas de diferentes composições genéticas

[Influence of climatic factors on the milk production and parameters of the lactation curve in cows of different genetic composition and parity orders]

Sued Felipe Lacerda **BARJUD**^{1*}, Severino Cavalcante de **SOUSA JUNIOR**²

¹Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Universidade Federal do Piauí – (UFPI), Teresina, Piauí.

²Professor(a) do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Depto. de Zootecnia, (UFPI), Teresina, Piauí.

*autor para correspondência: suedfelipelacerdabarjud@gmail.com

Resumo

O objetivo do presente estudo foi avaliar o efeito de fatores ambientais na produção de leite e parâmetros da curva de lactação de vacas leiteiras de diferentes grupos genéticos. Dados referentes ao controle leiteiro de vacas primíparas e multíparas cruzadas de Holandês (H) nas proporções 1/2H, 3/4H e 5/8H foram utilizados. As curvas de lactação foram estimadas usando o modelo de Wood, com os parâmetros produção inicial (PI), tempo ao pico (TP), pico de produção (PP), persistência (PER) e produção acumulada aos 305 dias (L305). Em vacas primíparas, as curvas foram mais instáveis, especialmente no grupo 1/2H, com menor PER e pico de produção mais tardio. Vacas multíparas apresentaram maiores valores para todos os parâmetros produtivos, com curvas mais estáveis e persistentes. As correlações entre parâmetros indicaram que maior PER está associada a menor PI e maior TP. O período seco

favoreceu a PER e a produção acumulada em vacas primíparas 1/2H, enquanto vacas 3/4H e 5/8H mostraram menor sensibilidade às estações. Os resultados demonstram que a resposta produtiva à estação do ano varia com a composição genética e a ordem de parto, sendo fundamental considerar esses fatores para otimizar o manejo reprodutivo e nutricional em rebanhos leiteiros tropicais.

Palavras-chaves: Bovinos leiteiros, Curvas de lactação, Fatores climáticos, modelo de Wood, Persistência da lactação.

Abstract

The objective of this study was to investigate the effects of climatic conditions on milk yield and lactation curve parameters in dairy cows with different genetic compositions and parity orders. Milk test-day records of primiparous and multiparous crossbred Holstein (H) cows with genetic compositions of 1/2H, 3/4H, and 5/8H were used. Lactation curves were modeled using the Wood function, and the estimated parameters included initial milk yield (PI), time to peak (TP), peak yield (PP), persistency (PER), and accumulated milk yield at 305 days (L305). Multiparous cows showed superior performance for all productive parameters, with more stable and persistent lactation curves. In contrast, primiparous cows presented more variable curves, especially within the 1/2H group, characterized by lower persistency and later peak yield. Correlation analysis indicated that higher persistency was associated with lower initial yield and longer time to peak. Seasonal effects were more pronounced in primiparous cows. The dry season favored higher persistency and L305 in 1/2H primiparous cows, while cows with 3/4H and 5/8H genetic compositions showed less sensitivity to seasonality. These findings highlight that milk production and lactation curve parameters are affected by the interaction between parity order, genetic composition, and climatic conditions. Therefore, such factors should be

considered for the optimization of reproductive planning, nutritional strategies, and selection programs in dairy herds raised under tropical conditions.

Keywords: Dairy crossbreeding, Lactation curve, Climatic effects, Wood model, Lactation persistency.

1. Introdução

A curva de lactação descreve a variação da produção de leite ao longo do tempo, sendo uma ferramenta essencial para a avaliação da persistência, do pico e da eficiência produtiva em vacas leiteiras (Wood, 1967; Wilmink, 1987). O ajuste adequado dessas curvas permite comparações entre grupos genéticos, sistemas de manejo e condições ambientais, sendo fundamental para o desenvolvimento de estratégias voltadas à maximização da produção e ao bem-estar dos animais (Silvestre et al., 2006; Macciotta et al., 2005).

Diversos modelos matemáticos foram propostos para representar essa trajetória produtiva, entre eles o modelo exponencial inverso de Wood (1967), amplamente utilizado em rebanhos de regiões tropicais e subtropicais. A escolha do modelo mais apropriado depende das características da população e do objetivo da análise (Grossman & Koops, 2003). Estudos recentes confirmam o bom desempenho do modelo de Wood em ambientes tropicais, com melhor ajuste em rebanhos submetidos a variações climáticas, especialmente quando comparado a modelos como os de Wilmink; Ali; Schaeffer e Cobby; Le Du (Salvador et al., 2021; Pizarro Inostroza et al., 2022).

Em análises com vacas Holandesas e cruzadas em sistemas semiconfinados no Brasil, esse modelo apresentou os menores valores de AIC e BIC, além de elevada capacidade preditiva (Oliveira et al., 2020). Resultados semelhantes foram observados por Moraes et al. (2023), que destacaram o modelo de Wood como o mais eficiente na estimativa dos parâmetros da curva de

lactação em vacas mestiças Holandês x Zebu. Além disso, sua simplicidade e a interpretação biológica direta de seus parâmetros tornam esse modelo especialmente vantajoso para uso prático em avaliações zootécnicas (Santos et al., 2021; Ibrahim et al., 2023).

O desempenho produtivo de vacas leiteiras é influenciado por diversos fatores, incluindo composição racial, ordem de parto, estação do ano e práticas de manejo (Bouraoui et al., 2002; Bernabucci et al., 2010). Em particular, condições climáticas adversas, como altas temperaturas e elevada umidade relativa, típicas de regiões tropicais e subtropicais, podem comprometer significativamente a produção de leite, alterando tanto os níveis absolutos de produção quanto o formato da curva de lactação (Garcia-Ispierto et al., 2007; Souza et al., 2020).

Vacas mestiças, como aquelas resultantes do cruzamento entre raças europeias e zebuínas (por exemplo, 1/2, 3/4 e 5/8 Holandês), têm sido amplamente utilizadas em sistemas leiteiros tropicais devido à sua maior rusticidade e melhor adaptação ao calor (Ragab et al., 2016). No entanto, essas diferentes composições genéticas também respondem de forma distinta às variações ambientais e ao manejo, o que pode influenciar os parâmetros da curva de lactação (Silvestre et al., 2009). Além disso, a ordem de parto (primíparas versus múltiparas) exerce efeitos significativos sobre a produção e persistência da lactação, sendo necessária sua análise separada (Tekerli et al., 2000).

Diante disso, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito dos fatores ambientais e de manejo sobre a produção de leite e os parâmetros da curva de lactação em vacas mestiças Holandês-Zebu, considerando diferentes composições raciais (1/2, 3/4 e 5/8 Holandês) e ordens de parto.

2. Materiais e Métodos

Os dados de produção de leite foram obtidos na Fazenda São Francisco, localizada em Parnaíba, estado do Piauí, abrangendo lactações ocorridas entre 2021 e 2024. As vacas avaliadas eram cruzamentos com a raça Holandesa (H), com graus de sangue de 1/2H, 3/4H e 5/8H. Foram utilizados dados mensais de produção de leite registrados no dia do controle leiteiro, referentes a vacas primíparas e multíparas, monitoradas a partir do 5º dia após o parto (excluindo-se o colostro) até o 305º dia de lactação.

Inicialmente, foram realizadas análises de consistência com o objetivo de excluir *outliers* decorrentes de erros de anotação nas fichas de controle. Foram excluídas informações de vacas que apresentavam menos de 2 ou mais de 10 controles leiteiros durante a lactação, assim como vacas com produções inferiores a 2 kg ou superiores a 40 kg de leite por dia. Além disso, foram mantidas apenas as vacas submetidas a duas ordenhas diárias.

Além disso, para evitar que irregularidades nos dados comprometessem o ajuste das curvas de lactação, as produções de leite foram agrupadas em classes mensais. As curvas de lactação foram estimadas de acordo com a ordem de parto, a estação de parto e o grupo genético. Para o ajuste das curvas de lactação individuais, foi empregado o modelo WOOD (1967), conforme a seguinte equação:

$$Y = a[1 - \exp(-ct)]^b$$

onde:

Y : produção de leite(kg) no dia do controle leiteiro;

a : parâmetro associado com o início da produção de leite (kg);

t : período de tempo em dias após o parto, no qual a produção de leite (kg) foi medida;

b : representa a fase de ascensão média na fase pré-pico de produção;

exp : constante igual a 2,7182;

c : representa a fase declínio da curva após o pico de lactação.

Em estudo anterior com os mesmos dados, o modelo de Wood apresentou desempenho global satisfatório em termos de R^2 , AIC e RMSE, quando comparado a outros modelos utilizados para o ajuste de curvas de lactação (Capítulo I, Daltro et al., 2021), o que justifica sua utilização neste trabalho.

Os parâmetros de cada curva individual foram estimados por meio do método iterativo de Gauss-Newton, utilizando o procedimento NLIN do pacote estatístico *Statistical Analysis System* (SAS, 2014). Para garantir ajustes consistentes, foram excluídas as curvas consideradas atípicas, isto é, aquelas com valores negativos para os parâmetros “a” e “c”, ou com valores do parâmetro “b” negativos ou superiores a 1, conforme critério de Faro e Albuquerque (2002).

Com base nos parâmetros estimados, calcularam-se as características da curva de lactação segundo Wood (1967), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Características das curvas de lactação segundo modelo Wood

Características	Equação
Produção inicial	$(a * 1^b) * (1 - \exp(-c * 1))$
Produção no pico de lactação	$a * ((b/c)^b) * \exp(-b)$
Tempo em dias para atingir o pico de lactação	b/c
Persistência	$1 - (b + 1) * \exp(-c * 305)$
Produção acumulada de leite até 305 dias de lactação	$\int_0^{305} a t^b \exp^{-ct} dt$

a = parâmetro associado com o início da produção de leite (kg); b = representa a fase de ascensão média na fase pré-pico de produção; c = representa a fase declínio da curva após o pico de lactação; t = período em dias após o parto, no qual a produção de leite (kg) foi medida; exp = constante igual a 2,7182.

Para a avaliação dos efeitos ambientais sobre o formato da curva de lactação, os dados foram inicialmente classificados de acordo com a ordem de parto (primíparas e múltíparas).

Dentro de cada categoria, os animais foram posteriormente agrupados conforme a estação de parto e o grupo genético. A análise foi conduzida utilizando o seguinte modelo estatístico:

$$Y_{ijkl} = \mu + OL_i + GG_k + EST_l + \epsilon_{ijkl}$$

onde:

Y_{ijkl} : valor observado da variável dependente (produção de leite no início da lactação, tempo em dias para atingir o pico de lactação, produção no pico de lactação, persistência e o volume de leite produzido para 305 dias);

μ : constante (média geral);

OL_i : efeito fixo da ordem de lactação i ;

GG_k : efeito fixo do grupo genético k ;

EST_l : efeito fixo da Estação do Parto l ;

ϵ_{ijkl} : erro aleatório residual associado a cada observação $ijkl$.

Os efeitos dos fatores ambientais (ordem de lactação, estação de parto e grupo genético) sobre as variáveis dependentes – produção de leite no início da lactação, tempo em dias para atingir o pico de lactação, produção no pico de lactação, persistência e volume de leite produzido em 305 dias – bem como as correlações fenotípicas entre essas variáveis, foram avaliados por meio dos procedimentos PROC GLM e PROC CORR do pacote estatístico *Statistical Analysis System* (SAS, 2014). As comparações entre médias foram realizadas pelo teste de Tukey, adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

3. Resultados

Os parâmetros estimados da curva de lactação pelo modelo de Wood para vacas de diferentes grupos genéticos e ordens de lactação estão apresentados na Tabela 2. A produção inicial de leite (PI) variou de 8,82 kg (primíparas 5/8H) a 12,06 kg (múltiparas 3/4H). O tempo

até o pico de lactação (TP) variou entre 45,57 dias (multíparas 5/8H) e 59,37 dias (primíparas 5/8H). A produção no pico (PP) apresentou valores entre 14,35 kg (primíparas 1/2H) e 24,22 kg (multíparas 1/2H). A persistência da lactação (PER) oscilou de 6,59 (multíparas 5/8H) a 6,95 (primíparas 3/4H). A produção total estimada aos 305 dias (L305) variou de 3.498,4 kg (primíparas 1/2H) a 5.267,5 kg (multíparas 1/2H).

Tabela 2. Parâmetros da curva de lactação estimados pelo modelo de Wood em vacas de diferentes composições genéticas e ordens de lactação

Grupo Genético	Ordem de Lactação	PI	TP	PP	PER	L305
1/2H	Primíparas	8.91 ^B	53.95 ^A	14.35 ^B	6.81 ^A	3498.40 ^B
	Multíparas	11.81 ^A	49.25 ^A	24.22 ^A	6.66 ^B	5267.50 ^A
3/4H	Primíparas	9.21 ^B	57.97 ^A	16.27 ^B	6.95 ^A	3992.90 ^B
	Multíparas	12.06 ^A	48.98 ^B	21.43 ^A	6.72 ^B	5035.0 ^A
5/8H	Primíparas	8.82 ^B	59.37 ^A	14.53 ^B	6.82 ^A	3499.80 ^B
	Multíparas	11.52 ^A	45.57 ^B	22.31 ^A	6.59 ^A	4718.00 ^A

^{A-B}Médias seguidas de letras diferentes na coluna são significativamente diferentes pelo teste Tukey ($p < 0,05$). PI = Produção de leite inicial, em kg; TP = Tempo em dias para atingir o pico de lactação; PP = Produção de Leite, em kg no Pico de lactação; PER = Persistência na lactação; L305 = Lactação estimada para 305 dias de produção. ^b1/2H = meio sangue Holandês, 3/4H = três quartos Holandês e 5/8H = cinco oitavos Holandês.

No grupo genético 1/2H, as vacas multíparas apresentaram valores significativamente superiores às primíparas para PI (11,81 vs. 8,91 kg; $p < 0,05$), PP (24,22 vs. 14,35 kg; $p < 0,05$) e L305 (5.267,5 vs. 3.498,4 kg; $p < 0,05$). O TP foi menor nas multíparas (49,25 *versus* 53,95 dias), porém a diferença não foi estatisticamente significativa ($p > 0,05$). A PER foi ligeiramente maior nas primíparas (6,81 *versus* 6,66), diferença esta estatisticamente significativa ($p < 0,05$).

Para o grupo genético 3/4H, as vacas multíparas também apresentaram maiores valores de PI (12,06 vs. 9,21 kg; $p<0,05$), PP (21,43 vs. 16,27 kg; $p<0,05$) e L305 (5.035,0 *versus* 3.992,9 kg; $p<0,05$) em comparação às primíparas. O TP foi significativamente menor nas multíparas (48,98 *versus* 57,97 dias; $p<0,05$). A PER foi superior nas primíparas (6,95 *versus* 6,72), diferença estatisticamente significativa ($p<0,05$).

Por fim, no grupo genético 5/8H, as vacas multíparas também superaram as primíparas em PI (11,52 vs. 8,82 kg; $p<0,05$), PP (22,31 vs. 14,53 kg; $p<0,05$) e L305 (4.718,0 *versus* 3.499,8 kg; $p<0,05$). O TP foi significativamente inferior nas multíparas (45,57 *versus* 59,37 dias; $p<0,05$). A PER não diferiu significativamente entre as ordens de parto (6,59 *versus* 6,82; $p>0,05$).

Embora as comparações estatísticas tenham sido realizadas apenas entre ordens de lactação dentro de cada grupo genético, é possível observar algumas tendências gerais entre os grupos. De forma consistente, vacas com maior grau de sangue Holandês (3/4H e 5/8H) apresentaram maiores produções no pico e ao longo da lactação quando comparadas às 1/2H, especialmente entre as primíparas. Por outro lado, as diferenças entre os grupos 3/4H e 5/8H foram menos acentuadas e variaram conforme o parâmetro avaliado. Notadamente, o grupo 3/4H apresentou os maiores valores de PI e no pico entre as multíparas, enquanto o grupo 5/8H destacou-se pelo maior tempo até o pico nas primíparas, indicando diferenças sutis nos padrões das curvas.

As diferenças observadas nos parâmetros da curva de lactação em relação às ordens de parto e grupos genéticos resultaram em diferentes formatos de curva, que podem ser visualizados nas Figuras 1 e 2, para vacas primíparas e multíparas, respectivamente. As vacas primíparas apresentaram menores produções ao longo da curva de lactação em comparação às multíparas, independentemente do grupo genético. Observou-se maior instabilidade nas trajetórias das curvas de lactação das vacas primíparas em todos os grupos genéticos, enquanto

nas vacas multíparas, apenas o grupo 5/8H apresentou flutuações mais pronunciadas em comparação às demais curvas.

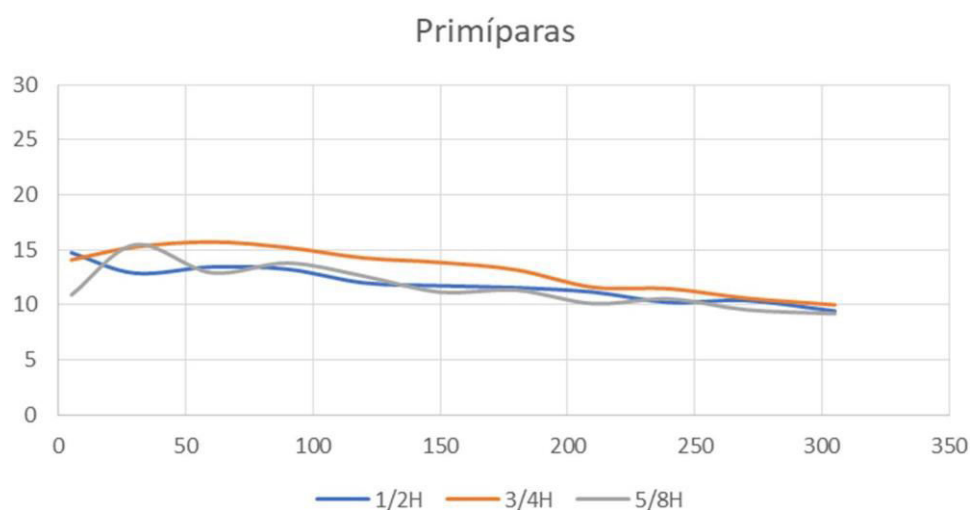


Figura 1. Curvas de lactação de vacas primíparas de diferentes grupos genéticos. 1/2H = meio sangue Holandês, 3/4H = três quartos Holandês e 5/8H = cinco oitavos Holandês.

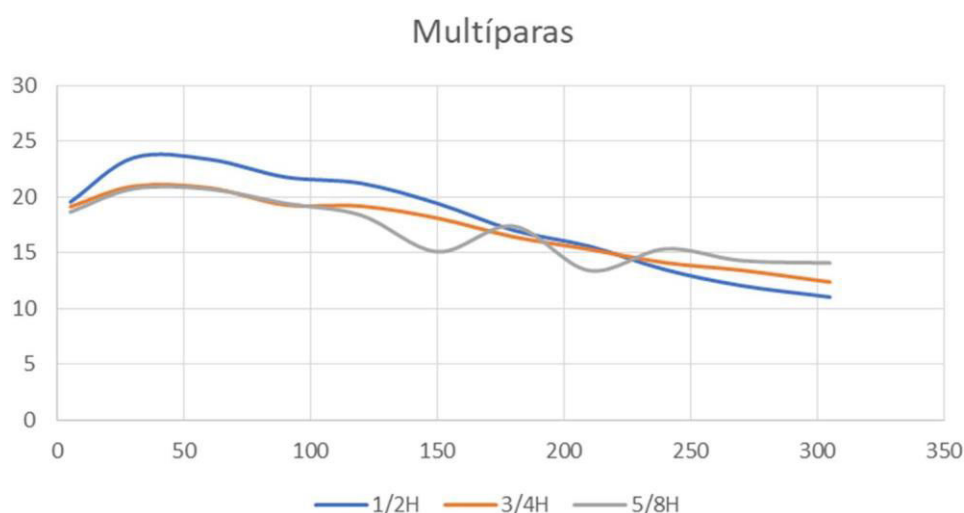


Figura 2. Curvas de lactação de vacas multíparas de diferentes grupos genéticos. 1/2H = meio sangue Holandês, 3/4H = três quartos Holandês e 5/8H = cinco oitavos Holandês.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros da curva de lactação estimados pelo modelo de Wood em vacas de diferentes composições genéticas e ordens de lactação, avaliados segundo os períodos do ano (chuvoso e seco). De forma geral, as vacas primíparas apresentaram valores entre 7,83 kg e 9,81 kg para PI, 49,50 e 69,23 dias para TP, 14,06 kg e 16,44 kg para PP, 6,64

e 6,99 para PER, e 3.211,5 kg e 4.036,3 kg para L305, respectivamente, considerando as médias para comparações entre os períodos do ano. Já as vacas multíparas apresentaram valores entre 11,46 kg e 12,57 kg para PI, 43,70 e 50,10 dias para TP, 20,66 kg e 24,34 kg para PP, 6,57 e 6,74 para PER, e 4.681,1 kg e 5.382,5 kg para L305, respectivamente, nas médias utilizadas para as comparações entre os períodos do ano.

Tabela 3. Efeito de estação sobre os parâmetros da curva de lactação estimados pelo modelo de Wood em vacas de diferentes composições genéticas e ordens de lactação

Ordem de Lactação	Grupo Genético	Período	PI	TP	PP	PER	L305
Primíparas	1/2H	Chuvoso	9.21 ^A	49.92 ^A	14.06 ^A	6.64 ^B	3211.50 ^B
		Seco	8.50 ^A	56.79 ^A	14.56 ^A	6.92 ^A	3701.60 ^A
	3/4H	Chuvoso	8.89 ^A	57.61 ^A	16.00 ^A	6.99 ^A	3923.40 ^A
		Seco	9.41 ^A	58.19 ^A	16.44 ^A	6.92 ^A	4036.30 ^A
	5/8H	Chuvoso	9.81 ^A	69.23 ^A	14.40 ^A	6.92 ^A	3504.70 ^A
		Seco	7.83 ^A	49.50 ^B	14.67 ^A	6.70 ^B	3494.90 ^A
	Multíparas	1/2H	Chuvoso	12.18 ^A	50.10 ^A	24.34 ^A	5382.50 ^A
			Seco	11.57 ^A	48.70 ^A	24.14 ^A	5192.30 ^A
		3/4H	Chuvoso	12.57 ^A	48.30 ^A	20.66 ^A	4832.20 ^B
			Seco	11.66 ^A	49.52 ^A	22.04 ^A	5198.90 ^A
		5/8H	Chuvoso	11.57 ^A	43.70 ^A	22.05 ^A	4681.10 ^A
			Seco	11.46 ^A	47.85 ^A	22.63 ^A	4763.10 ^A

^{A-B}Médias seguidas de letras diferentes na coluna são significativamente diferentes pelo teste Tukey ($p < 0,05$) comparando os períodos Chuvoso e Seco dentro de cada ordem de lactação e grupo genético. PI = Produção de leite inicial em kg; TP = Tempo em dias para atingir o pico de lactação; PP = Produção de Leite em kg no Pico de lactação; PER = Persistência na lactação;

L305 = Lactação estimada para 305 dias de produção. ^b1/2H = meio sangue Holandês, 3/4H = três quartos Holandês e 5/8H = cinco oitavos Holandês.

No caso das vacas primíparas 1/2H, não houve diferença significativa em PI, TP e PP entre os períodos. Entretanto, a PER foi maior no período seco (6,92) em comparação ao período chuvoso (6,64), enquanto a L305 também foi superior no período seco (3.701,6 kg) em relação ao chuvoso (3.211,5 kg), ambas diferenças significativas para vacas primíparas.

Não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre os períodos para nenhum dos parâmetros analisados nas vacas primíparas 3/4H, embora os valores de PI, PP e L305 tenham sido numericamente superiores no período seco. Diferentemente do observado em vacas com menor proporção de sangue Holandês, a PI foi significativamente maior no período chuvoso (9,81 kg) em comparação ao período seco (7,83 kg) nas vacas primíparas 5/8H. Por outro lado, o TP foi significativamente menor no período seco (49,50 dias) em relação ao chuvoso (69,23 dias), indicando um pico mais precoce para vacas primíparas 5/8H, nas quais a PER também foi maior no período chuvoso (6,92) em comparação ao seco (6,70). Não houve diferença significativa para PP e L305 nesse grupo.

As vacas múltíparas 1/2H não apresentaram diferenças significativas entre os períodos para nenhum dos parâmetros analisados, com valores semelhantes para PI, TP, PP, PER e L305, assim como observado para as vacas múltíparas 5/8H. Já nas vacas múltíparas 3/4H, apesar da ausência de diferenças significativas entre os períodos nos parâmetros de curva (PI, TP, PP, PER), a produção acumulada aos 305 dias (L305) foi significativamente maior no período seco (5.198,9 kg) em comparação ao período chuvoso (4.832,2 kg).

As correlações de Pearson entre os parâmetros da curva de lactação ajustados pelo modelo de Wood estão apresentadas na Tabela 4, separadamente para vacas primíparas (acima da diagonal principal) e múltíparas (abaixo da diagonal principal). Foram observadas

associações de diferentes magnitudes e direções, refletindo características fisiológicas distintas da produção de leite entre as duas ordens de parto.

Nas vacas primíparas, a PI apresentou correlação negativa moderada com o TP ($r = -0,67$; $p < 0,001$), indicando que vacas com maior produção no início da lactação tendem a atingir o pico mais rapidamente. A PI também apresentou correlação positiva com a PP ($r = 0,58$; $p < 0,001$) e com L305 ($r = 0,50$; $p < 0,001$), além de correlação negativa com a PER ($r = -0,59$; $p < 0,001$), sugerindo que maiores níveis iniciais podem estar associados a menor PER.

O TP apresentou correlação negativa com a PP ($r = -0,27$; $p < 0,01$), forte correlação positiva com a PER ($r = 0,86$; $p < 0,001$) e não apresentou associação significativa com a L305. Por sua vez, a PP mostrou correlação negativa com a PER ($r = -0,22$; $p < 0,05$) e correlação positiva e forte com a L305 ($r = 0,84$; $p < 0,001$), evidenciando sua importância para a produtividade total. A PER não apresentou correlação significativa com a L305 entre as primíparas ($r = 0,17$; n.s.).

Tabela 4. Correlações de Pearson entre os parâmetros da curva de lactação estimados pelo modelo Wood para vacas de diferentes composições genéticas e ordens de lactação

	PI	TP	PP	PER	L305
PI		-0.67***	0.58***	-0.59***	0.50***
TP	-0.71***		-0.27**	0.86***	0.01 ^{NS}
PP	0.15 ^{NS}	0.05 ^{NS}		-0.22*	0.84***
PER	-0.73***	0.91***	0.15 ^{NS}		0.17 ^{NS}
L305	0.16 ^{NS}	0.38**	0.72***	0.44**	

Acima da diagonal principal são as correlações para primíparas e a abaixo para as multíparas. PI = Produção de leite inicial em kg; TP = Tempo em dias para atingir o pico de lactação; PP = Produção de Leite em kg no Pico de lactação; PER = Persistência na lactação; L305 = Lactação estimada para 305 dias de produção. ^b 1/2H = meio sangue Holandês, 3/4H = três quartos Holandês e 5/8H = cinco oitavos Holandês. * = Significativo ao nível de 5 %, ** = Significativo ao nível de 1 %, *** = Significativo ao nível de 0.01 %, ^{NS} = Não significativo.

Entre as vacas multíparas, a PI também apresentou correlação negativa com o TP ($r = -0,71$; $p < 0,001$) e com a PER ($r = -0,73$; $p < 0,001$). Entretanto, diferentemente das primíparas, não houve correlação significativa entre PI e a P ($r = 0,15$; n.s.) nem entre PI e a L305 ($r = 0,16$; n.s.), sugerindo uma influência mais limitada da PI sobre o desempenho total em vacas mais experientes.

O TP apresentou forte correlação positiva com a PER ($r = 0,91$; $p < 0,001$), reforçando o padrão observado nas primíparas, e correlação positiva moderada com a L305 ($r = 0,38$; $p < 0,01$), indicando que vacas que atingem o pico mais tardiamente tendem a produzir mais ao longo da lactação. A PP correlacionou-se positivamente com a L305 ($r = 0,72$; $p < 0,001$), mas não apresentou correlações significativas com TP ou PER. A PER também mostrou correlação positiva com a L305 ($r = 0,44$; $p < 0,01$) em vacas multíparas, indicando um efeito relevante desse parâmetro na produtividade acumulada, o que não foi observado nas primíparas

4 . Discussão

Os resultados obtidos para os parâmetros da curva de lactação evidenciam efeitos claros tanto da composição genética quanto da ordem de lactação sobre a dinâmica da produção de leite em vacas mestiças sob condições tropicais. Em concordância com a literatura, as vacas multíparas apresentaram desempenho superior às primíparas em termos de produção inicial de leite (PI), produção no pico (PP) e produção total estimada aos 305 dias (L305), independentemente do grupo genético (Silvestre et al., 2006; Souza et al., 2020). Essas diferenças refletem o desenvolvimento fisiológico e anatômico da glândula mamária nas multíparas, que, por já terem passado por uma lactação anterior, tendem a apresentar maior capacidade secretora (Grossman; Koops, 2003; Macciotta et al., 2005), corroborando também os resultados apresentados nas Figuras 1 e 2.

O tempo até o pico de lactação (TP) foi consistentemente maior nas vacas primíparas em relação às multíparas em todos os grupos genéticos, reforçando a hipótese de que animais jovens apresentam uma adaptação fisiológica mais lenta ao início da lactação (Silvestre et al., 2009). Esse padrão pode estar associado a diferenças hormonais e ao particionamento energético entre os processos de crescimento e produção em animais de primeira lactação (Bernabucci et al., 2010).

Em relação à persistência da lactação (PER), observou-se uma tendência de valores ligeiramente mais elevados nas primíparas em comparação às multíparas. Esse comportamento é consistente com relatos anteriores, que indicam que vacas primíparas frequentemente apresentam um declínio mais gradual na produção após o pico, mesmo apresentando produção total inferior (Tekerli et al., 2000; Souza et al., 2020). Do ponto de vista do manejo, uma maior PER é desejável, pois contribui para uma curva de lactação mais equilibrada, reduz o estresse metabólico no início da lactação e promove maior estabilidade produtiva ao longo do tempo.

Embora as comparações estatísticas tenham sido realizadas apenas entre ordens de parto dentro de cada grupo genético, observa-se, de forma geral, que vacas com maior proporção de sangue Holandês (3/4H e 5/8H) tendem a apresentar maiores produções no pico e ao longo da lactação, especialmente nas primíparas, quando comparadas às vacas 1/2H. Esse comportamento é consistente com estudos que indicam que o aumento no grau de sangue Holandês está geralmente associado a maior desempenho leiteiro, devido ao potencial genético superior da raça Holandesa (Daltro et al., 2021; Ragab et al., 2016). No entanto, tais vantagens podem estar associadas a desafios adicionais em ambientes tropicais, como maior sensibilidade ao estresse térmico, menor desempenho reprodutivo e maiores exigências nutricionais (Bouraoui et al., 2002; Garcia-Ispuerto et al., 2007).

A aplicação do modelo de Wood (1967) permitiu a obtenção de parâmetros com significado biológico direto, facilitando a interpretação da dinâmica produtiva nas diferentes

categorias de vacas. A capacidade do modelo de captar as fases ascendente, de pico e de declínio da curva foi confirmada neste estudo, alinhando-se a investigações anteriores que comprovam sua adequação para a avaliação da produção leiteira em diferentes contextos (Silvestre et al., 2006; Ragab et al., 2016).

Em termos práticos, os resultados reforçam a importância de estratégias de manejo e seleção genética estratificadas por ordem de lactação e composição racial, visando potencializar o desempenho produtivo e zootécnico dos rebanhos. Essas estratégias incluem a formulação de dietas diferenciadas, decisões de descarte e programas de melhoramento que considerem essas variáveis, especialmente em sistemas tropicais ou subtropicais, onde o ambiente exerce forte influência sobre o fenótipo.

A análise de correlação entre os parâmetros da curva de lactação estimados pelo modelo de Wood evidenciou relações biológicas distintas entre os componentes da produção de leite em vacas primíparas e multíparas. Essas correlações refletem a dinâmica fisiológica da lactação, fornecendo informações relevantes tanto para a seleção genética quanto para as estratégias de manejo em condições tropicais.

Nas vacas primíparas, observou-se que a PI apresentou correlação negativa moderada com o TP e com a PER, ao mesmo tempo em que se correlacionou positivamente com a PP e com a L305. Esse padrão indica que vacas com maior produção logo após o parto tendem a atingir o pico de lactação mais rapidamente e a apresentar uma queda mais acentuada na produção ao longo do tempo. Tal comportamento é consistente com o perfil fisiológico de fêmeas em primeira lactação, que ainda estão em crescimento e enfrentam maior competição entre as exigências metabólicas para produção e desenvolvimento (Silvestre et al., 2009; Bernabucci et al., 2010).

A forte correlação positiva entre o TP e a PER ($r = 0,86$) nas primíparas sugere que curvas de lactação com pico mais tardio também são mais persistentes, ou seja, apresentam

menor declínio após o pico. No entanto, entre essas vacas, a PER não apresentou correlação significativa com a L305, indicando que a produção total tende a ser mais influenciada pelo nível de produção próximo ao pico do que pela manutenção dessa produção ao longo da lactação.

Entre as vacas multíparas, observou-se um padrão distinto. Embora a PI também tenha se correlacionado negativamente com o TP e com a PER, suas associações com a PP e com a L305 não foram significativas, sugerindo que a PI exerce menor influência direta sobre o desempenho total em vacas mais experientes. Em contrapartida, a PER apresentou correlação positiva e significativa com L305 ($r = 0,44$), evidenciando que a PER da lactação desempenha papel relevante na produção acumulada em vacas multíparas. Tal resultado está em consonância com estudos que indicam que, com a maturidade fisiológica e sob manejo nutricional adequado, vacas mais velhas tendem a manter níveis produtivos por períodos mais longos (Silvestre et al., 2006; Ragab et al., 2016).

Em ambos os grupos, a PP apresentou correlação forte e positiva com a L305, reforçando sua importância como principal determinante da produtividade leiteira. Resultados similares têm sido descritos na literatura, que apontam o pico de lactação como um bom indicador do potencial produtivo da vaca (Macciotta et al., 2005; Souza et al., 2020). Contudo, o conjunto de correlações observadas, especialmente entre o TP, a PER e a L305, evidencia que a forma da curva de lactação e o momento em que o pico ocorre também devem ser considerados, sobretudo quando se busca selecionar animais mais eficientes e adaptados às condições tropicais (Bouraoui et al., 2002; Grossman; Koops, 2003).

Do ponto de vista prático, esses resultados ressaltam a importância de estratégias de manejo e seleção diferenciadas conforme a ordem de lactação. Em vacas primíparas, ações voltadas para o aumento da produção próxima ao pico podem ser mais eficazes para melhorar o rendimento total. Já em multíparas, o foco em aprimorar a PER da lactação pode gerar

retornos mais expressivos. Ademais, a compreensão dessas relações pode subsidiar avaliações genéticas mais precisas, bem como decisões reprodutivas e nutricionais mais eficientes em sistemas de produção tropicais.

A influência do período do ano sobre os parâmetros da curva de lactação estimados pelo modelo de Wood revelou efeitos significativos, especialmente em vacas primíparas, enquanto nas multíparas as diferenças sazonais foram menos evidentes. Esses resultados indicam que animais mais jovens e em primeira lactação são mais sensíveis às variações ambientais, provavelmente em função do seu estágio fisiológico de crescimento e da menor adaptação ao sistema produtivo (Silvestre et al. 2009; Bernabucci et al. 2010).

Nas primíparas 1/2H, observou-se maior PER e maior L305 durante o período seco, mesmo com valores semelhantes de PI e PP. Esse fenômeno pode ser explicado pelo declínio mais gradual na produção após o pico no período seco, o que está alinhado com a relação positiva entre PER e produção total em sistemas tropicais (Souza et al. 2020). Além disso, as condições ambientais menos úmidas nesse período podem favorecer a sanidade e o conforto térmico dos animais, reduzindo o estresse metabólico típico da fase inicial da lactação (Bouraoui et al. 2002; Grossman; Koops 2003).

Nas primíparas 5/8H, a PI foi maior no período chuvoso, porém o TP foi significativamente menor no período seco, indicando um pico mais precoce e possivelmente uma curva de lactação mais curta. A PER foi ligeiramente menor no período seco, reforçando essa tendência. Esses resultados sugerem que, mesmo com PI inferior no período seco, a dinâmica da curva pode ser explorada para ajustes de manejo que visem melhorar a PER da lactação.

Nas primíparas 3/4H, os parâmetros da curva de lactação não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre os períodos, embora tenham sido observados valores numericamente maiores de L305 e PP no período seco. Esses achados sugerem uma possível

maior resiliência ambiental nesse grupo genético intermediário, característica já destacada como vantagem adaptativa em cruzamentos entre raças especializadas e adaptadas (Daltro et al. 2021).

Nas multíparas, os efeitos da estação foram menos evidentes. A única diferença significativa ocorreu nas vacas 3/4H, nas quais a L305 foi superior no período seco. Esse resultado pode ser explicado pela maior eficiência metabólica das vacas mais experientes em condições climáticas mais estáveis, o que possibilita melhor aproveitamento dos recursos nutricionais e reduz perdas decorrentes do estresse térmico (Ragab et al. 2016; Silvestre et al. 2006). Por outro lado, nas multíparas 1/2H e 5/8H, a ausência de diferenças significativas entre os períodos sugere uma maior estabilidade produtiva nesses grupos, embora fatores como genética, nutrição e manejo possam ter ocultado efeitos sazonais mais sutis.

De modo geral, os resultados indicam que o período seco foi mais favorável ao desempenho das vacas, especialmente em primíparas, apresentando maior produção acumulada e persistência da lactação. Isso ressalta a importância de estratégias de manejo específicas para cada grupo genético e ordem de parto. A adequação das práticas de alimentação, fornecimento de sombra e conforto térmico durante o período chuvoso é fundamental para minimizar perdas produtivas, especialmente em regiões tropicais (Bouraoui et al. 2002; Bernabucci et al. 2010).

O presente estudo demonstrou que os períodos do ano exercem influência diferenciada sobre os parâmetros da curva de lactação em vacas leiteiras cruzadas, com efeitos mais evidentes em primíparas do que em multíparas. Especificamente, os resultados indicam que o período seco tende a favorecer a persistência da lactação e a produção acumulada de leite, especialmente em vacas primíparas dos grupos 1/2H e 3/4H, sugerindo que essas categorias são mais sensíveis às variações sazonais.

Vacas primíparas 1/2H, por exemplo, apresentaram PER significativamente maior e produção acumulada mais elevada durante o período seco, apesar de valores semelhantes de PI

e no pico entre os períodos. Esse padrão destaca a importância do manejo nutricional e ambiental no início da lactação, sobretudo no período chuvoso, quando o estresse térmico, a umidade elevada e os desafios sanitários podem comprometer a sustentabilidade produtiva ao longo da lactação. Já nas vacas primíparas 5/8H, embora a PI tenha sido maior no período chuvoso, observou-se menor PER e antecipação do pico de lactação no período seco, sugerindo uma resposta mais curta, porém possivelmente mais eficiente no uso dos recursos disponíveis.

Entre as vacas multíparas, os efeitos sazonais foram mais discretos. Contudo, destaca-se que as vacas 3/4H multíparas apresentaram produção acumulada (L305) significativamente maior no período seco, embora os demais parâmetros da curva de lactação não tenham sofrido alterações significativas. Esse resultado pode ter implicações importantes para o planejamento estratégico da reprodução e para o manejo do pico de lactação em períodos mais favoráveis ao desempenho produtivo.

Do ponto de vista prático, esses resultados reforçam a necessidade de adotar estratégias de manejo específicas, considerando o grupo genético, a ordem de parto e o período do ano. Medidas como o fornecimento de alimentação de melhor qualidade, suplementação energética e proteica no início da lactação, além do fortalecimento das práticas de conforto térmico – incluindo sombreamento, ventilação adequada e acesso constante a água fresca – devem ser priorizadas, especialmente durante o período chuvoso, quando vacas primíparas 1/2H são mais suscetíveis a perdas na persistência e no desempenho produtivo geral.

Além disso, os resultados contribuem para o aprimoramento de programas de melhoramento genético e para a seleção de animais mais adaptados às condições tropicais, sugerindo que composições genéticas intermediárias, como as 3/4H, podem apresentar maior estabilidade entre estações e maior potencial produtivo. Por fim, o uso de modelos não lineares, como o de Wood, mostrou-se eficiente na caracterização da curva de lactação e na identificação de padrões sazonais relevantes, configurando-se como uma ferramenta valiosa para o

monitoramento zootécnico, o planejamento nutricional e a tomada de decisões no manejo leiteiro em regiões tropicais.

5 . Conclusão

Os resultados obtidos no presente estudo demonstram que fatores genéticos, ambientais e fisiológicos exercem influência decisiva sobre a forma e os parâmetros da curva de lactação em vacas mestiças. A análise evidenciou que vacas multíparas apresentam maior produção, curvas mais estáveis e persistentes quando comparadas às primíparas, indicando que a ordem de parto é um elemento-chave na definição do desempenho produtivo.

Além disso, os grupos genéticos com maior proporção de sangue Holandês mostraram melhor adaptação produtiva e maior consistência nas respostas frente às variações sazonais, reforçando a importância dos cruzamentos direcionados para maximizar o equilíbrio entre rusticidade e produtividade. Observou-se ainda que as condições ambientais, especialmente a estação do ano, afetam de forma significativa a produção inicial, o pico de lactação, a persistência e o volume acumulado, ressaltando a necessidade de estratégias de manejo ajustadas à realidade tropical. Dessa forma, a interação entre genética, ambiente e ordem de parto deve ser considerada como base para a formulação de programas de manejo e seleção que visem otimizar a eficiência da pecuária leiteira em regiões tropicais.

6. Referências Bibliográficas

Bernabucci U, Biffani S, Buggiotti L, Vitali A, Lacetera N, Nardone A (2010) The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 93:577–586. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2126>.

- 478 Bernabucci U, Lacetera N, Baumgard LH, Rhoads RP, Ronchi B, Nardone A (2010) Metabolic
479 and hormonal acclimation to heat stress in domesticated ruminants. *Animal* 4:1167–1183.
480 <https://doi.org/10.1017/S175173111000090X>.
- 481 Bouraoui R, Lahmar M, Majdoub A, Djemali M, Belyea R (2002) The relationship of
482 temperature-humidity index with milk production of dairy cows in a Mediterranean climate.
483 *Animal Research*, 51:479–491. <https://doi.org/10.1051/animres:2002036>.
- 484 Daltro DS, Padilha AH, Gama LT, Silva MVGB, Cobuci JA (2021) Breed, heterosis, and
485 recombination effects for lactation curves in Brazilian cattle. *Revista Brasileira de Zootecnia*,
486 50:e20200085. <https://doi.org/10.37496/rbz5020200085>.
- 487 Garcia-Ispuerto I, López-Gatius F, Santolaria P, Yániz J, Nogareda C, López-Béjar M, De
488 Rensis F (2007) Climate factors affecting conception rate of high producing dairy cows in
489 northeastern Spain. *Theriogenology*, 67:1379–1385.
490 <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2007.02.009>.
- 491 Grossman M, Koops WJ (2003) Modeling extended lactation curves of dairy cattle: A
492 biological basis for the multiphasic approach. *Journal of Dairy Science*, 86:988–998.
493 [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73682-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73682-0).
- 494 Macciotta NPP, Vicario D, Cappio-Borlino A (2005) Detection of different shapes of lactation
495 curve for milk yield in dairy cattle by empirical mathematical models. *Journal of Dairy Science*,
496 88:1178–1191. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)72784-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72784-1).
- 497 Ragab M, El-Bramony MA, Ashmawy TA, El-Bayomi KM, Torres RA, Elbeltagy AR (2016)
498 Estimation of lactation curve parameters of crossbred dairy cows in Egypt using non-linear
499 models. *Tropical Animal Health and Production*, 48:1105–1111.
500 <https://doi.org/10.1007/s11250-016-1068-5>.

- 501 Ragab M, Salem A, Zaky H, El Dine MA, Zahran S, Al-Shami A, Elbeltagy A, Elattar A,
 502 Schaeffer L (2016) Genetic evaluation of lactation curve traits in Holstein cattle under heat
 503 stress. *Archives Animal Breeding*, 59:457-465. <https://doi.org/10.5194/aab-59-457-2016>.
- 504 Ragab M, Salem AH, Ayoub H, Elattar AM (2016) Genetic analysis of lactation curve traits in
 505 Holstein cows under subtropical conditions. *Tropical Animal Health and Production*, 48:95–
 506 102. <https://doi.org/10.1007/s11250-015-0917-4>.
- 507 Silvestre AM, Martins AM, Santos V, Ginja M, Colaço J, Gama LT, Carolino N (2006)
 508 Lactation curves for milk, fat and protein in dairy cows: a full approach. *Livestock Science*,
 509 105:229–243. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2006.06.002>.
- 510 Silvestre AM, Petim-Batista F, Colaço J (2009) The accuracy of seven mathematical functions
 511 in modeling dairy cattle lactation curves based on test-day records from varying sample
 512 schemes. *Journal of Dairy Science*, 92:1773-1781. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1569>.
- 513 Souza BB, Oliveira MJ, Rodrigues ACC, Lima JRC, Silva MA, Mendes JO (2020) Effect of
 514 climatic variables on milk production of crossbred cows in semi-arid conditions. *Tropical*
 515 *Animal Health and Production*. 52:1417-1424. <https://doi.org/10.1007/s11250-019-02133-9>.
- 516 Souza BN, Daltro DS, Silva FF, Gama LT, Cobuci JA (2020) Modeling lactation curves in
 517 Holstein cows under Brazilian conditions: Genetic parameter estimates and model comparison.
 518 *Tropical Animal Health and Production*, 52:247-254. [https://doi.org/10.1007/s11250-019-](https://doi.org/10.1007/s11250-019-02000-z)
 519 [02000-z](https://doi.org/10.1007/s11250-019-02000-z).
- 520 Souza JCM, Cobuci JA, Silva MVGB, Lopes PS, Torres RA (2020) Modelling lactation curves
 521 in Brazilian dairy cattle under tropical conditions using mixed random regression models.
 522 *Tropical Animal Health and Production*, 52:1003-1012. [https://doi.org/10.1007/s11250-019-](https://doi.org/10.1007/s11250-019-02061-6)
 523 [02061-6](https://doi.org/10.1007/s11250-019-02061-6).

- 524 Tekerli M, Akinci Z, Dogan I, Akcan A (2000) Factors affecting the shape of lactation curves
525 of Holstein cows from the Balikesir province of Turkey. *Journal of Dairy Science*, 83:1381-
526 1386. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)75006-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)75006-5).
- 527 Wilmink JBM (1987) Adjustment of test-day milk, fat and protein yield for age, season and
528 stage of lactation. *Livestock Production Science*, 16:335–348. [https://doi.org/10.1016/0301-](https://doi.org/10.1016/0301-6226(87)90003-0)
529 6226(87)90003-0.
- 530 Wood PDP (1967) Algebraic model of the lactation curve in cattle. *Nature*, 216:164–165.
531 <https://doi.org/10.1038/216164a0>.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Os resultados obtidos nesta pesquisa evidenciam que a compreensão das curvas de lactação em vacas mestiças é fundamental para o avanço da pecuária leiteira em condições tropicais. A integração entre aspectos genéticos, ambientais e de manejo mostra-se determinante para o desempenho produtivo, reforçando que a eficiência dos rebanhos não depende apenas da escolha da raça ou do cruzamento, mas também da adequação das práticas de manejo e da capacidade de adaptação dos animais às variações climáticas. A análise da persistência, do pico de produção e da estabilidade das curvas de lactação revelou que vacas multíparas e cruzamentos com maior participação de sangue Holandês tendem a apresentar maior regularidade produtiva, enquanto fatores ambientais, como a estação do ano, exercem impacto direto sobre a forma da curva e a quantidade total de leite produzida.

A utilização de modelos matemáticos demonstrou-se uma ferramenta estratégica, capaz de traduzir o comportamento biológico das vacas em parâmetros de fácil interpretação e aplicabilidade prática. Dentre os modelos avaliados, destaca-se o de Wilmink, que se mostrou mais consistente em diferentes condições de paridade e composição genética, fornecendo informações valiosas para o manejo nutricional e reprodutivo, além de apoiar programas de seleção genética. Assim, os achados desta tese confirmam que a adoção de metodologias de modelagem adequadas, aliada ao conhecimento sobre os efeitos ambientais e genéticos, pode contribuir de maneira significativa para a tomada de decisões na atividade leiteira.

De forma ampla, conclui-se que a pecuária leiteira tropical, baseada em rebanhos mestiços, possui elevado potencial produtivo, desde que apoiada em estratégias integradas que considerem a realidade dos sistemas locais. A valorização da persistência da lactação, o aproveitamento da heterose dos cruzamentos e o uso de modelos matemáticos para previsão e gestão da produção configuram-se como caminhos promissores para aumentar a eficiência, a sustentabilidade e a competitividade do setor.