

**CRESCIMENTO DE BOVINOS ZEBUÍNOS VIA
MODELOS NÃO LINEARES MISTOS E NORMAS DE
REAÇÃO PARA PARÂMETROS DA CURVA DE
CRESCIMENTO**

JOHNNY IGLESIAS MENDES ARAUJO

2022



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA**

**CRESCIMENTO DE BOVINOS ZEBUÍNOS VIA
MODELOS NÃO LINEARES MISTOS E NORMAS DE
REAÇÃO PARA PARÂMETROS DA CURVA DE
CRESCIMENTO**

Autor: Johnny Iglesias Mendes Araujo
Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Mendes Malhado

ITAPETINGA
BAHIA – BRASIL
Agosto de 2022

JOHNNY IGLESIAS MENDES ARAUJO

**CRESCIMENTO DE BOVINOS ZEBUÍNOS VIA
MODELOS NÃO LINEARES MISTOS E NORMAS DE
REAÇÃO PARA PARÂMETROS DA CURVA DE
CRESCIMENTO**

Tese apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de DOUTOR EM ZOOTECNIA, no Programa de Pós-Graduação em Zootecnia da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Mendes Malhado

Coorientadores: Prof. Dr. Paulo Luiz Souza Carneiro
Prof. Dr. Leonardo Siqueira Glória

ITAPETINGA
BAHIA – BRASIL
Agosto de 2022

636.2
A689c

Araujo, Johnny Iglesias Mendes.

Crescimento de bovinos zebuínos via modelos não lineares mistos e normas de reação para parâmetros da curva de crescimento. / Johnny Iglesias Mendes Araujo. – Itapetinga-BA: UESB, 2022.

70f.

Tese apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de DOUTOR EM ZOOTECNIA, no Programa de Pós-Graduação em Zootecnia da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia. Sob a orientação do Prof. D. Sc. Carlos Henrique Mendes Malhado e coorientação do Prof. D. Sc. Paulo Luiz Souza Carneiro e Prof. D. Sc. Leonardo Siqueira Glória.

1. Zebuínos de corte - Curvas de crescimento. 2. Bovinos – Crescimento – Equação não linear mista. 3. Bovinos nelore – Interação genótipo-ambiente – Curvas de crescimento. I. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - Programa de Pós-Graduação de Doutorado em Zootecnia, *Campus* de Itapetinga. II. Malhado, Carlos Henrique Mendes. III. Carneiro, Paulo Luiz Souza. IV. Glória, Leonardo Siqueira. V. Título.

CDD(21): 636.2

Catálogo na Fonte:

Adalice Gustavo da Silva – CRB 535-5ª Região
Bibliotecária – UESB – Campus de Itapetinga-BA

Índice Sistemático para desdobramentos por Assunto:

1. Bovinos - Avaliação genética
2. Bovinocultura de corte - Curvas de crescimento
3. Bovinos – Interação genótipo-ambiente - Crescimento

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA – UESB
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA
Área de Concentração: Produção de Ruminantes

Campus Itapetinga-BA

DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO

Título: “Crescimento de bovinos zebuínos via modelos não lineares mistos e normas de reação para parâmetros da curva de crescimento”.

Autor (a): Johnny Iglesias Mendes Araujo

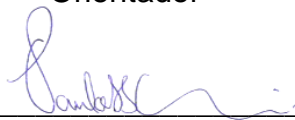
Orientador (a): Prof. Dr. Carlos Henrique Mendes Malhado

Co-orientador (a): Prof. Dr. Paulo Luiz Souza Carneiro
Prof. Dr. Leonardo Siqueira Glória

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM ZOOTECNIA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PRODUÇÃO DE RUMINANTES, pela Banca Examinadora:



Prof. Dr. Carlos Henrique Mendes Malhado – UESB
Orientador



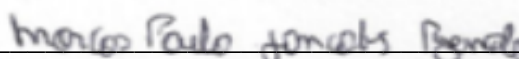
Prof. Dr. Paulo Luiz Souza Carneiro – UESB



Prof. Dr. Diego Pagung Ambrosini – IFAP



Prof^a. Dr^a. Barbara Machado Campos - FAT



Dr. Marcos Paulo Gonçalves Rezende - ANARB

Data de realização: 31 de agosto de 2022.

*“Não andem ansiosos por coisa alguma, mas em tudo, pela oração e súplicas,
e com ação de graças, apresentem seus pedidos a Deus.”*

(Bíblia Sagrada, Filipenses 4:6)

A DEUS, pelo fôlego de vida.

*Aos meus queridos pais **Valmir Correia** e **M^a Santa Araujo**, pelo carinho e amor incondicional, por sempre acreditarem em mim e pelo incentivo.*

*A minha amada esposa **Ana Lucia Mendes** pelo amor, companheirismo e compreensão durante este tempo de dedicação aos meus estudos.*

*A minha princesa **Luiza Mendes** pelo sorriso verdadeiro e as alegrias e distrações nos momentos mais difíceis durante esta jornada acadêmica.*

*Aos meus irmãos **Clebiana Mendes** e **Joniêl Mendes**, pelo afeto, respeito, amor e incentivo.*

*Aos meus sogros **Raimundo Alexandre** e **Roberta Amorim** pelo afeto e confiança em mim depositada.*

A todos os meus familiares, amigos e irmãos em Cristo Jesus que de alguma forma me ajudaram chegar até aqui.

*A minha vizinha **Camila Santos** (in memorian) pelo carinho e amor sempre demonstrado. Saudades!*

*Ao irmão **Júlio Rocha** (in memorian) pelas orações, amizade, afeto, respeito e incentivo. Saudades!*

*Aos pastores in memorian, **Pr. Anacleto Santos**, **Pr. Genésio Rodrigues** e sua esposa **Pr^a. Ducarmo Soares** pelas orações, amizade, carinho e incentivo. Saudades!*

A todos os professores, funcionários e amigos que fazem parte da UESB e UFPI, que em muitas ocasiões tornaram-se os meus amigos mais chegados.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A DEUS, pelas suas infinitas misericórdias que se renovam cada manhã na minha vida.

A Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), pela oportunidade de concretizar mais um dos meus sonhos, me possibilitado desenvolver este trabalho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos.

Aos meus pais (Valmir e M^a Santana), meus irmãos (Clebiana e Joniel), minha esposa (Ana Lucia), minha filha (Luiza) e familiares por todo carinho, companheirismo, amor, apoio e incentivo que me deram durante esta caminhada e sempre.

Ao meu professor orientador Dr. Carlos Henrique Mendes Malhado pela sua disponibilidade, incentivo e amizade. Agradeço pelo conhecimento compartilhado, foi fundamental para meu desenvolvimento científico e profissional que foram essenciais para a concretização dessa pesquisa.

Aos meus professores coorientadores, Dr. Paulo Luiz Souza Carneiro e Dr. Leonardo Siqueira Glória pela amizade e disponibilidade em ajudar, pelos conhecimentos transmitidos e por suas sugestões em todas as etapas dessa pesquisa.

Aos professores membros da banca de defesa, Dr. Marcos Rezende, Dr. Diego Ambrosini e Dra. Barbara Campos, por terem aceitado o nosso convite e pelas suas contribuições, que foram importantes para concretização desta pesquisa.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia da UESB, pelos conhecimentos compartilhados e por estarem contribuindo com a minha formação. As secretárias da Pós de Itapetinga e Jequié, Raquel, Roberta e Renata.

Aos meus amigos do grupo de pesquisa em Genômica Aplicada a Conservação e Melhoramento (GAGOM) da UESB de Jequié, pela amizade, oportunidade de convivência, aprendizado, companheirismo e prontidão.

Aos demais amigos e irmãos em Cristo Jesus de Redenção do Gurguéia-PI, Itapetinga-BA, Jequié-BA e Jaraguá-GO, sempre solidários e que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta pesquisa.

A todos o meu sincero OBRIGADO!!!

BIOGRAFIA

JOHNNY IGLESIAS MENDES ARAUJO, filho de Maria Santana Mendes Araujo e Valmir Araujo Correia, nasceu em Gama, Estado do Distrito Federal - DF, no dia 09 de janeiro de 1987.

Em março de 2010, iniciou o curso de Zootecnia na Universidade Federal do Piauí, Campus Professora Cinobelina Elvas - Bom Jesus-PI, concluindo-o em Julho de 2014. Em janeiro de 2015, iniciou o curso de Especialização em Gestão e Educação Ambiental na Universidade Estadual do Piauí, concluindo-o em abril de 2016.

Em agosto de 2015, iniciou o curso de Pós-Graduação em Zootecnia, em nível de Mestrado, na área de concentração de Produção Animal, na Universidade Federal do Piauí, Campus Professora Cinobelina Elvas - Bom Jesus-PI, realizando estudos na Linha de pesquisa em Melhoramento e Reprodução Animal.

Em março de 2018, iniciou o curso de Pós-Graduação em Zootecnia, em nível de Doutorado, área de concentração Produção de Ruminantes, na Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB) na cidade de Itapetinga - BA, realizando estudos na Linha de pesquisa em Genética e Melhoramento Animal. Em 05 de abril de 2021, submeteu-se a exame geral de qualificação e em 31 de agosto de 2022 a defesa da presente Tese de Doutorado para obtenção do título de DOUTOR EM ZOOTECCIA.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	ix
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xii
I – REFERENCIAL TEÓRICO.....	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Curvas de crescimento.....	3
1.3 Modelos não lineares.....	4
1.4 Modelos não lineares mistos.....	6
1.4.1 Estimação dos parâmetros nos modelos não lineares mistos.....	7
1.4.2 Avaliadores de qualidades de ajuste.....	8
1.5 Interação genótipo-ambiente (IGA).....	10
1.5.1 Gradiente ambiental em estudos da IGA.....	11
1.6 Modelos de normas de reação (MNR).....	13
1.7 Referências.....	15
II – OBJETIVO GERAL.....	22
2.1 Objetivos Específicos.....	22
III – CAPITULO I – CRESCIMENTO DE ZEBUÍNOS DE CORTE UTILIZANDO MODELOS NÃO LINEARES MISTOS.....	23
Resumo.....	23
Abstract.....	24
Introdução.....	25

Material e Métodos.....	26
Resultados.....	28
Discussão.....	36
Conclusão.....	42
Referências Bibliograficas.....	43
IV – CAPÍTULO II – INTERAÇÃO GENÓTIPO-AMBIENTE PARA PARÂMETROS DA CURVA DE CRESCIMENTO DE BOVINOS NELORE VIA MODELOS DE NORMAS DE REAÇÃO.....	48
Resumo.....	48
Abstract.....	49
Introdução.....	50
Material e Métodos.....	51
Resultados.....	55
Discussão.....	60
Conclusão.....	63
Referências Bibliograficas.....	64
V – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	69

LISTA DE FIGURAS

Página

Capítulo I

- Figura 1. Curvas de crescimento utilizando o modelo não linear misto de Brody para bovinos zebuínos criados a pasto no Brasil. *A*: machos e *B*: fêmeas..... 33
- Figura 2. Taxa de crescimento absoluta (TCA), considerando o modelo linear misto de Brody para bovinos zebuínos criados a pasto no Brasil. *A*: machos e *B*: fêmeas..... 34
- Figura 3. *Biplot* dos dois primeiros componentes principais (CP) para bovinos zebuínos criados a pasto no Brasil. *M*: machos; *F*: fêmeas; *A*: peso assintótico; *K*: taxa de maturidade; TCA: taxa de crescimento absoluta em 205, 365, 550 e 730 dias de idade; TMA: taxa de maturidade absoluta em 205, 365, 550 e 730 dias de idade..... 35
- Figura 4. *Heatmap* utilizando os parâmetros das curvas de crescimento dos bovinos de zebuínos (Nelore, Nelore Mocho, Tabapuã e Guzerá) criados a pasto no Brasil. *M*: machos; *F*: fêmeas; *A*: peso assintótico; *K*: taxa de maturidade; TCA: taxa de crescimento absoluta em 205, 365, 550 e 730 dias de idade; TMA: taxa de maturidade absoluta em 205, 365, 550 e 730 dias de idade..... 36

Capítulo II

- Figura 1. Herdabilidade dos parâmetros *A* (peso assintótico) e *K* (taxa de maturidade) de bovinos da raça Nelore criados a pasto no Brasil, estimada pelos modelos MA e MHNRHO_{1P} ao longo do gradiente ambiental..... 56
- Figura 2. Correlações de Spearman entre os valores genéticos preditos dos reprodutores para os parâmetros *A* (peso assintótico) e *K* (taxa de maturidade) obtidas pelo MHNRHO_{1P} nos diferentes níveis ambientais (baixo, médio, alto), em bovinos Nelore criados a pasto no Brasil..... 57
- Figura 3. Normas de reação ambientais para os parâmetros *A* (peso assintótico) e *K* (taxa de maturidade) obtidas para os 10 reprodutores Nelore com maior número de progênes no Brasil..... 58
- Figura 4. Porcentagem de reprodutores Nelore com genótipos extremamente robustos, robustos, plásticos e extremamente plásticos para os parâmetros *A* (peso assintótico) e *K* (taxa de maturidade)..... 59

LISTA DE TABELAS

	Página
Capítulo I	
Tabela 1. Número de animais utilizados.....	27
Tabela 2. Médias e intervalos de confiança (95%) para os parâmetros estimados do modelo não linear misto de Brody para machos zebuínos criados a pasto no Brasil.....	30
Tabela 3. Médias e intervalos de confiança (95%) para os parâmetros estimados do modelo não linear misto de Brody para fêmeas zebuínas criadas a pasto no Brasil.....	31
Capítulo II	
Tabela 1. Estatísticas descritivas do peso assintótico (A) e taxa de maturidade (K) de bovinos Nelore criado a pasto no Brasil.....	53
Tabela 2. Número médio de progênies e valor genético médio nos diferentes ambientes e genótipos.....	60

RESUMO

ARAÚJO, Johnny Iglesias Mendes. **Crescimento de bovinos zebuínos via modelos não lineares mistos e normas de reação para parâmetros da curva de crescimento.** Itapetinga, BA: UESB, 2022. 70p. Tese. (Doutorado em Zootecnia, Área de Concentração em Produção de Ruminantes).*

O uso de modelos não lineares mistos vêm se tornando uma alternativa eficiente e precisa para estudos das curvas de crescimento em varias espécies/raças de animais, devido sua maior flexibilidade para lidar com dados longitudinais, permitindo analisar a variabilidade entre e intra indivíduos. Além disso, a bovinocultura no Brasil é heterogênea, devido as diversidades ambientais, e o uso de reprodutores inadequados podem influenciar negativamente no progresso genético das populações. Isso ressalta a importancia de considerar ou não nos modelos genéticos, a interação genótipo-ambiente (IGA). Nesse aspecto, objetivou-se: 1) utilizar modelos não lineares mistos para modelar as curvas de crescimento de bovinos zebuínos criados a pasto no Brasil; 2) avaliar a diversidade entre as raças utilizando análises multivariadas considerando os parametros das curvas de crescimento; e 3) verificar a existência de efeito da IGA sobre os parâmetros da curva de crescimento de bovinos apenas da raça Nelore. No primeiro estudo, foram utilizados modelos não lineares mistos de Richards, Brody, Gompertz, Logístico e Von Bertalanffy para modelar e comparar as curvas de crescimento de bovinos zebuínos. Adicionalmente, avaliou-se a diversidade entre as raças utilizando análises multivariadas (componentes principais (CP) e agrupamento) considerando o peso assintótico (A), taxa de maturidade (K), taxa de crescimento absoluta (TCA) e taxa maturidade absoluta (TMA) nas idades padronizadas aos 205, 365, 550 e 730 dias. Dados de pesos corporais de 311834 animais das raças Guzerá, Nelore, Tabapuã e Nelore Mocho, provenientes da Associação Brasileira de Criadores de Zebu foram utilizados. O modelo Brody com os efeitos fixos de raça-sexo e aleatório de animal foi o que apresentou melhor ajuste aos dados das quatro raças. Os machos Guzerá e Tabapuã foram mais precoces que os machos Nelore Mocho e Nelore que apresentaram maiores A e TCA. As fêmeas Tabapuã apresentaram maior precocidade, seguidas pelas Guzerá, sendo mais leves na idade adulta, comparadas as Nelore e Nelore Mocho. Independente do sexo, as maiores TMA foram para as raças Tabapuã e Guzerá, desde a desmama até aos dois anos de idade. O CP1 explicou 93,05% da variação total e representa os animais com maior precocidade e menos pesados à maturidade (machos Guzerá e Tabapuã e todas as fêmeas). O CP2 explicou 6,71% da variação e corresponde aos animais tardios, mais pesados à maturidade (machos Nelore Mocho e Nelore). Dois grupos foram formados pela analises de agrupamento: o primeiro com os machos Nelore Mocho e Nelore, que apresentaram maiores valores para A , TCA_205, TCA_365, TCA_550 e TCA_730 sendo considerado animais com tamanho corporal grande a idade adulta; e o segundo incluindo os machos Guzerá, Tabapuã e as fêmeas, que foram considerados precoces. Um subgrupo foi formado pelos machos Guzerá e Tabapuã, com valores intermediários para todos os parâmetros. Essas informações serão úteis para auxiliar melhoristas e produtores em estratégias de manejo alimentar e definição de raça a ser utilizado, em regime alimentar a pasto. No segundo estudo, avaliou-se a IGA sobre os parametros A e K da curva de crescimento de bovinos Nelore,

utilizando modelos hierárquicos Bayesianos de normas de reação. Informações de 145252 animais para o parâmetro A e 144761 para K foram utilizadas via modelo animal padrão (MA) e modelos hierárquicos de normas de reação com variâncias residuais homogêneas e heterogêneas com um e dois passos (MHNRHO_{1P}, MHNRHO_{2P}, MHNRE_{1P} e MHNRE_{2P}, respectivamente). O modelo MHNRHO_{1P} para os dois parâmetros apresentou o melhor ajuste. As estimativas das herdabilidades no MA para A e K foram 0,45 e 0,47, respectivamente. No MHNRHO_{1P} as herdabilidades aumentaram à medida que o ambiente melhorou, variando de 0,24 a 0,82 para A e de 0,34 a 0,87 para K ao longo do gradiente ambiental. As correlações entre o intercepto e inclinação das normas de reação para A e K foram de alta magnitude (0,95 e 0,88, respectivamente), indicando que animais com alto valor genético para os parâmetros tendem a responder positivamente aos melhores ambientes. A maioria dos reprodutores utilizados para ambos os parâmetros são robustos à variação ambiental, entretanto, quando se considera aqueles com maiores progênies, verificou-se IGA, com efeito de escala para A e complexa para K , evidenciando a importância de se considerar a inclusão da IGA nas avaliações genéticas nos rebanhos de bovinos Nelore do Brasil.

Palavras-chave: análise multivariada, avaliação genética, bovinocultura de corte, modelo de Brody misto, gradiente ambiental

ABSTRACT

ARAUJO, Johnny Iglesias Mendes. **Growth of zebu cattle via mixed nonlinear models and reaction norms for growth curve parameters**. Itapetinga, BA: UESB, 2022. 70p. Thesis. (Doctorate in Animal Science, Area of Concentration in Ruminant Production)*.

The use of mixed nonlinear models has become an efficient and accurate alternative for studies of growth curves in several species/breeds of animals, due to their greater flexibility to deal with longitudinal data, allowing the analysis of variability between and within individuals. In addition, cattle farming in Brazil is heterogeneous, due to environmental diversities, and the use of inappropriate breeders can negatively influence the genetic progress of populations. This highlights the importance of considering or not considering the genotype-environment interaction (GEI) in genetic models. In this aspect, the objective was: 1) to use mixed nonlinear models to model the growth curves of zebu cattle raised on pasture in Brazil; 2) to evaluate the diversity among the races using multivariate analyzes considering the parameters of the growth curves; and 3) to verify the existence of an effect of the GEI on the parameters of the growth curve of bovines of the Nellore breed only. In the first study, mixed nonlinear models of Richards, Brody, Gompertz, Logistic and Von Bertalanffy were used to model and compare the growth curves of zebu cattle. Additionally, diversity among breeds was evaluated using multivariate analyzes (principal components (PC) and clustering) considering asymptotic weight (A), maturity rate (K), absolute growth rate (AGR) and absolute maturity rate (AMR) at standardized ages of 205, 365, 550 and 730 days. Body weight data of 311,834 animals of the Guzerat, Nellore, Tabapuã and Nellore Mocho breeds, from the Brazilian Association of Zebu Breeders were used. The Brody model with the fixed effects of breed-sex and random animal was the one that presented the best fit to the data of the four breeds. The males Guzerat and Tabapuã were more precocious than the Nellore Mocho and Nellore males, which showed higher A and AGR. Tabapuã females showed greater precocity, followed by Guzerat, being lighter in adulthood, compared to Nellore and Nellore Mocho. Regardless of sex, the highest AMR were for the Tabapuã and Guzerat breeds, since from weaning to two years of age. PC1 explained 93.05% of the total variation and represents the animals with greater precocity and less weight at maturity (Guzerat and Tabapuã males and all females). PC2 explained 6.71% of the variation and corresponds to late animals, heavier at maturity (Nellore Mocho and Nellore males). Two groups were formed by cluster analysis: the first with Nellore Mocho and Nellore males, which presented higher values for A , AGR_205, AGR_365, AGR_550 and AGR_730, being considered animals with large body size at adulthood; and the second including Guzerat, Tabapuã males and females, which were considered precocious. A subgroup was formed by males Guzerat and Tabapuã, with intermediate values for all parameters. This information will be useful to help breeders and producers in food management strategies and definition of the breed to be used, in a pasture feeding regime. In the second study, the GEI was evaluated on the parameters A and K of the growth curve of Nellore cattle, using hierarchical Bayesian models of reaction norm. Information from 145,252 animals for parameter A and 144,761 for K were used via standard animal model (AM) and

hierarchical reaction norm models with homogeneous and heterogeneous residual variances with one and two steps (MHNRRHO_{1P}, MHNRRHO_{2P}, MHNRRHE_{1P} and MHNRRHE_{2P}, respectively) were used. The MHNRRHO_{1P} model for both parameters showed the best fit. The heritability estimates in the AM for *A* and *K* were 0.45 and 0.47, respectively. In MHNRRHO_{1P}, the heritabilities increased as the environment improved, ranging from 0.24 to 0.82 for *A* and from 0.34 to 0.87 for *K* along the environmental gradient. The correlations between the intercept and slope of the reaction norms for *A* and *K* were of high magnitude (0.95 and 0.88, respectively), indicating that animals with high genetic value for the parameters tend to respond positively to the best environments. Most of the sires used for both parameters are robust to environmental variation, however, when considering the sires with the highest number of progenies, GEI was found, with a scaling effect for *A* and complex for *K*, evidencing the importance of considering the inclusion of IGA in genetic evaluations in herds of Nellore cattle in Brazil.

Key-words: multivariate analysis, genetic evaluation, beef cattle, mixed Brody model, environmental gradient

I – REFERENCIAL TEÓRICO

1.1 Introdução

A bovinocultura de corte é um dos maiores setores do agronegócio brasileiro e vem se destacando mundialmente. O Brasil possui o maior rebanho bovino comercial, com 218,2 milhões de cabeças e é um dos maiores exportadores de carne bovina do mundo (IBGE, 2020). A produção de bovinos de corte no país é caracterizada pela criação realizada a pasto e uso dos rebanhos provenientes das raças zebuínas e seus cruzamentos, devido sua maior rusticidade e boa capacidade de produção em diversos climas brasileiros.

A intensificação do sistema de produção de bovino de corte no Brasil envolve diferentes estratégias para aumentar a produção e qualidade da carne. Uma comumente utilizada é a avaliação de características de crescimento de fácil mensuração, como o peso corporal em determinadas idades e ganhos diários. Essas características têm sido utilizadas como critérios e objetivos de seleção nos programas de melhoramento genético das raças zebuínas. Além disso, usadas na predição de curvas de crescimento que relacionam o peso corporal do animal à idade por meio de modelos não lineares para explicar os padrões de crescimento, usando parâmetros que podem ser interpretados biologicamente.

Os modelos não lineares mais utilizados para descrever curvas de crescimento de bovinos zebuínos no Brasil são o de Brody, Von Bertalanffy, Richards, Gompertz e Logístico. No entanto, essa estrutura de dados repetidos ao longo do tempo, viola algumas pressuposições como independência entre observações e variância constante. Uma alternativa eficiente para lidar com esses problemas é uso dos modelos não lineares mistos, pois na construção do modelo podem ser incluídos tanto efeitos fixos como aleatórios. Adicionalmente, eles são eficazes para dados repetidos no tempo, conhecidos também como longitudinais, e permitem ajustar estruturas de covariâncias flexíveis, capazes de lidar com dados desbalanceados ou incompletos (Lindstrom & Bates, 1990) e ajustar curvas individuais para cada indivíduo, facilitando com isso, a

seleção dos melhores de uma população.

Os parâmetros da curva de crescimento têm sido usados como subsídios para prever outros parâmetros de interesse econômico, como a taxa de crescimento absoluta, grau de maturidade, idade e peso no ponto inflexão, dentre outros. Além disso, eles podem ser indicados como critérios de seleção para programas de melhoramento genético de bovinos de corte, com intuito de promover mudanças na forma das curvas de crescimento dos rebanhos, buscando animais precoces sem aumento do peso corporal a maturidade. Existem trabalhos que estimaram parâmetros e valores genéticos para os parâmetros da curva de crescimento em diferentes espécies/raças de animais (Forni et al., 2009; Ghavi Hossein-Zadeh, 2017; Lupi et al., 2016; Malhado et al., 2008), entretanto, não avaliaram a interação genótipo-ambiente (IGA) na estimação desses componentes de (co)variâncias.

É sabido que os parâmetros da curva de crescimento são influenciados por fatores genéticos e ambientais e, provavelmente, por sua interação. Dessa forma, avaliar a IGA nesses parâmetros torna-se importante, visto que negligenciar a IGA pode afetar os programas de melhoramento (Ambrosini et al., 2016; Rezende et al., 2020; Rodrigues et al., 2021). Isso é possível porque os desempenhos dos animais e de sua progênie podem sofrer mudanças diferenciadas de acordo com as condições ambientais em que são criados.

A existência ou não da IGA tem sido avaliada por meio dos modelos de normas de reação (MNR) em diferentes espécies de interesse econômico. Esses modelos são adequados para avaliar a IGA porque descreve características que mudam gradualmente e continuamente em um gradiente ambiental (Ambrosini et al., 2016), ou seja, relacionam linearmente, o mérito genético dos animais às mudanças no gradiente ambiental. Adicionalmente, eles permitem estimar um valor genético específico para um determinado gradiente ambiental, de modo que, cada animal candidato à seleção terá um valor genético predito para cada ambiente de produção.

A diversidade de climas e manejo no Brasil resulta em grande variação na escolha dos rebanhos (raça) e sistemas de produção. Dentre as raças zebuínas, a raça Nelore é a mais difundida em todo território nacional e utilizada em diferentes ambientes de produção, com maior efetivo dos rebanhos brasileiros. Assim, a avaliação da IGA no presente estudo concentra-se principalmente em registros de dados dessa raça, tendo em vista a sua importância no nosso país.

Não há estudos anteriores que comparam as curvas de crescimentos das principais raças zebuínas criados no Brasil, utilizando modelos não lineares mistos, bem como os parâmetros das curvas de crescimento desses bovinos como fenótipos em avaliação de IGA, empregando MNR. Essas abordagens justificam a importância do presente estudo na propagação dessas metodologias capazes de identificar com precisão indivíduos mais precoces e geneticamente superiores em diferentes ambientes de produção.

1.2 Curvas de crescimento

O crescimento dos animais é definido como o aumento no tamanho do corpo por unidade de tempo (idade). É uma das características mais importante para avaliar a produtividade dos animais produtores de carne, como bovinos de corte, caprinos, suínos, ovinos, etc (Das et al., 2016), pois tem uma forte relação com a quantidade e qualidade da carne produzida em diferentes sistemas de produção.

O processo de crescimento dos animais é caracterizado por ser um fenômeno de natureza complexa, influenciado por diversos fatores como alimentação, condições climáticas, saúde e aspectos genéticos (Lopes et al., 2016). Esses fatores justificam a importância do conhecimento do padrão de crescimento dos bovinos zebuínas, pois permitem compreender as variações no desempenho de cada animal nos diferentes sistemas de produção. É importante também para adequação de programas de melhoramento genético, bem como de manejo nutricional, ambiência, dentre outros para viabilizar o sucesso da atividade.

A relação entre o peso corporal e idade dos animais pode ser modelada por curvas de crescimento. Essa alternativa está entre as mais aplicadas para se avaliar o crescimento dos bovinos de corte. É utilizada com o intuito de acompanhar o desenvolvimento animal do nascimento ao abate; avaliar parâmetros importantes do ponto de vista biológico, como o tamanho, peso corporal e maturidade; determinar técnicas adequadas de manejo nutricional; e identificar a melhor idade de abate, dentre outras aplicações (Freitas, 2005; Malhado et al., 2009).

Em geral, à medida que o animal cresce, sua taxa de crescimento muda, refletindo na curvatura da curva de crescimento, até atingir o ponto mais alto da taxa de crescimento (Ghiasi et al., 2018). Após esse ponto de inflexão, os ganhos de peso

diminuem gradualmente e a taxa de crescimento se torna cada vez mais lenta. Essa tendência continua até que o crescimento se estabilize e atinja seu valor máximo que coincide com a assíntota horizontal (Lupi et al., 2016).

Estudos de curva de crescimento dos bovinos zebuínos têm sido amplamente utilizados para desenvolver práticas de gerenciamento, com objetivos de ajudar a aumentar a produtividade dos rebanhos de corte. Outra vantagem desses estudos é o fornecimento de informações relevantes para programas de melhoramento genético para definição de critérios de seleção relacionado à precocidade e ganho de peso dos animais em idades específicas.

1.3 Modelos não lineares

Modelagem matemática tem sido empregada, via modelos não lineares nos estudos do crescimento de bovinos de corte, com o uso de registros do peso corporal em diferentes idades. Esses modelos sintetizam informações de dados de peso corporal e idade, por exemplo, em parâmetros que podem ser interpretados biologicamente (Freitas, 2005; Ghavi Hossein-Zadeh & Ghorbani, 2018), facilitando, assim, o entendimento do processo de crescimento, manejo nutricional e produção/reprodução dos animais.

A estrutura geral dos modelos não lineares pode ser representada da seguinte forma:

$$y_i = f(X; \theta) + \varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, n,$$

em que y_i é a resposta do i -ésimo indivíduo, f é uma função não linear do vetor preditor X e do vetor de parâmetros θ e ε_i são os erros associados ao modelo que geralmente, são independentes e normalmente distribuídos com média zero e variância σ^2 .

Diversos são os modelos não lineares disponíveis, entretanto, os mais utilizados para descrever o crescimento de bovinos de corte são o de Brody (Brody, 1945); Von Bertalanffy (Von Bertalanffy, 1957); Richards (Richards, 1959); Logística (Nelder, 1961) e Gompertz (Laird, 1965). Tradicionalmente, têm sido utilizados na avaliação da curva de crescimento em bovinos zebuínos criados no Brasil (Alves et al., 2020; Arruda

et al., 2018; Carneiro et al., 2014; Lopes et al., 2016; Malhado et al., 2009; Santoro et al., 2005; Souza et al., 2010).

Esses modelos são flexíveis e podem ser usados para classificação dos animais de acordo com o peso assintótico e a taxa de crescimento, permitindo comparações entre sexos, espécies, raças, dietas, entre outros (Freitas, 2005; Ibiapina Neto et al., 2020; Malhado et al., 2017). Apresentam simplicidade e facilidade na interpretação dos parâmetros do que nos modelos lineares, resultando em uma descrição mais parcimoniosa dos dados. Em geral, um modelo é classificado como não linear se, pelo menos uma das derivadas parciais da função não linear em relação aos parâmetros depende de pelo menos um dos parâmetros do modelo, diferenciando-os dos modelos lineares.

De acordo Freitas (2005) e Tedeschi et al. (2000) esses modelos apresentam os seguintes parâmetros: peso assintótico, que representa o peso adulto à maturidade; taxa de maturidade, que é um indicador de velocidade de crescimento, de modo que, quanto maior for o valor desse parâmetro, mais precoce é o animal e vice-versa; parâmetro de inflexão refere-se ao ponto em que o animal passa de uma fase de crescimento acelerado para uma fase de crescimento inibitório; constante de integração, que não apresenta uma interpretação prática ou biológica.

O peso assintótico e a taxa de maturidade são considerados os parâmetros mais importantes do ponto de vista zootécnico (Araujo Neto et al., 2020; Coutinho et al., 2015), devido apresentarem interpretação biológica. São utilizados para identificar animais com maior velocidade de crescimento e maior ganho de peso em idade específica, sem alterar o peso corporal adulto. Além disso, são hereditários em diferentes espécies (Coyne et al., 2015; Forni et al., 2009; Ghavi Hossein-Zadeh, 2017; Lupi et al., 2016; Santoro et al., 2005) e podem ser usados no desenvolvimento de estratégias de seleção genética para possível alteração na forma da curva de crescimento dos animais zebuínos.

A análise e a interpretação desses parâmetros devem ser consideradas cuidadosamente, visto que a identificação precisa de modelos não lineares pode ajudar a desenvolver estratégias para garantir que a produção animal seja eficiente e econômica (Afrouziyeh et al., 2021). Dessa forma, é possível fornecer subsídios importantes para geneticistas, zootecnistas, melhoristas e indústrias pecuárias, na busca de animais com maior precocidade.

1.4 Modelos não lineares mistos

O uso de modelos não lineares mistos vêm se tornando uma alternativa eficiente e precisa para estudos das curvas de crescimento em varias espécies/raças de animais. Esses modelos são considerados uma extensão do modelo linear misto (Pinheiro & Bates, 2000), que possibilita no processo de modelagem das curvas de crescimento dos animais a inclusão de efeitos fixos, associados à população completa, e aleatórios, que atuam em cada nível de amostragem.

O padrão de crescimento animal está associado a medidas longitudinais. Assim, a aplicação de modelos não lineares mistos para medidas longitudinais de crescimento permitem quantificar a variabilidade entre os animais e em cada animal (Galeano-Vasco et al., 2014). Tais modelos são importantes por causa de sua estrutura de covariância flexível e capacidade de lidar com dados desbalanceados ou incompletos (Das et al., 2016; Lindstrom & Bates, 1990), fato muito comum. Além disso, são utilizados quando se tem o interesse em estimar o comportamento médio de um indivíduo em uma população e a variabilidade dentro e entre eles (Pinheiro & Bates, 2000). Essas vantagens tornam esses modelos atrativos e práticos, pois fornecem estimativas mais precisa dos parâmetros das curvas de crescimento dos animais, em comparação aos modelos tradicionais de efeitos fixos, devidos ignorarem esses pressupostos estatísticos.

A estrutura geral desses modelos de acordo Lindstrom & Bates (1990), pode ser vista como um modelo hierárquico e descrito como:

$$y_{ij} = f(\phi_{ij}, v_{ij}) + \varepsilon_{ij}, \quad i = 1, \dots, M \text{ e } j = 1, 2, \dots, n_i,$$

em que y_{ij} e a variável resposta para o i -ésimo grupo e a j -ésima observação, f é uma função diferenciável de um vetor de parâmetros específico ϕ_{ij} , v_{ij} é o vetor de covariáveis, ε_{ij} é erro aleatório entre os grupos, os quais são assumidos como independentes e normalmente distribuídos com média zero e variância σ^2 , M é o número de grupos e n_i o número de observações no i -ésimo grupo.

O vetor de parâmetros pode variar de indivíduo para indivíduo, isso é incluído no modelo e definido como o vetor ϕ_{ij} :

$$\phi_{ij} = A_{ij}\beta + B_{ij}b_i, \quad b_i \sim N(0, D),$$

em que β é um vetor p-dimensional de efeitos fixos, b_i é um vetor q-dimensional de efeitos aleatórios associado ao i-ésimo grupo (não varia com j) com matriz de variância e (co)variância D. As matrizes A_i e B_i tem dimensões que dependem do grupo e dos valores das covariáveis na j-ésima observação e às vezes são simplesmente matrizes de incidência (Pinheiro & Bates, 2000) para efeitos fixos e aleatórios, respectivamente.

A aplicação prática desses modelos tem sido comum em estudos de crescimento de animais de interesse econômico, embora existam apenas dois estudos com o crescimento de zebuínos das raças Guzerá e Nelore (Alves et al., 2020; Giolo et al., 2009, respectivamente). Existem estudos com outras espécies, como em búfalos leiteiros (Araujo Neto et al., 2020), ovinos Moghani (Ghavi Hossein-Zadeh, 2017), cabras (Kheirabadi & Rashidi, 2019; Regadas Filho et al., 2014), codornas (Karaman et al., 2013; Santos et al., 2018), galinhas (Galeano-Vasco et al., 2014; Ibiapina Neto et al., 2020), suínos (Strathe et al., 2010; Das et al., 2017), coelhos da Nova Zelândia (Sousa et al., 2021) e cavalos (Ghavi Hossein-Zadeh & Ghorbani, 2018), dentre outros. A maioria desses pesquisadores, concluíram que o desempenho dos modelos não lineares mistos foi melhor do que os modelos que apresentam somente efeitos fixos.

1.4.1 Estimação dos parâmetros nos modelos não lineares mistos

Diversos são os métodos que foram propostos para estimar os parâmetros dos modelos não lineares mistos (Pinheiro & Bates, 2000). Contudo, dentre os mais usados se destaca o método de máxima verossimilhança ou máxima verossimilhança restrita (Dias, 2020).

Os efeitos aleatórios são quantidades não observadas, assim, a estimativa da máxima verossimilhança dos modelos mistos é baseada na função marginal da variável resposta y (Pinheiro & Bates, 2000). Assim, utiliza-se o método de máxima verossimilhança marginal para estimar os parâmetros do modelo, calculado com a seguinte função:

$$p(y|\beta, D, \sigma^2) = \int p(y|b, \beta, D, \sigma^2)p(b)db,$$

em que $p(y|\beta, D, \sigma^2)$ é a densidade marginal da variável resposta y , $p(y|b, \beta, D, \sigma^2)$ é a densidade condicional de y dado b e $p(b)$ é a distribuição marginal dos efeitos aleatórios b . Dessa forma, a função de verossimilhança pode ser descrita como:

$$L(\beta, D, \sigma^2|y) = \int p(y|b, \beta, D, \sigma^2)p(b)db$$

A integral dessa expressão não possui uma forma fechada quando o modelo é não linear em b , no entanto diferentes aproximações têm sido propostas para sua estimação (Pinheiro & Bates, 1995). A matriz D pode ser escrita como $\sigma^{-2}\Delta^T\Delta$, em que Δ é o fator de precisão, o qual é expresso como uma função de um vetor de parâmetros irrestritos.

Lindstrom & Bates (1990) descreveram um algoritmo de estimação que alterna entre dois passos. O primeiro utiliza os mínimos quadrados ponderados, sendo que a estimativa atual de Δ é mantida fixa e as modas condicionais dos efeitos aleatórios b_i e as estimativas dos efeitos fixos β são obtidas por esse método. Já o outro, faz uma aproximação para o modelo linear até que atinja a convergência, de modo que, a estimativa de Δ é atualizada baseado na expansão de Taylor de primeira ordem da função $f(\phi_{ij}, v_{ij})$ em torno das estimativas atuais dos efeitos fixos e das modas condicionais dos efeitos aleatórios. Ressalta-se que esse é o procedimento que está implementado na função “*nlme*” do software R.

1.4.2 Avaliadores de qualidades de ajuste

Para descrever as curvas de crescimento dos animais, diferentes modelos não lineares de efeitos fixos e mistos estão disponíveis na literatura. De modo que, há uma busca pelos modelos que se ajuste melhor aos diferentes conjuntos de dados, devido aos modelos apresentarem diferenças entre si no que se refere aos ajustes estatísticos e biológicos. Para definição desse melhor ajuste são utilizados avaliadores de qualidade de ajuste (critérios), em que indicam estatisticamente qual o melhor modelo a utilizar.

Na literatura, existem diferentes avaliadores de qualidade de ajuste e de comparação, que são utilizados para seleção do melhor modelo. Dentre os quais, os mais utilizados em estudos de curvas de crescimento de bovinos de corte são o erro quadrático médio (EQM), porcentagem de convergência (PC), desvio médio absoluto

dos resíduos (DMA), coeficiente de determinação (R^2), critério de informação de Akaike (AIC), critério de informação bayesiano (BIC), dentre outros. Os critérios de seleção AIC e BIC em conjunto com o teste da razão de verossimilhança e intervalos de confiança são os mais utilizados para comparar os modelos não lineares mistos. No entanto, restringimos destacar apenas o AIC e AICc (informação de Akaike corrigido (Sugiura, 1978)), sendo esse último o que foi utilizado no presente estudo.

O critério de informação de Akaike proposto por Akaike (1974) é calculado da seguinte forma:

$$AIC = -2 \log L(\hat{\theta}) + 2 (p),$$

em que $L(\hat{\theta})$ é a função de verossimilhança do modelo e p é o número de parâmetros do modelo.

Segundo Burnham & Anderson (2004), esse critério permite utilizar o princípio da parcimônia na escolha do melhor modelo, ou seja, nem sempre o modelo mais parametrizado é melhor. Menores valores para esse critério indicam que melhor é o ajuste do modelo.

Todavia, o AIC não é muito eficiente quando o número de parâmetros (p) é elevado em relação ao tamanho amostral (n). Dessa forma, Sugiura (1978) propôs a seguinte correção para o AIC, conhecida como critério de informação de Akaike corrigido (AICc) descrito por:

$$AICc = -2 \log L(\hat{\theta}) + 2 (p) + 2 \frac{p(p+1)}{n-p-1},$$

em que n representa o número de observações, $\log L(\hat{\theta})$ é o logaritmo da verossimilhança (MV ou MVR) e p representa o número total de parâmetros de efeito fixo e aleatório estimado no modelo.

Esses critérios possuem como vantagem a possibilidade de realizar comparações de múltiplas hipóteses e não apenas rejeição e não-rejeição de uma hipótese nula (Glória, 2014). No entanto, Yamanaka (2018) sugeriu que, ao selecionar o melhor modelo para um determinado dado amostral deve-se levar em conta aspectos como o objetivo da pesquisa, seu design amostral, conhecimento sobre os principais preditores e importantes considerações sobre o assunto. Além disso, a experiência do pesquisador o

qual deve compreender as estruturas, processos biológicos e hipóteses científicas representadas pelos modelos disponíveis.

1.5 Interação genótipo-ambiente (IGA)

Na maioria das espécies/raças de interesse zootécnico as características de importância econômica, como o crescimento dos animais, podem apresentar diferenças produtivas as quais são atribuídas à influência dos efeitos genéticos, ambientais e sua interação. Essa interação é conhecida como IGA e tem sido caracterizada como a resposta diferenciada dos genótipos às variações das condições ambientais, que pode ocasionar alteração na classificação dos genótipos nos diferentes ambientes (Falconer & Mackay, 1996).

A IGA ocorre quando os ambientes em que vivem os animais interferem na sua capacidade de expressar seu potencial genético. Por exemplo, reprodutores em que suas progênes apresentam desempenho produtivo diferenciado em uma região, ou em um determinado sistema de produção, podem não manter sua superioridade em ambientes distintos. Podendo inclusive ocorrer alteração de classificação de reprodutores em diferentes ambientes, sendo esse tipo de interação a mais grave.

Os genes que controlam as características em determinado ambiente podem ser diferentes daqueles que controlam em outro, podendo ser interpretadas como características distintas (Falconer, 1987). Nesse contexto, Lush (1945) sugeriu que os animais devem ser mantidos e avaliados no ambiente no qual suas progênes são criadas, de forma que os genes desejados possam ter a oportunidade de expressar seus efeitos para fins de seleção. Na prática isso é impossível, principalmente para bovinos, o que reforça a importância de métodos usando modelos de normas de reação que predizem os valores genéticos para diferentes ambientes de produção.

De acordo Pani (1971), a IGA pode ser classificada em quatro maneiras: primeiro, mesmo em ambientes diferentes, os genótipos se comportam de maneira similar e não há interação; segundo, observa-se uma pequena inversão na classificação dos genótipos, existindo interação, mas não significativa; terceiro, não existe inversão na classificação do genótipos, mesmo apresentando grandes diferenças nos diferentes ambientes, sendo a interação significativa; e, quarto, há inversão na ordem de classificação dos genótipos nos ambientes diferentes e a interação é significativa. Além

disso, segundo Cruz et al. (2012) a IGA pode ser classificada como simples ou complexa. A simples é caracterizada pela diferença de variabilidade dos genótipos entre os ambientes e a complexa indica a superioridade do genótipo em relação à variação ambiental, ou seja, genótipos superiores em um ambiente, mas não em outro. Calus (2006) relataram que a IGA resulta em três possíveis efeitos: a) heterogeneidade de variâncias genéticas entre ambientes (também conhecido como efeito de escala), b) reclassificação (reranking) dos animais entre ambientes baseado em valores genéticos estimados e c) heterogeneidade de correlações entre duas ou mais características entre ambientes.

Quando a IGA existe e não é considerada na modelagem, pode inflacionar a parte residual no modelo estatístico, o que causar mudanças de magnitude relativa e absoluta das variâncias (genética, residual e fenotípica), consequentemente, em redução das estimativas dos parâmetros genéticos das características. Além disso, os valores genéticos podem ser viesados, reduzindo assim a resposta à seleção (Streit et al., 2012). Para tanto, na presença da IGA é recomendado que a mensuração do valor genético do indivíduo, quando viável, deve ser realizada em ambiente semelhante ao de produção, conferindo maior acurácia ao programa de melhoramento.

No Brasil, a IGA tem sido amplamente estudada em características de crescimento e reprodutivas de diferentes raças de bovinos de corte (Ambrosini et al., 2016; Santos et al., 2019; Santos et al., 2020; Silva et al., 2019). No entanto, não existem estudos que abordaram nas avaliações genéticas os parâmetros da curva de crescimento de bovinos de corte. Esse fato destaca a importância do presente estudo que visa avaliar a influência da IGA sobre o peso assintótico (A) e taxa de maturidade (K) de bovinos zebuínos. Com essas informações é possível de se caracterizar rebanhos com características de sensibilidade ambiental, identificando animais superiores precocemente com menor peso corporal a maturidade e ajustados ao ambiente no qual serão explorados ou criados.

Portanto, os programas de melhoramento genético de bovinos de corte para melhorar o desempenho dos animais em diferentes ambientes, no que se refere à precocidade e ganhos de peso corporal em idades específicas, não devem ignorar a possibilidade do efeito da IGA sobre os parâmetros da curva de crescimento.

1.5.1 Gradiente ambiental em estudos da IGA

A maior dificuldade para considerar a presença da IGA nas avaliações genéticas pode estar na caracterização dos ambientes de produção (Santos et al., 2019). Isso devido sua formação depender tanto de informações de variáveis conhecidas, como das desconhecidas e inexistentes nos bancos de dados (Mattar et al., 2008).

Um determinado ambiente pode ser definido como um conjunto de elementos que exerce alguma influência sobre a expressão dos genótipos dos animais, além do próprio local físico em que são criados. No entanto, o ambiente não pode modificar a constituição genética de um determinado indivíduo, mas sim a extensão com a qual o genótipo será expresso (Warwick & Legates, 1980), distinguindo a capacidade dos genótipos serem mais ou menos sensíveis às mudanças ambientais.

Na definição de um gradiente ambiental, qualquer fonte de variação deve ser considerada, já que todas as variáveis físicas, que podem definir o ambiente interagem entre si (Ambrosini, 2015). Diante desse cenário, vários pesquisadores têm avaliado a IGA definindo a variável ambiental de diferentes maneiras. Uma alternativa comumente utilizada nas avaliações genéticas de animais domésticos é o gradiente ambiental definido como um intervalo (classe) calculado a partir dos efeitos médios das soluções dos grupos de contemporâneos (GC) (Ambrosini et al., 2012; Cardoso et al., 2005; Corrêa et al., 2009; Kolmodin et al., 2002; Mattar et al., 2011; Rodrigues et al., 2021; Rezende et al., 2020; Santos et al., 2019; Silva et al., 2019), considerando assim, todas fontes de variações possíveis (manejo, sanidade, nutrição, tempo, ano, clima, dentre outras). Para tanto, o ambiente é classificado sobre qualquer escala e as características devem ter continuidade fisiológica sobre o ambiente (De Jong & Bijma, 2002). Isso permite distinguir os genótipos mais ou menos sensíveis às mudanças ambientais (robustez e plasticidade fenotípica) além de poder definir classes ambientais ou nível de baixo, médio e alto nível de produção, levando-se em consideração os desvios padrão das soluções dos GC ou estabelecendo um intervalo de credibilidade das informações (Ambrosini, 2015; Silva, 2019).

Segundo Santos et al. (2019), o GC demonstra o nível de produção de determinado grupo, podendo ser um indicativo da qualidade do sistema de produção e, de modo análogo, servir de base para classificá-lo. Assim, pode ser feitas as recomendações dos genótipos com bases nos ambientes definidos pela solução dos GC.

Ressalta-se que, a sensibilidade ambiental ou plasticidade fenotípica é

caracterizada pelas modificações sofridas pelo fenótipo decorrentes dos diferentes ambientes. Segundo (Falconer, 1990), os indivíduos mais sensíveis denominados genótipos plásticos e os de menor sensibilidade os robustos. Os genótipos mais estáveis tendem a ser indicados como superiores, entretanto, não são obrigatoriamente os melhores em todos os ambientes (Ambrosini et al., 2016).

Outro fato importante é que os parâmetros genéticos podem mudar no gradiente ambiental, implicando maior proporção da variação fenotípica devida a fatores genéticos em ambientes melhores (Cardoso et al., 2011; Santos et al., 2019). Nesse contexto, torna-se importante a consideração dessas variações, pois pode auxiliar na melhor identificação dos animais geneticamente superiores para determinados ambientes de produção.

1.6 Modelos de normas de reação (MNR)

A norma de reação (NR) é uma alternativa de se estudar a IGA e, que são as diferentes maneiras que um genótipo pode ser expresso, levando em consideração os mais diferentes ambientes, favoráveis, desfavoráveis, naturais ou artificiais (Ambrosini et al., 2012; Ferreira et al., 2015). É conhecida também como plasticidade ambiental, plasticidade fenotípica e sensibilidade ambiental.

Em estudos da IGA, os MNR via regressão aleatória com enfoque bayesiano vêm ganhando destaque nas mais diferentes espécies de interesse econômico (Ambrosini et al., 2016; Calus & Veerkamp, 2003; Cardoso et al., 2005; Ferreira et al., 2015; Kolmodin et al., 2002; Kolmodin & Bijma, 2004; Rodrigues et al., 2021; Rezende et al., 2020; Santos et al., 2020), embora existem diferentes alternativas de se avaliar a IGA no melhoramento genético animal, como descreveu (Ambrosini, 2012).

Os MNR são interessantes, pois pode relacionar em função linear, o mérito genético dos animais com as mudanças no gradiente ambiental (Silva et al., 2014), ou seja, permite descrever características que mudam gradual e, continuamente, sobre um gradiente ambiental. Eles são adequados para descrever a IGA porque podem acomodar muitos níveis ambientais com poucos parâmetros (Su et al., 2006). Adicionalmente, é uma função de (co)variância que atribui a cada animal dois coeficientes de regressão aleatórios (intercepto e inclinação) para prever os valores genéticos de acordo com o ambiente, permitindo que cada animal possua um valor

genético predito para os ambientes distintos.

Em geral, as maiores sensibilidades ambientais são por conta dos maiores valores de coeficientes de regressão linear (Valente et al., 2008). Assim, é possível de identificar os genótipos de melhor desempenho em cada extrato do gradiente ambiental estudado.

Para os MNR Kolmodin et al. (2002) propuseram dois passos distintos. Inicialmente, no primeiro passo são estimados os efeitos dos GC por meio do modelo animal (unicaracterístico) para definição do gradiente ambiental. No segundo passo as estimativas do GC são utilizadas como covariáveis “conhecidas” num modelo de regressão aleatório para obtenção das NR. Geralmente, essa pressuposição é chamada de modelo hierárquico norma de reação com dois passos (MHNR_{2P}). Entretanto, Su et al. (2006) propuseram o método de um passo que evita as limitações do MHNR_{2P}, para estimar o gradiente ambiental e a norma de reação dos animais de forma simultânea, sendo uma abordagem sob enfoque bayesiano e chamada de modelo hierárquico de norma de reação um passo (MHNR_{1P}). Nesse método na medida em que a covariável associada à NR é tratada como desconhecida, é possível realizar inferências para todas as incógnitas juntas dentro do MNR linear de um único passo (Silva et al., 2019; Rezende et al., 2020).

Esses dois métodos têm sido bastante utilizados em bovinos de corte e leite em estudos de características de crescimento no Brasil (Ambrosini et al., 2016; Ferreira et al., 2015; Santos et al., 2019; Santos et al., 2020; Souza et al., 2016; Silva et al., 2019). A maioria desses pesquisadores tem observado variações expressivas dos parâmetros genéticos em função do gradiente ambiental, com maiores valores de herdabilidades para as características em estudo quando o gradiente ambiental se tornou favorável.

1.7 Referências

AFROUZIYEH, M.; KWAKKEL, R.P.; ZUIDHOF, M.J. Improving a nonlinear Gompertz growth model using bird-specific random coefficients in two heritage chicken lines. **Poultry Science**, v.100, p.101059, 2021.

AKAIKE, H. A New look at the statistical model identification. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v.19, p.716-723, 1974.

ALVES, R.F.S.; PEREIRA, K.D.; CARNEIRO, A.P.S.; EMILIANO, P.C.; CARNEIRO, P.L.S.; MALHADO, C.H.M.; MARTINS FILHO, R. Nonlinear mixed effects models for comparing growth curves for Guzerá cattle. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v.21, p.1-10, 2020.

AMBROSINI, D.P. **Interação genótipos ambientes em bovinos da raça Nelore Mocha na Região Nordeste do Brasil obtido por normas de reação**. 2012. 79p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – UESB, Itapetinga.

AMBROSINI, D.P. **Normas de reação em características produtivas e reprodutivas de bovinos da raça Nelore no Nordeste do Brasil**. 2015. 86p. Tese. (Doutorado em Zootecnia) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – UESB, Itapetinga.

AMBROSINI, D.P.; CARNEIRO, P.L.S.; NETO, J.B.; MALHADO, C.H.M.; MARTINS FILHO, R.; CARDOSO, F.F. Interação genótipo × ambiente para peso ao ano em bovinos Nelore Mocho no Nordeste do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, p.1489-1495, 2012.

AMBROSINI, D.P.; MALHADO, C.H.M.; MARTINS FILHO, R.; CARNEIRO, P.L.S. Interação genótipo x ambiente via modelos de normas de reação para características de crescimento em bovinos nelore. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, p.177-186, 2016.

ARAUJO NETO, F.R.; OLIVEIRA, D.P.; ASPILCUETA-BORQUIS, R.R.; VIEIRA, D.A.; GUIMARÃES, K.C.; OLIVEIRA, H.N.; TONHATI, H. Selection of nonlinear mixed models for growth curves of dairy buffaloes (*Bubalus bubalis*). **The Journal of Agricultural Science**, v.158, p.218-224, 2020.

ARRUDA, R.M.S.; SOUZA, J.C.; JARDIM, R.J.D.; FERRAZ FILHO, P.B.; SILVA, L.O.C. Growth curves and nutritional requirements for maintenance of asymptotic weight of Nelore cattle. **Revista Ciência Agronômica**, v.49, p.692-698, 2018.

VON BERTALANFFY, L. Quantitative Laws in Metabolism and Growth. **The Quarterly Review of Biology**, v.32, p.217-231, 1957.

BRODY, S. **Bioenergetics and growth**. New York: Reinhold Publishing Corp.,1945. 1023p.

BURNHAM, K.P.; ANDERSON, D.R. Multimodel inference. **Sociological Methods e Research**, v.33, p.261-304, 2004.

CALUS, M.P.L. **Estimation of genotype x environment interaction for yield, health and fertility in dairy cattle**. 2006. 181p. (PhD) Thesis – Wageningen University.

CALUS, M.P.L.; VEERKAMP, R.F. Estimation of environmental sensitivity of genetic merit for milk production traits using a random regression model. **Journal of Dairy Science**, v.86, p.3756-3764, 2003.

CARDOSO, F.F.; CARDELLINO, R.A.; CAMPOS, L.T. Caracterização de interação genótipo-ambiente no ganho pós-desmama de bovinos Angus via normas de reação. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Sociedade Brasileira de Zootecnia, 2005.

CARDOSO, L.L.; BRACCINI NETO, J.; CARDOSO, F.F.; COBUCCI, J.A.; BIASUS, I.O.; BARCELLOS, J.O.J. Hierarchical Bayesian models for genotype \times environment estimates in post-weaning gain of Hereford bovine via reaction norms. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.40, p.294-300, 2011.

CARNEIRO, A.P.S.; MUNIZ, J.A.; CARNEIRO, P.L.S.; MALHADO, C.H.M.; FILHO, R.M.; E SILVA, F.F. Identidade de modelos não lineares para comparar curvas de crescimento de bovinos da raça Tabapuã. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.49, p.57-62, 2014.

CORRÊA, M.B.B.; DIONELLO, N.J.L.; CARDOSO, F.F. Caracterização da interação genótipo-ambiente e comparação entre modelos para ajuste do ganho pós-desmama de bovinos Devon via normas de reação. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.38, p.1460-1467, 2009.

COUTINHO, C.C.; MERCADANTE, M.E.Z.; JORGE, A.M.; PAZ, C.C.P.; FARO, L. EL; MONTEIRO, F.M. Growth curves of carcass traits obtained by ultrasonography in three lines of Nellore cattle selected for body weight. **Genetics and Molecular Research**, v.14, p.14076-14087, 2015.

COYNE, J.M.; BERRY, D.P.; MÄNTYSAARI, E.A.; JUGA, J.; MCHUGH, N. Comparison of fixed effects and mixed model growth functions in modelling and predicting live weight in pigs. **Livestock Science**, v.177, p.8-14, 2015.

CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J.; CARNEIRO, P.C.S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 4.ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2012. 514p.

DAS, P.; PAUL, A.K.; PAUL, R.K. Non-Linear mixed effect models for estimation of growth parameters in goats. **Journal of the Indian Society of Agricultural Statistics**, v.70, p.205-210, 2016.

DAS, P.; PAUL, A.K.; PAUL, R.K. Evaluation of alternative nonlinear mixed effects models for estimating pig growth parameters. **Indian Journal of Animal Sciences**, v.87, p.1274–1277, 2017.

DE JONG, G.; BIJMA, P. Selection and phenotypic plasticity in evolutionary biology and animal breeding. **Livestock Production Science**, v.78, p.195-214, 2002.

DIAS, C.R.G. **Modelação do crescimento juvenil H-D com recurso a modelos de**

efeitos mistos em castanheiro de alto fuste no norte de Portugal. 2020. Dissertação (Mestrado em Gestão de Recursos Florestais) - Escola Superior Agrária de Bragança.

FALCONER, D.S. **Introdução à genética quantitativa.** 1. ed. London: Longman, 1987. 279p.

FALCONER, D.S. Selection in different environments: Effects on environmental sensitivity (reaction norm) and on mean performance. **Genetical Research**, v.56, p.57-70, 1990.

FALCONER, D.S.; MACKAY, T.F.C. **Introduction to Quantitative Genetics.** Longman Group. 4a ed. Essex, UK. 1996.

FERREIRA, J.L.; LOPES, F.B.; LIRA, T.S.; GARCIA, J.A.S.; LÔBO, R.B.; SAINZ, R.D. Genotype-environment interaction of maternal influence characteristics in Nellore cattle bred in the Brazilian humid tropical regions by reaction norm. **Semina: Ciências Agrárias**, v.36, p.2787, 2015.

FORNI, S.; PILES, M.; BLASCO, A.; VARONA, L.; OLIVEIRA, H.N.; LÔBO, R.B.; ALBUQUERQUE, L.G. Comparison of different nonlinear functions to describe Nellore cattle growth. **Journal of Animal Science**, v.87, p.496-506, 2009.

FREITAS, A.R. DE. Curvas de crescimento na produção animal. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.34, p.786-795, 2005.

GALEANO-VASCO, L.F.; CERÓN-MUÑOZ, M.F.; NARVÁEZ-SOLARTE, W. Ability of non-linear mixed models to predict growth in laying hens. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.43, p.573-578, 2014.

GHAVI HOSSEIN-ZADEH, N. Modelling growth curve in Moghani sheep: comparison of non-linear mixed growth models and estimation of genetic relationship between growth curve parameters. **The Journal of Agricultural Science**, v.155, p.1150-1159, 2017.

GHAVI HOSSEIN-ZADEH, N.; GHORBANI, A. Modeling the growth curves for body weight and some biometric traits in Caspian horses (*Equus ferus caballus*) using non-linear mixed models. **Mammalian Biology**, v.93, p.5-12, 2018.

GHIASI, H.; LUPI, T.M.; MOKHTARI, M.S. The estimation of genetic parameters for growth curve traits in Raeini Cashmere goat described by Gompertz model. **Small Ruminant Research**, v.165, p.66-70, 2018.

GIOLO, S.R.; HENDERSON, R.; DEMÉTRIO, C.G.B. Mixed-effects growth curves in the valuation of Nellore sires. **Scientia Agricola**, v.66, p.84-89, 2009.

GLÓRIA, L.S. **Estimação de parâmetros não-lineares no R e no SAS: aplicações para cinética digestiva e crescimento em ruminantes.** 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. PPM 2020: rebanho bovino cresce 1,5% e chega a 218,2 milhões de cabeças.** (2020). Disponível em: Disponível

em: < <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias>>. Acesso em: 15 dez. 2021.

IBIAPINA NETO, V.; BARBOSA, F.J.V.; CAMPELO, J.E.G.; SARMENTO, J.L.R. Non-linear mixed models in the study of growth of naturalized chickens. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.49, p.1-14, 2020.

KARAMAN, E.; NARINC, D.; FIRAT, M.Z.; AKSOY, T. Nonlinear mixed effects modeling of growth in Japanese quail. **Poultry Science**, v.92, p.1942-1948, 2013.

KHEIRABADI, K.; RASHIDI, A. Modelling and genetic evaluation of Markhoz goat growth curve parameters. **Small Ruminant Research**, v.170, p.43-50, 2019.

KOLMODIN, R.; BIJMA, P. Response to mass selection when the genotype by environment interaction is modelled as a linear reaction norm. **Genetics Selection Evolution**, v.36, p.435-454, 2004.

KOLMODIN, R.; STRANDBERG, E.; MADSEN, P.; JENSEN, J.; JORJANI, H. Genotype by environment interaction in Nordic dairy cattle studied using reaction norms. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section A - Animal Science**, v.52, p.11-24, 2002.

LAIRD, A. Dynamics of relative growth. **Growth**, v.29, p.249-263, 1965.

LINDSTROM, M.J.; BATES, D.M. Nonlinear mixed effects models for repeated measures data. **Biometrics**, v.46, p.673, 1990.

LOPES, F.B.; MAGNABOSCO, C.U.; SOUZA, F.M.; ASSIS, A.S.; BRUNES, L.C. Análises de dados longitudinais em bovinos Nelore Mocho por meio de modelos não lineares. **Archivos de Zootecnia**, v.65, p.123-129, 2016.

LUPI, T.M.; LEÓN, J.M.; NOGALES, S.; BARBA, C.; DELGADO, J.V. Genetic parameters of traits associated with the growth curve in Segureña sheep. **Animal**, v.10, p.729-735, 2016.

LUSH, J. **Animal Breeding Plans**. Ames: Iowa State College Press, 1945.

MALHADO, C.H.M.; CARNEIRO, P.L.S.; MARTINS FILHO, R.; AZEVÊDO, D.M.M.R.; AFFONSO, P.R.A.M.; Souza, J.C. Correlações genéticas entre características de crescimento e parâmetros da curva em bovinos da raça Nelore. **Revista Científica de Produção Animal**, v.10, p.102-111, 2008.

MALHADO, C.H.M.; CARNEIRO, P.L.S.; MARTINS FILHO, R.; PEREIRA, D.G.; AFFONSO, P.R.A.M.; AZEVEDO, D.M.M.R.; SOUZA, J.C. Parâmetros e tendência genética da taxa de maturação e peso assintótico de bovinos da raça Nelore no estado da Bahia. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v.10, p.245-255, 2009.

MALHADO, C.H.M.; REZENDE, M.P.G.; MALHADO, A.C.M.; AZEVÊDO, D.M.M.R.; SOUZA, J.C.; CARNEIRO, P.L.S. Comparison of nonlinear models to describe the growth curves of Jaffarabaddi, Mediterranean and Murrah Buffaloes. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v.19, p.1485-1494, 2017.

MATTAR, M.; ALENCAR, M.M.; CARDOSO, F.F.; FERRAUDO, A.S.; SILVA, L.O.C.; ESPASANDIN, A.C. Utilização de técnicas estatísticas multivariadas para definição de ambiente de produção do peso ao sobreano para o estudo da interação genótipo-ambiente em bovinos Canchim. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 2008, Lavras. **Anais...** Lavras: Sociedade Brasileira de Zootecnia, 2008.

MATTAR, M.; SILVA, L.O.C.; ALENCAR, M.M.; CARDOSO, F.F. Genotype \times environment interaction for long-yearling weight in Canchim cattle quantified by reaction norm analysis1. **Journal of Animal Science**, v.89, p.2349-2355, 2011.

NELDER, J.A. The fitting of a generalization of the logistic curve. **Biometrics**, v.17, p.89, 1961.

PANI, S.N. **Genetic x environment interaction in sire evaluation**. Missouri:, 1971. 138p.

PINHEIRO, J.; BATES, D. **Mixed-effects models in S and S-PLUS**. Statistics ed. New York: Springer-Verlag, 2000.

PINHEIRO, J.C.; BATES, D.M. Approximations to the log-likelihood function in the nonlinear mixed-effects model. **Journal of Computational and Graphical Statistics**, v.4, p.12-35, 1995.

REGADAS FILHO, J.G.L.; TEDESCHI, L.O.; RODRIGUES, M.T.; BRITO, L.F.; OLIVEIRA, T.S. Comparison of growth curves of two genotypes of dairy goats using nonlinear mixed models. **The Journal of Agricultural Science**, v.152, p.829-842, 2014.

REZENDE, M.P.G.; MALHADO, C.H.M.; BIFFANI, S.; CARNEIRO, P.L.S.; CARRILLO, J.A.; BOZZI, R. Genotype-environment interaction for age at first calving in Limousine and Charolais cattle raised in Italy, employing reaction norm model. **Livestock Science**, v.232, p.103912, 2020.

RICHARDS, F.J. A Flexible Growth Function for Empirical Use. **Journal of Experimental Botany**, v.10, p.290-301, 1959.

RODRIGUES, F.B.; MALHADO, C.H.M.; CARNEIRO, P.L.S.; AMBROSINI, D.P.; REZENDE, M.P.G.; BOZZI, R.; SONG, J. Genotype by environment interactions for body weight in Mediterranean buffaloes using reaction norm models. **Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias**, v.34, p.166-176, 2021.

SANTORO, K.R.; BARBOSA, S.B.P.; BRASIL, L.H. DE A.; SANTOS, E.S. Estimativas de parâmetros de curvas de crescimento de bovinos Zebu, criados no estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.34, p.2262-2279, 2005.

SANTOS, H.B.; VIEIRA, D.A.; SOUZA, L.P.; SANTOS, A.L.; SANTOS, F.R.; ARAUJO NETO, F.R. Application of non-linear mixed models for modelling the quail growth curve for meat and laying. **The Journal of Agricultural Science**, v.156, p.1216-1221, 2018.

SANTOS, J.; MALHADO, C.H.; AMBROSINI, D.; FILHO, R.; ARAUJO, A.; CARNEIRO, P.L. Normas de reação para peso aos 365 e 550 dias de idade em bovinos Guzerá no nordeste do Brasil. **Archivos de Zootecnia**, v.68, p.562-570, 2019.

SANTOS, J.C.; MALHADO, C.H.M.; CARNEIRO, P.L.S.; REZENDE, M.P.G.; COBUCI, J.A. Genotype-environment interaction for age at first calving in Holstein cows in Brazil. **Veterinary and Animal Science**, v.9, p.100098, 2020.

SILVA, F.F.; GUIMARÃES, S.E.F.; LOPES, P.S.; MULDER, H.A.; BASTIAANSEN, J.W.M.; KNOL, E.F.; LOPES, M.S.; MATHUR, P.K.; VIANA, J.M.S. Sire evaluation for total number born in pigs using a genomic reaction norms approach. **Journal of Animal Science**, v.92, p.3825-3834, 2014.

SILVA, T.L. **Interação genótipo-ambiente na análise da variabilidade genética de características reprodutivas na raça nelore**. 2019. 52p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - UESB, Itapetinga.

SILVA, T.L.; CARNEIRO, P.L.S.; AMBROSINI, D.P.; LÔBO, R.B.; FILHO, R.M.; MALHADO, C.H.M. Genotype-environment interaction in the genetic variability analysis of reproductive traits in Nelore cattle. **Livestock Science**, v.230, p.103825, 2019.

SOUSA, V.C.; BIAGIOTTI, D.; SARMENTO, J.L.R.; SENA, L.S.; BARROSO, P.A.; BARJUD, S.F.L.; ALMEIDA, M.K.S.; SANTOS, N.P.S. Nonlinear mixed models for characterization of growth trajectory of New Zealand rabbits raised in tropical climate. **Animal Bioscience**, p.1-23, 2021.

SOUZA, L.A.; CAIRES, D.N.; CARNEIRO, P.L.S.; MALHADO, C.H.M.; MARTINS FILHO, R. Curvas de crescimento em bovinos da raça Indubrasil criados no estado do Sergipe. **Revista Ciência Agronômica**, v.41, p.671-676, 2010.

SOUZA, L.A.; MALHADO, C.H.M.; BRACCINI NETO, J.; MARTINS FILHO, R.; CARNEIRO, P.L.S. Genotype-environment interactions on the weight of Tabapua Cattle in the Northeast of Brazil. **Revista Caatinga**, v.29, p.206-215, 2016.

STRATHE, A.B.; DANFÆR, A.; SØRENSEN, H.; KEBREAB, E. A multilevel nonlinear mixed-effects approach to model growth in pigs. **Journal of Animal Science**, v.88, p.638-649, 2010.

STREIT, M.; REINHARDT, F.; THALLER, G.; BENNEWITZ, J. Reaction norms and genotype-by-environment interaction in the German Holstein dairy cattle. **Journal of Animal Breeding and Genetics**, v.129, p.380-389, 2012.

SU, G.; MADSEN, P.; LUND, M.S.; SORENSEN, D.; KORSGAARD, I.R.; JENSEN, J. Bayesian analysis of the linear reaction norm model with unknown covariates. **Journal of Animal Science**, v.84, p.1651-1657, 2006.

SUGIURA, N. Further analysts of the data by akaike' s information criterion and the finite corrections. **Communications in Statistics - Theory and Methods**, v.7, p.13-26, 1978.

TEDESCHI, L.O.; BOIN, C.; NARDON, R.F.; LEME, P.R. Estudo da curva de crescimento de animais da raça Guzerá e seus cruzamentos alimentados a pasto, com e sem suplementação: 1. Análise e seleção das funções não-lineares. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.29, p.630-637, 2000.

VALENTE, B.D.; SILVA, M.A.; SILVA, L.O.C.; BERGMANN, J.A.G.; PEREIRA, J.C.C.; FRIDRICH, A.B.; FERREIRA, I.C.; CORRÊA, G.S.S. Estruturas de covariância de peso em função da idade de animais Nelore das regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v.60, p.389-400, 2008.

WARWICK, E.J.; LEGATES, J. **Cría y mejoramento del ganado**. 3 ed. México: McGraw-Hill, 1980. 623 p.

YAMANAKA, S.E. **Modelos não lineares mistos em estudos de crescimentos de frango de corte**. 2018. 183p. Dissertação (Mestrado Profissional em Matemática em Rede Nacional – PROFMAT) - Universidade Federal de São Carlos - UFCar, São Carlos.

II – OBJETIVOS GERAIS

Objetivou-se utilizar modelos não lineares mistos para modelar e comparar as curvas de crescimento de bovinos zebuínos criados a pasto no Brasil e avaliar a diversidade entre as raças utilizando análises multivariadas considerando os parâmetros das curvas de crescimento. Além disso, avaliar a existência de efeito da interação genótipo-ambiente sobre os parâmetros da curva de crescimento de bovinos Nelore.

2.1 Objetivos específicos

- Identificar o melhor modelo não linear misto para descrever o crescimento de bovinos zebuínos do Brasil;
- Comparar as curvas de crescimento de bovinos zebuínos criados a pasto no Brasil;
- Verificar a diversidade entre as raças zebuínas por meio de análises multivariadas considerando os parâmetros oriundos da curva de crescimento;
- Identificar entre os modelos hierárquicos de normas de reação em um ou dois passos e modelo animal padrão o que melhor se ajusta ao conjunto de dados dos bovinos Nelore;
- Estimar parâmetros e valores genéticos para o peso assintótico e taxa de crescimento de bovinos Nelore;
- Avaliar as normas de reação no gradiente ambiental para os parâmetros da curva de crescimento de bovinos Nelore com maior número de progênies.

III – CAPÍTULO I

CRESCIMENTO DE ZEBUÍNOS DE CORTE UTILIZANDO MODELOS NÃO LINEARES MISTOS

Resumo – O uso de modelos não lineares sob o contexto de modelos mistos permite reduzir a variância residual com a inclusão de efeitos aleatórios, consequentemente, aumentar a precisão na estimativa da curva de crescimento. Dessa forma, objetivou-se utilizar modelos não lineares mistos (Richards, Brody, Gompertz, Logístico e Von Bertalanffy) para modelar as curvas de crescimento de bovinos zebuínos criados a pasto no Brasil. Adicionalmente, avaliou-se a diversidade entre as raças utilizando análises multivariadas (componentes principais (CP) e agrupamento) considerando o peso assintótico (A), taxa de maturidade (K), taxa de crescimento absoluta (TCA) e taxa maturidade absoluta (TMA) nas idades padronizadas aos 205, 365, 550 e 730 dias. Dados de pesos corporais de 311834 bovinos zebuínos machos e fêmeas das raças Guzerá, Nelore, Tabapuã e Nelore Mocho, provenientes da Associação Brasileira de Criadores de Zebu foram utilizados. O modelo Brody com os efeitos fixos de raça-sexo e aleatório de animal foi o mais adequado para descrever o crescimento das quatro raças. Os machos Guzerá e Tabapuã foram mais precoces (maiores K) que os machos Nelore Mocho e Nelore que apresentaram maiores A e TCA. As fêmeas foram mais precoces, especialmente as Tabapuã, seguidas pelas Guzerá, apresentando maiores valores de K e menores de A . Independente do sexo, as maiores TMA foram para as raças Tabapuã e Guzerá, desde a desmama até aos dois anos de idade. O CP1 explicou 93,05% da variação total e representa os animais com maior precocidade e menos pesados à maturidade (machos Guzerá e Tabapuã e todas as fêmeas). O CP2 explicou 6,71% da variação e corresponde aos animais mais pesados à maturidade e menos precoces (machos Nelore Mocho e Nelore). Dois grupos foram formados pela análises de agrupamento (ligação completa): o primeiro com os machos Nelore Mocho e Nelore, que apresentaram maiores valores para A , TCA_205, TCA_365, TCA_550 e TCA_730 sendo considerado animais com maior tamanho corporal a idade adulta; e o segundo incluindo os machos Guzerá, Tabapuã e as fêmeas, animais mais precoces. Um subgrupo foi formado pelos machos Guzerá e Tabapuã, com valores intermediários para todos os parâmetros. Essas informações são úteis para auxiliar melhoristas e produtores em estratégias de manejo alimentar e definição de raça a ser utilizada, no intuito de obter maior lucratividade em regime alimentar a pasto.

Palavras-chave: análise multivariada, modelo de Brody, modelos não lineares misto, peso assintótico, taxa de maturidade

GROWTH OF BEEF CATTLE USING MIXED NONLINEAR MODELS

Abstract – The use of models nonlinear in the context of mixed models allows reducing the residual variance with the inclusion of random effects, consequently, increasing the precision in the estimation of the growth curve. Thus, the objective of this research was to use mixed nonlinear models (Richards, Brody, Gompertz, Logistic and Von Bertalanffy) to model the growth curves of pasture-raised zebu cattle in Brazil. Additionally, diversity among breeds was evaluated using multivariate analyzes (principal components (PC) and clustering) considering asymptotic weight (A), maturity rate (K), absolute growth rate (AGR) and absolute maturity rate (AMR) at standardized ages of 205, 365, 550 and 730 days. Body weight data of 311,834 males and females zebu cattle of the Guzerat, Nelore, Tabapuã and Nelore Mocho breeds, from the Brazilian Association of Zebu Breeders were used. The Brody model with the fixed effect of breed-sex and animal as random effect was the most adequate to describe the growth of the four breeds. Guzerat and Tabapuã males were precocious (higher K) than Nelore Mocho and Nelore males, which showed higher A and AGR. Females were more precocious, especially Tabapuã, followed by Guzerat, presenting higher values of K and lower values of A . Regardless of sex, the highest AMR were for the Tabapuã and Guzerat breeds, from weaning to two years of age. PC1 explained 93.05% of the total variation and represents the animals with greater precocity and less weight at maturity (Guzerat and Tabapuã males and all females). PC2 explained 6.71% of the variation and corresponds to late animals, heavier at maturity and less precocious (males Nelore Mocho and Nelore). Two groups were formed by cluster analysis (complete linkage): the first with Nelore Mocho and Nelore males, which showed higher values for A , AGR_205, AGR_365, AGR_550 and AGR_730, being considered animals with greater body size at adulthood; and the second including males Guzerat, Tabapuã and females, most precocious animals. A subgroup was formed by males Guzerat and Tabapuã, with intermediate values for all parameters. This information is useful to help breeders and producers in food management strategies and breed definition to be used, in order to obtain greater profitability in a pasture diet.

Key-words: multivariate analysis, Brody model, mixed nonlinear models, asymptotic weight, maturity rate

Introdução

As raças zebuínas (*Bos taurus indicus*), introduzidas no Brasil a partir do século XIX, são a base genética do rebanho bovino brasileiro, devido à resistência à parasitas e melhor adaptação ao clima tropical e sistemas de criação, que é realizado na maioria a pasto (Barros et al., 2018). A busca por animais mais produtivos é crucial para melhorar o desempenho de qualquer sistema de criação. Entretanto, estratégias nas diferentes áreas de genética, manejos nutricional e sanitário, bem como produtivo e reprodutivo precisam ser consideradas para uma bovinocultura de corte sustentável economicamente. Nesse aspecto, características de crescimento como o peso corporal em determinadas idades e ganhos de peso diários, têm sido utilizados como critérios de seleção (Araujo et al., 2022; Freitas, 2005), com o objetivo de obter maior produção de carne e qualidades das carcaças.

Devido à relação entre crescimento dos animais e o retorno econômico da bovinocultura de corte, a avaliação do crescimento das principais raças zebuínas é essencial para viabilizar o sucesso da atividade, assim como a qualidade da carcaça, e os rendimentos de corte. Adicionalmente, a taxa de crescimento dos animais é variável ao longo da vida, em que cada tecido possui uma velocidade de desenvolvimento diferente (Araujo Neto et al., 2020; Valle et al., 2021). Portanto, alternativas práticas e eficientes, como a avaliação da curva de crescimento, são importantes para tomar decisões relacionadas ao sistema de produção de bovinos de corte (Araujo et al., 2022; Freitas 2005).

A curva de crescimento é utilizada com o intuito de acompanhar o desenvolvimento animal do nascimento ao abate; avaliar parâmetros importantes do ponto de vista biológico, como o tamanho, peso e maturidade; determinar técnicas adequadas de manejo nutricional; e identificar a melhor idade de abate, dentre outras aplicações (Freitas, 2005; Malhado et al., 2009). No intuito de prever por meio de modelagem matemática as curvas de crescimento, podemos utilizar modelos não lineares, em que são constantemente retratados nos estudos do crescimento de bovinos de corte, com o uso de registros do peso corporal em diferentes idades.

Os modelos não lineares mais utilizados na avaliação da curva de crescimento em bovinos zebuínos no Brasil são o de Richards, Logístico, Gompertz, Von Bertalanffy e Brody (Alves et al., 2020; Arruda et al., 2018; Carneiro et al., 2014; Lopes et al., 2016; Malhado et al., 2009; Santoro et al., 2005; Souza et al., 2010). Esses

modelos são utilizados porque permitem condensar grande número de informações em poucos parâmetros com interpretação biológica (Freitas, 2005; Malhado et al., 2017), permitindo comparações entre sexos, espécies, raças, dietas, entre outros.

O crescimento dos animais ao longo da vida são medidas longitudinais que apresenta variações entre e intra indivíduos. Além disso, a variância entre indivíduos aumenta à medida que eles envelhecem. Essas características do crescimento dos animais fazem com que os modelos não lineares mistos tornem-se uma alternativa importante, pois contêm fatores de efeitos fixos comum para a população completa e fatores aleatórios que atuam em cada nível de amostragem (Adame et al., 2008; Yang et al., 2009). Nesse sentido, esses modelos permitem ajustar estruturas de covariâncias flexíveis, capazes de lidar com dados desbalanceados ou incompletos (Lindstrom & Bates, 1990), e também estimar o comportamento médio e a variabilidade entre os indivíduos de uma população (Galeano-Vasco et al., 2014; Pinheiro & Bates, 2000).

O uso dessa abordagem pode proporcionar maior precisão na estimação dos parâmetros da curva de crescimento dos animais, devido a redução da variancia residual com a inclusão dos efeitos aleatórios. No entanto, não foram encontrados resultados do ajuste de modelos não lineares mistos em bovinos zebuínos, seguido de análises multivariadas para avaliação da diversidade entre as raças, bem como a relação entre os parâmetros da curva de crescimento. Assim, nós hipostenizamos que essas abordagens são promissoras para complementar o conhecimento do crescimento de bovinos zebuínos brasileiros. Dessa forma, objetivou-se utilizar modelos não lineares mistos para avaliar o ajuste dos modelos Richards, Brody, Gompertz, Logístico e Von Bertalanffy para descrever e comparar as curvas de crescimento de bovinos zebuínos criados a pasto no Brasil. Adicionalmente, avaliou-se a diversidade entre as raças por meio de análises multivariadas considerando os parâmetros da curva de crescimento (A e K), taxa de crescimento absoluta (TCA) e taxa maturidade absoluta (TMA).

Materiais e Métodos

Dados

O conjunto de dados foi disponibilizado pela Associação Brasileira de Criadores de Zebu (ABCZ) com machos e fêmeas das raças Guzerá, Nelore, Nelore Mocho e Tabapuã que nasceram entre 1970 e 2014, criados a pasto no Brasil. Animais com

menos de três registros de peso corporal, do nascimento aos 950 dias de idade, sem registro, com média de peso corporal fora do intervalo de ± 3 desvios-padrão e *outliers*, foram removidos do conjunto de dados. Após o controle fenotípico do conjunto de dados primários, um total de 311834 animais foram obtidos e utilizados para estimar os parâmetros da curva de crescimento (Tabela 1).

Tabela 1. Número de animais utilizados.

Raça	Macho	Fêmea	Total
Guzerá	5727	7599	13326
Nelore	122039	118761	240800
Nelore Mocho	9757	12839	22596
Tabapuã	17763	17349	35112
Total geral	155286	156548	311834

Modelos

As curvas de crescimento dos animais foram ajustadas por meio dos modelos não lineares de Richards ($\mu_{Y_t} = A(1 - Be^{-Kt})^{-m} + \varepsilon$), Brody ($\mu_{Y_t} = A(1 - Be^{-Kt}) + \varepsilon$), Logístico ($\mu_{Y_t} = A(1 - e^{-Kt})^{-1} + \varepsilon$), Von Bertalanffy ($\mu_{Y_t} = A(1 - Be^{-Kt})^3 + \varepsilon$) e Gompertz ($\mu_{Y_t} = Ae^{Be^{-Kt}} + \varepsilon$), em que μ_{Y_t} é a média populacional do peso corporal dos animais na idade t ; A é o peso assintótico; B é o parâmetro de integração do animal, determinado pelos valores iniciais de y e t ; K é a taxa de maturidade; m é o parâmetro que define o ponto de inflexão da curva e ε o erro aleatório. As pressuposições para os modelos de crescimento foram: $Y_t = \mu_{Y_t} + \varepsilon_t$, sendo que $Y_t \sim N(\mu_{Y_t}, \sigma_{Y_t}^2)$.

Análises estatísticas

Os modelos foram ajustados com a função *nlme* do pacote *nlme* do software R (Pinheiro & Bates, 2000), com as estimativas dos parâmetros obtidas pelo o método de máxima verossimilhança. Foram utilizados os efeitos fixos de raça-sexo e efeito aleatório de animal nos modelos não lineares mistos utilizados. Os modelos foram comparados pelo critério de informação de Akaike corrigido (Sugiura, 1978), bem como, as funções derivadas conforme as recomendações de Burnham & Anderson

(2004). A avaliação da heterocedasticidade foi realizada com uso da função de variância *varPower* e a medida repetida no tempo por meio da função autoregressiva contínua *corCAR1* existentes na biblioteca *nlme*.

Após a seleção do melhor modelo, foi calculada a taxa de crescimento absoluta (TCA) nas idades padronizadas aos 205, 365, 550 e 730 dias de idade, por meio da primeira derivada do modelo ajustado, em relação tempo ($\partial Y/\partial t$). Essa variável representa o ganho de peso corporal por unidade de tempo (kg/d). Nesse caso, isso equivale ao ganho de peso corporal médio diário estimado ao longo de um período de crescimento e corresponde à taxa média de crescimento dos animais dentro de uma população (Sarmiento et al., 2006). Além das TCA, a taxa de maturidade absoluta (TMA) nas idades padronizadas aos 205, 365, 550 e 730 dias de idade também foi calculada de acordo com metodologia descrita por Freitas (2005).

Os intervalos de confiança (95%) dos parâmetros do melhor modelo ajustado aos dados para as raças foram utilizados para testar a hipótese de igualdade dos parâmetros (A , K , TCA e TMA em 205, 365, 550 e 730 dias de idades) das quatro raças individualmente para machos e fêmeas. Os intervalos de confiança sobrepostos indicaram que as raças possuíam parâmetros com estimativas comuns, ou seja, parâmetros estatisticamente semelhantes.

Adicionalmente, os valores médios dos parâmetros A , K , TCA e TMA foram utilizados em uma análise de componentes principais (CP) para avaliar a diversidade entre as raças e suas relações com esses parâmetros, utilizando os pacotes *FactorMineR* e *Factorestra* do software R (R Development Core Team, 2020). Além disso, foi realizada uma análise de agrupamento hierárquico, utilizando a distância Euclidiana média como medida de dissimilaridade com agrupamento por meio de ligação completa, usando um gráfico construído com o pacote *heatmap* do software R (R Development Core Team, 2020). A verificação do suporte dos nós foi realizada pelo teste aproximadamente imparcial (AU), calculado por meio de reamostragem de *bootstrap* multiescala, em que valores de AU no mínimo de 95% foram considerados fortes para suportar um grupo.

Resultados

Parâmetros do modelo de Brody misto

O modelo de Brody com efeitos fixos de raça-sexo e efeito aleatório de animal associados aos três parâmetros do modelo, apresentou o menor valor do critério de informação de Akaike corrigido, sendo considerado o melhor modelo para descrever o crescimento das quatro raças zebuínas.

Houve diferença significativa entre as estimativas de A para os machos de acordo com os intervalos de confiança (95%) (Tabela 2). A maior média de A foi observada para Nelore Mocho, seguidos pelos Nelore, Tabapuã e com menores valores pelos Guzerá. Os machos Guzerá e Tabapuã foram semelhantes e apresentaram maiores estimativas de K em relação às outras raças, caracterizando os animais mais precoces, sendo que a raça Nelore Mocho apresentou a menor média para esse parâmetro.

Em geral, os machos Nelore Mocho foram os que obtiveram maiores médias para as TCA para todas as idades padronizadas. Aos 205 e 365 dias de idades os machos Tabapuã e Guzerá não apresentaram diferenças entre si para as TCA, contudo, apresentaram menores médias em relação aos Nelore, independente de ser Mocho ou não.

Para a TMA, aos 205 dias de idade, os machos Tabapuã apresentaram maior média, seguidos pelo Guzerá e com menor média pelo Nelore Mocho. Aos 365, 550 e 730 dias de idade, os machos Guzerá apresentaram a maior média e diferiram significativamente de todos os outros machos, com exceção do Tabapuã que aos 365 dias de idade foram estatisticamente semelhantes. Vale ressaltar que, as menores médias observadas nas idades padronizadas (205, 365, 550 e 730) para a TMA foram nos machos Nelore Mocho.

No caso das fêmeas, as maiores médias para A foram para o Nelore, independente de ser Mocho ou não, que diferiram significativamente das fêmeas Guzerá e Tabapuã (Tabela 3). Observou-se que houve diferenças entre as fêmeas para o parâmetro K , de forma que as fêmeas Tabapuã apresentaram maior média em relação as demais e a menor média foi observada na Nelore Mocho.

Tabela 2. Médias e intervalos de confiança (95%) para os parâmetros estimados do modelo não linear misto de Brody para machos zebuínos criados a pasto no Brasil.

Parâmetro	Guzerá	Nelore	Nelore Mocho	Tabapuã
A (kg)	391,21 (387,87; 394,56) ^d	432,30 (431,36; 433,24) ^b	454,11 (450,32; 457,90) ^a	401,66 (399,54; 403,77) ^c
K (%/kg)	0,00256 (0,00252; 0,00260) ^a	0,00218 (0,00217; 0,00219) ^b	0,00203 (0,00201; 0,00206) ^c	0,00252 (0,00249; 0,00257) ^a
TCA_205 (kg)	0,546 (0,544; 0,548) ^c	0,551 (0,550; 0,551) ^b	0,560 (0,559; 0,562) ^a	0,548 (0,545; 0,549) ^c
TCA_365 (kg)	0,362 (0,361; 0,367) ^c	0,389 (0,388; 0,389) ^b	0,405 (0,404; 0,406) ^a	0,366 (0,366; 0,367) ^c
TCA_550 (kg)	0,226 (0,225; 0,226) ^d	0,260 (0,260; 0,260) ^b	0,278 (0,277; 0,278) ^a	0,230 (0,229; 0,230) ^c
TCA_730 (kg)	0,142 (0,142; 0,143) ^d	0,176 (0,175; 0,176) ^b	0,193 (0,192; 0,193) ^a	0,146 (0,146; 0,147) ^c
TMA_205 (%)	45,60 (45,57; 45,64) ^b	41,64 (41,63; 41,65) ^c	39,45 (39,42; 39,47) ^d	45,94 (45,92; 46,96) ^a
TMA_365 (%)	63,88 (63,86; 63,90) ^a	58,81 (58,80; 58,81) ^b	56,27 (56,25; 56,28) ^d	63,88 (63,87; 63,89) ^a
TMA_550 (%)	77,50 (77,49; 77,52) ^a	72,47 (72,47; 72,47) ^c	69,98 (69,97; 69,99) ^d	77,34 (77,33; 77,34) ^b
TMA_730 (%)	85,81 (85,80; 85,82) ^a	81,40 (81,39; 81,50) ^c	79,18 (79,16; 79,19) ^d	85,60 (85,60; 85,61) ^b

A: peso assintótico; K: taxa de maturidade; TCA; taxa de crescimento absoluta em 205, 365, 550 e 730 dias de idades; TMA: taxa de maturidade absoluta em 205, 365, 550 e 730 dias de idades. As estimativas dos parâmetros seguidos de letras iguais nas linhas não diferem estatisticamente pelos intervalos de confiança (p -valor > 0,05).

Tabela 3. Médias e intervalos de confiança (95%) para os parâmetros estimados do modelo não linear misto de Brody para fêmeas zebuínas criadas a pasto no Brasil.

Parâmetro	Guzerá	Nelore	Nelore Mocho	Tabapuã
A (kg)	355,51 (352,97; 358,05) ^b	357,73 (357,05; 358,42) ^a	359,82 (357,66; 361,98) ^a	347,36 (345,65; 355,80) ^b
K (%/kg)	0,00262 (0,00259; 0,00266) ^b	0,00256 (0,00255; 0,00257) ^c	0,00245 (0,00242; 0,00247) ^d	0,00272 (0,00270; 0,00275) ^a
TCA_205 (kg)	0,500 (0,499; 0,501) ^a	0,488 (0,488; 0,488) ^b	0,482 (0,481; 0,483) ^d	0,486 (0,485; 0,487) ^c
TCA_365 (kg)	0,329 (0,328; 0,330) ^a	0,324 (0,324; 0,326) ^b	0,326 (0,323; 0,326) ^b	0,314 (0,314; 0,315) ^c
TCA_550 (kg)	0,202 (0,202; 0,203) ^b	0,202 (0,202; 0,202) ^b	0,207 (0,207; 0,208) ^a	0,190 (0,190; 0,190) ^c
TCA_730 (kg)	0,126 (0,126; 0,127) ^b	0,127 (0,126; 0,127) ^b	0,133 (0,133; 0,134) ^a	0,116 (0,116; 0,117) ^c
TMA_205 (%)	46,56 (46,53; 46,59) ^c	46,88 (46,87; 46,88) ^b	45,45 (45,43; 45,47) ^d	48,75 (48,73; 48,76) ^a
TMA_365 (%)	64,88 (64,86; 65,00) ^b	64,74 (64,73; 64,90) ^b	63,13 (63,11; 63,14) ^c	66,84 (66,83; 66,85) ^a
TMA_550 (%)	78,39 (78,37; 78,40) ^b	78,05 (78,04; 78,06) ^c	76,56 (76,55; 76,57) ^d	79,96 (79,95; 79,97) ^a
TMA_730 (%)	86,52 (86,51; 86,53) ^b	86,16 (86,15; 86,16) ^c	84,91 (84,90; 84,92) ^d	87,72 (87,72; 87,73) ^a

A: peso assintótico; K: taxa de maturidade; TCA; taxa de crescimento absoluta em 205, 365, 550 e 730 dias de idades; TMA: taxa de maturidade absoluta em 205, 365, 550 e 730 dias de idades. As estimativas dos parâmetros seguidos de letras iguais nas linhas não diferem estatisticamente pelos intervalos de confiança (p -valor > 0,05).

As fêmeas Guzerá apresentaram maiores médias para TCA_205 e TCA_365 e diferiram si das demais, sendo as menores médias observadas para a Nelore Mocho e Tabapuã. Para as TCA nas idades 550 e 730 dias, as maiores e menores médias foram observadas nas fêmeas Nelore Mocho e Tabapuã, respectivamente. Não foi observada diferença para as TCA entre as fêmeas das raças Nelore e Guzerá.

As fêmeas das quatro raças apresentaram diferenças significativas para as TMA nas idades 205, 365, 550 e 730 dias, exceto as Guzerá e Nelore que não diferiram entre si para a TCA_365. No geral, as médias de TMA observadas nas idades 205, 365, 550 e 730 foram maiores e menores para Tabapuã e Nelore Mocho, respectivamente.

Curvas de crescimento e taxas de crescimento absoluta

É sabido a ocorrência de diferentes trajetórias de crescimento em bovinos de corte para machos e fêmeas em relação ao padrão de crescimento e ganhos de peso corporal. Assim, as Figuras 1 e 2 foram plotadas individualmente para ambos os sexos.

Os machos Nelore Mocho apresentaram crescimento mais rápido em relação às outras raças, apresentando também o maior peso estimado aos 950 dias. Após os 300 dias de idade, os animais Guzerá apresentaram um crescimento mais lento, atingindo a assíntota de seu peso corporal aos 950 dias, sendo essa menor quando comparada às outras raças (Figura 1-A). Adicionalmente, os machos Nelore, depois dos 550 dias de idade, tiveram o segundo maior desenvolvimento corporal, seguidos pelos machos Tabapuã. Já as fêmeas apresentaram padrão de crescimento semelhante desde o primeiro dia até aos 950 dias de idade (Figura 1-B).

Os machos Nelore Mocho apresentaram maiores TCA desde o primeiro até aproximadamente 500 dias de idade e, depois dessa idade, apresentaram ganhos diários semelhantes aos machos Nelore até aos 700 dias (Figura 2-A). Os machos Nelore, apesar dos menores ganhos até 200 dias, demonstraram um aumento nos ganhos de peso diário e foram superiores aos demais machos após os 700 até aos 950 dias de idade.

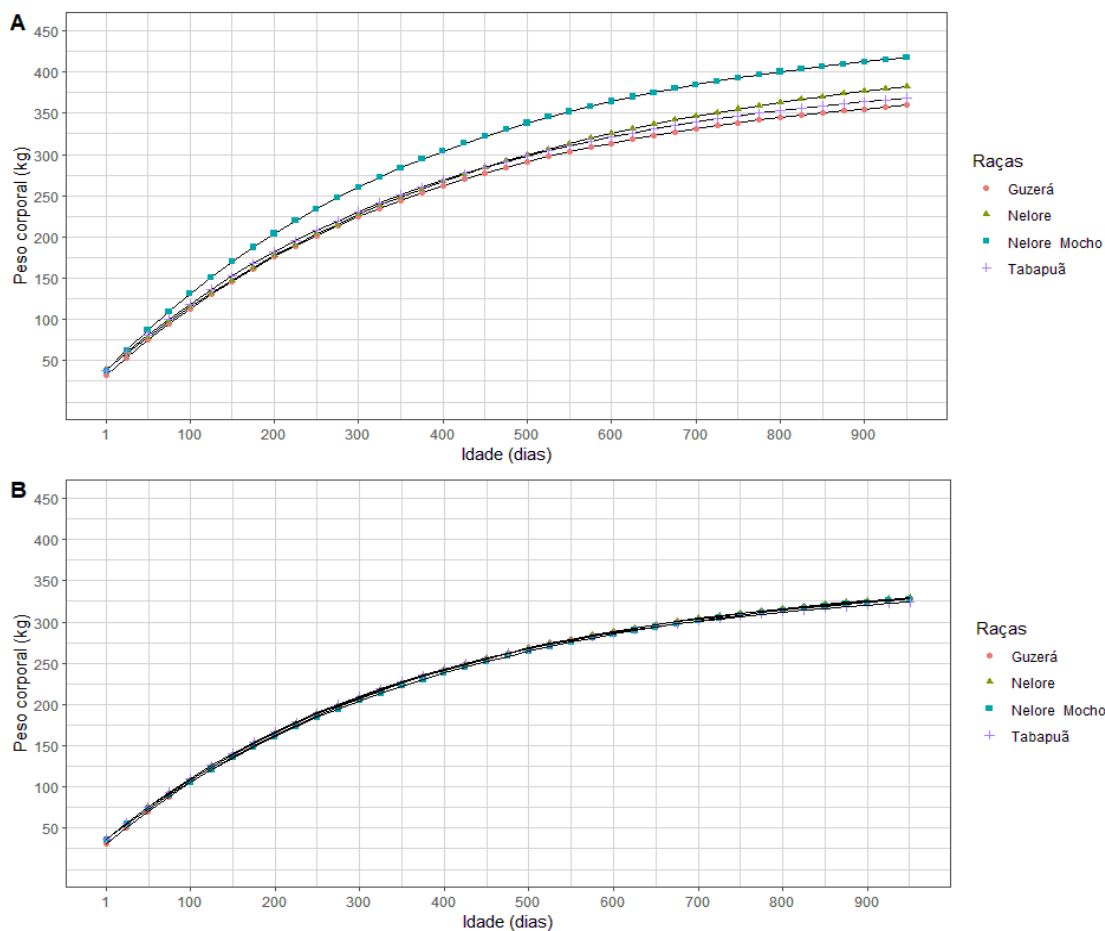


Figura 1. Curvas de crescimento utilizando o modelo não linear misto de Brody para bovinos zebuínos criados a pasto no Brasil. *A*: machos e *B*: fêmeas.

As fêmeas Guzerá e Tabapuã até os 250 dias de idade apresentaram maiores ganhos diários, seguidas pelas fêmeas Nelore, e por último pelas as Nelore Mocho, que apresentaram os menores ganhos diários (Figura 2-B). Após esse ponto pequenas diferenças puderam ser observadas entre as raças ao comparar as fêmeas, com um pequeno aumento nos ganhos de peso diário a partir dos 350 até 950 dias de idade para as fêmeas Nelore Mocho.

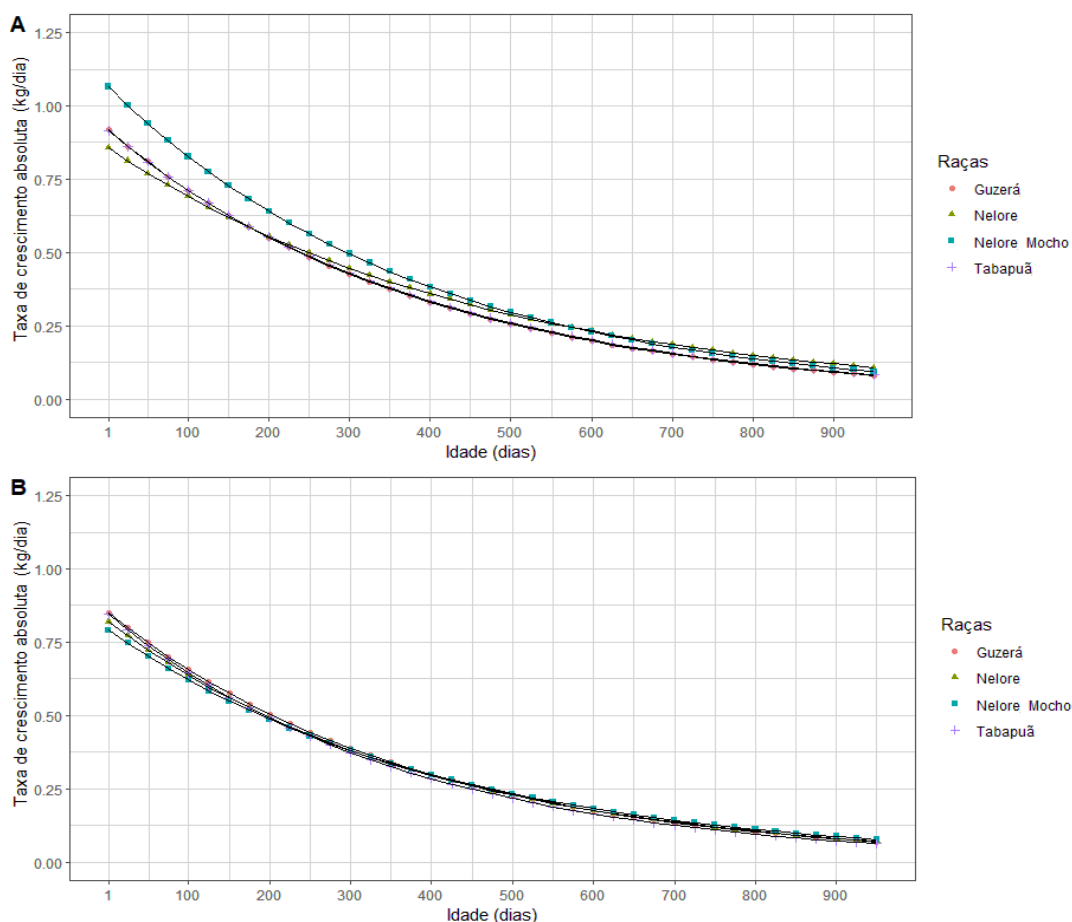


Figura 2. Taxa de crescimento absoluta (TCA), considerando o modelo linear misto de Brody para bovinos zebuínos criados a pasto no Brasil. A: machos e B: fêmeas.

Diversidade entre as raças utilizando análises multivariadas (Componente principal e agrupamento (Heatmap))

Os dois primeiros componentes principais (CP) explicaram 99,76% da variância total do conjunto de dados. O CP1 explicou 93,05% da variação, com os seguintes coeficientes: $-0,32*A + 0,31*K - 0,28*TCA_{205} - 0,32*TCA_{365} - 0,33*TCA_{550} - 0,32*TCA_{730} + 0,32*TMA_{205} + 0,32*TMA_{365} + 0,31*TMA_{550} + 0,32*TMA_{730}$. O CP2 explicou 6,71% da variação e foi descrito dar seguinte forma: $+0,24*A + 0,30*K + 0,69*TCA_{205} + 0,32*TCA_{365} + 0,13*TCA_{550} + 0,01*TCA_{730} + 0,19*TMA_{205} + 0,24*TMA_{365} + 0,26*TMA_{550} + 0,27*TMA_{730}$.

Os machos Guzerá e Tabapuã ficaram localizados ao lado da TCA_{205} e K no gráfico *Biplot* construído com os CP (Figura 3). Os animais Nelore e Nelore Mocho ficaram mais próximos ao A , TCA_{365} , TCA_{550} e TCA_{730} . Em geral, menores

valores dos parâmetros *A*, TCA_365, TCA_550 e TCA_730 podem ser associados às fêmeas independentemente da raça. No entanto, as fêmeas Tabapuã e Guzerá apareceram mais próximas do *K*, TMA_205, TMA_365, TMA_550 e TMA_730, seguida das fêmeas Nelore e Nelore Mocho.

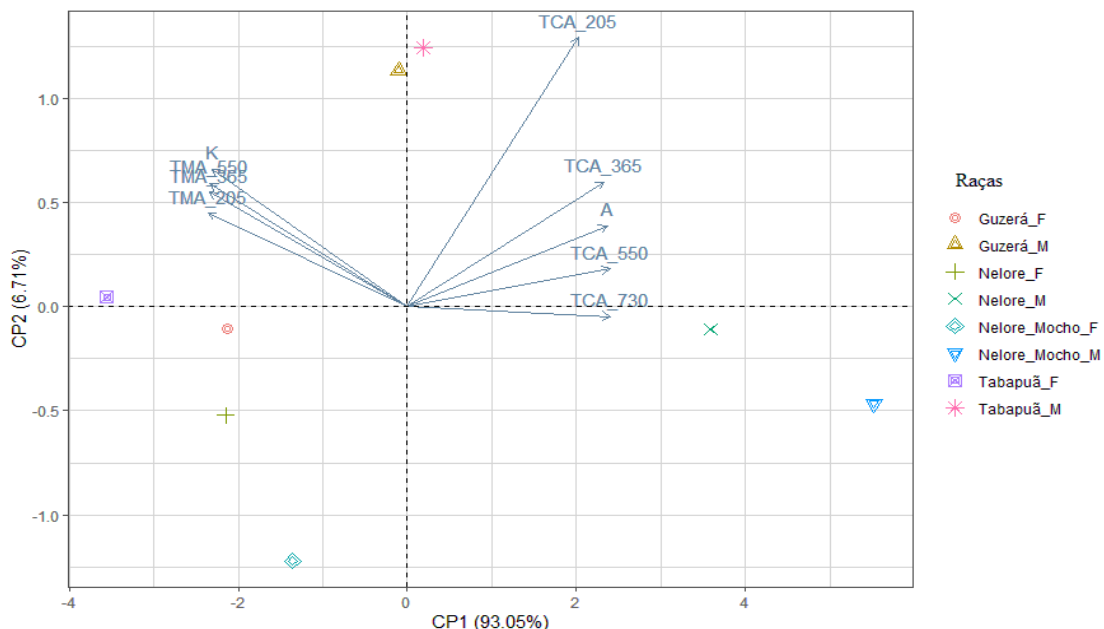


Figura 3. Biplot dos dois primeiros componentes principais (CP) para bovinos zebuínos criados a pasto no Brasil. M: machos; F: fêmeas; A: peso assintótico; K: taxa de maturidade; TCA: taxa de crescimento absoluta em 205, 365, 550 e 730 dias de idade; TMA: taxa de maturidade absoluta em 205, 365, 550 e 730 dias de idade.

Os machos Nelore e Nelore Mocho ficaram em um grupo isolado, pelo índice AU (100%), apresentando maiores valores (positivos) para os parâmetros *A*, TCA_205, TCA_365, TCA_550 e TCA_730 (Figura 4). O maior grupo observado foi o segundo, composto pelos machos Guzerá, Tabapuã e todas as fêmeas que apresentaram os maiores valores para os parâmetros *K*, TMA_205, TMA_365, TMA_550 e TMA_730. Um subgrupo foi formado pelos machos Guzerá e Tabapuã com valores intermediários para todos os parâmetros.

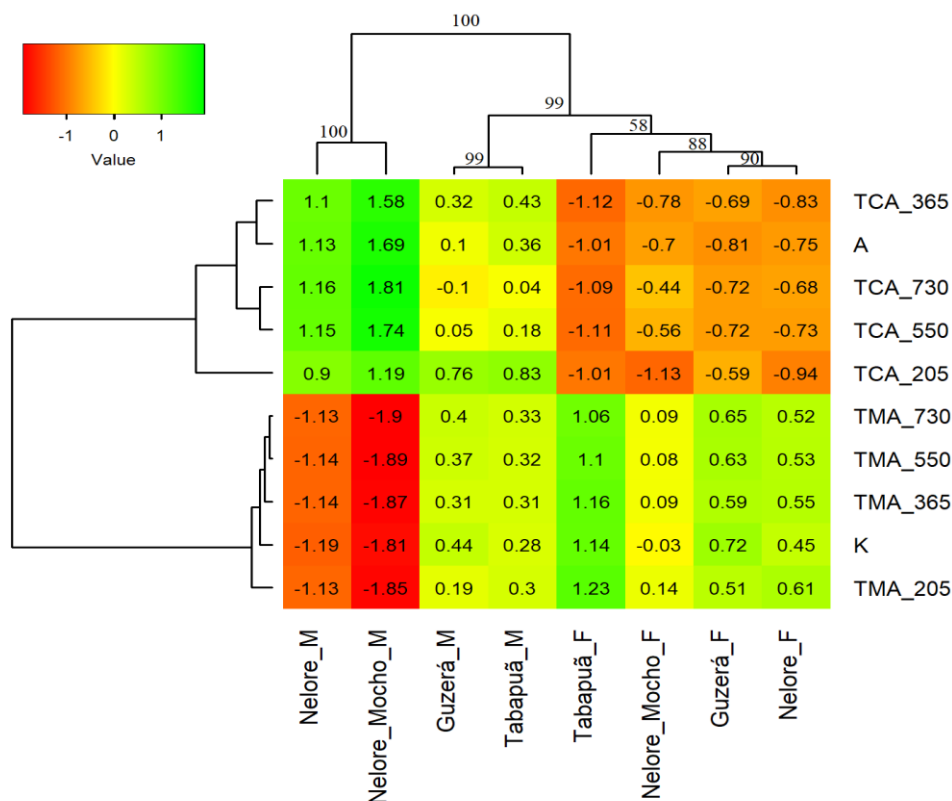


Figura 4. Heatmap utilizando os parâmetros das curvas de crescimento dos bovinos de zebuínos (Nelore, Nelore Mocho, Tabapuã e Guzerá) criados a pasto no Brasil. M: machos; F: fêmeas; A: peso assintótico; K: taxa de maturidade; TCA: taxa de crescimento absoluta em 205, 365, 550 e 730 dias de idade; TMA: taxa de maturidade absoluta em 205, 365, 550 e 730 dias de idade.

Discussão

O modelo de Brody somente com efeitos fixos, tem sido utilizado para descrever curvas de crescimento de bovinos zebuínos no Brasil (Arruda et al., 2018; Garnero et al., 2005; Lopes et al., 2016; Malhado et al., 2009; Silva et al., 2011). Não foram encontrados registros na literatura do uso de modelo não lineares mistos considerando o modelo Brody para comparar curvas de crescimento de raças zebuínas, sendo seu uso inédito. Em estudos com outros modelos, espécies e raças, vários autores, concluíram que o desempenho dos modelos não lineares mistos foi melhor do que os modelos de efeito fixo (Alves et al., 2020; Araujo Neto et al., 2020; Ghavi Hossein-Zadeh, 2017; Ibiapina Neto et al., 2020), apresentando estimativas dos parâmetros mais precisas. Isso pode estar relacionado à modelagem das estruturas de variâncias e (co)variâncias, que pode melhorar a qualidade de ajuste dos modelos pela diminuição da variância residual com a inclusão dos efeitos aleatórios.

Em relação ao maior peso corporal na idade adulta do Nelore Mocho e Nelore, podem estar associados ao intenso melhoramento genético utilizando pesos em idades específicas. Além disso, a raça Nelore é base genética da raça Nelore Mocho formada no Brasil pela seleção de animais sem chifres (Barros et al., 2018), explicando as semelhanças entre machos e, principalmente, entre as fêmeas dessas raças para o peso assintótico. Para os machos Tabapuã, o maior peso corporal na idade adulta em relação aos machos Guzerá, pode ser devido à seleção artificial para a produção de carne (Araujo et al., 2022). A constituição genética dessa raça obtida a partir de cruzamentos entre o gado mocho nacional e animais zebuínos (Santiago, 1986), principalmente a Nelore (Campos et al., 2017) pode ter contribuído com esse maior peso corporal à maturidade em relação aos machos Guzerá.

Os animais Guzerá e Tabapuã são mais precoces do que Nelore e Nelore Mocho (principalmente os machos), fato também relatado por Santoro et al. (2005) para a raça Guzerá. Entretanto, esses autores também relataram que a indisponibilidade de dados em idades superiores a dois anos não possibilitou uma melhor verificação desse fato. Esta indisponibilidade também pode ser observada no atual estudo, destacando a importância do acompanhamento dos animais em idades mais avançadas, quando possível, para uma melhor precisão das estimativas das curvas de crescimento de bovinos zebuínos.

Animais mais precoces possuem menores probabilidades de atingir pesos corporais maiores à idade adulta, visto que K indica a velocidade de crescimento para atingir o peso corporal assintótico (Garnero et al., 2005). Dessa forma, animais que obtêm maiores valores de K apresentam maturidade precoce comparado aqueles com menores valores e peso corporal inicial semelhante (Hosseini-Zadeh e Golshani, 2016). Isso é possível por causa da estreita faixa de desvio no peso ao nascer, assim a variação entre os valores de K torna-se um preditor confiável da taxa de crescimento (Malhado et al., 2009).

As estimativas de A para machos e fêmeas Nelore, Guzerá e Nelore Mocho foram menores que as observadas por Santoro et al. (2005), obtidas pelo modelo de Brody. No entanto, as de K foram superiores as observadas por esses autores. Carneiro et al. (2014), utilizando o modelo de Brody para comparar as curvas de crescimento de bovinos Tabapuã de cinco regiões de produção do Nordeste brasileiro, observaram estimativas de A maiores e K menores as obtidas nesse estudo. Assim como Alves et al. (2020) utilizando os modelos de Gompertz e Von Bertalanffy mistos (com efeito fixo de

quatro regiões de produção do Nordeste do Brasil e efeito aleatório de animal) para machos e fêmeas Guzerá, respectivamente, obtiveram maiores A e K para ambos os sexos, exceto para a região Gado–Algodão, em que as fêmeas apresentaram menor valor de A . É importante destacar que mesmo sendo amostras das mesmas raças, se tratam de objetivos distintos, metodologias diferentes e banco de dados de tamanhos diferentes, o que explica em parte essas variações nas estimativas.

As maiores TCA observadas aos 205 dias de idade, correspondem ao período de pré-desmame até a desmama (TCA_205) em ambos os sexos (Tabela 2). As TCA mais altas nesse período são evidentes, pois o potencial de crescimento dos animais é sempre maior quando mais jovem devido estarem sob os cuidados maternos e amamentando (Souza et al., 2010). A partir desse período até aos dois anos de idade (TCA_730), os machos Nelore Mocho apresentaram maiores ganhos médios diários. Fato que pode estar relacionado ao ambiente materno até a desmama maior potencial genético de crescimento e ganhos diários em relação aos demais machos em todo o período.

As fêmeas Guzerá apresentaram uma pequena margem de superioridade em ganho médio diário no período da desmama (TCA_205), época que ainda são dependentes do ambiente materno, principalmente, da produção de leite de suas mães e a um ano de idade (TCA_365). Já ao sobreano (TCA_550) e aos dois anos de idade (TCA_730), as fêmeas Nelore Mocho foram as que expressaram maiores ganhos médios diários, principalmente em relação a Tabapuã.

As maiores porcentagens de TMA observadas nas raças Tabapuã e Guzerá desde a desmama (TMA_205) até aos dois anos de idade (TMA_730) comparadas a Nelore e, principalmente, a Nelore Mocho, podem estar relacionadas com a maior precocidade desses animais para alcançarem a maturidade (maior valor de K). Geralmente, os animais com maiores pesos adultos, também, apresentam maiores necessidades nutricionais (Malhado et al., 2017) e precisam de mais tempo para atingir a maturidade (Araujo et al., 2022). Ressalta-se que, até aos dois anos de idade (TMA_730), todas as raças alcançaram porcentagens de seus pesos assintóticos variando de 79,18 a 85,81% e 84,91 a 87,72% para machos e fêmeas, respectivamente (Tabela 2). Essas porcentagens foram menores do que os 95% de peso assintótico reportado por Oliveira et al. (2000) para animais adultos.

Essas informações são importantes para a comercialização e reposição nos rebanhos, visto que é comum a venda de machos e descarte de fêmeas não aproveitadas para reprodução, após um ano de idade. Neste contexto, as TCA e TMA padronizadas

nas diferentes idades (205, 365, 550 e 730) agregam informações importante que podem ser utilizadas pelos pesquisadores e produtores. Além disso, permitem avaliar o tipo de manejo e alimentação mais adequados economicamente em idade específicas e melhor definição da idade ao abate ou comercialização dos animais, demonstrando grande aplicabilidade prática.

A diferença sexual em bovinos zebuínos sobre os parâmetros da curva de crescimento é um fato (Arruda et al., 2018; Paro de Paz et al., 2018; Santoro et al., 2005), podendo ser atribuída às diferenças hormonais e fisiológicas entre os sexos para o peso corporal adulto, que geralmente resultam em machos maiores e mais pesados em comparação as fêmeas. Dessa forma, independente da raça, as curvas de crescimento devem ser estimadas para ambos os sexos separadamente. Em programas de melhoramento genético animal, avaliar este fator sobre os parâmetros da curva de crescimento pode levar melhorias na eficiência produtiva e reprodutiva, permitindo definir adequadamente o manejo nutricional e a idade ideal para o abate por sexo (Paro de Paz et al., 2018).

Em geral, quando as trajetórias de crescimento e TCA das raças foram comparadas de forma global dentro de cada sexo (Figuras 1 e 2), os machos Nelore Mocho demonstraram um potencial de crescimento mais rápido com maiores ganhos médios diários nas fases iniciais em relação aos outros machos. Esses resultados podem ser reflexos do processo de seleção realizado na formação dessa raça, em que, além do interesse na facilidade de manejo pela ausência de chifres, está relacionado a um biótipo ótimo para produção de carne. O padrão de crescimento das fêmeas foi semelhante, contudo, as fêmeas Guzerá e Tabapuã demonstraram maiores desempenhos com maiores ganhos médios diários no primeiro semestre de vida, corroborando com a maior precocidade e velocidade de crescimento observada nessas fêmeas, alcançando a maturidade mais cedo em relação as Nelore e Nelore Mocho.

No modelo de Brody o ponto de inflexão coincide com o nascimento, resultando em uma curva não sigmoide e os ganhos médios diários representados pelas TCA são sempre decrescentes (Marinho et al., 2013). Isso evidenciou que desde os primeiros dias de vida até aos 950 dias de idade as raças, independentemente do sexo, apresentaram um acentuado decréscimo nas TCA. São recomendadas estratégias para mitigar a diminuição de ganhos de peso corporal, principalmente pós-desmame, dentre elas a melhoria no manejo nutricional para minimizar os efeitos da mudança na dieta nesse período (Arré et al., 2019; Lopes et al., 2016). Segundo Souza et al. (2010), o acentuado

decréscimo nos ganhos médios diários pós-desmame pode ser devido à mudança no tipo de alimentação, pois os animais deixam de consumir leite e passam a consumir exclusivamente pasto, na maioria dos casos.

As diferenças entre as raças zebuínas foram melhores evidenciadas pelas análises multivariadas. O CP1 representa um contraste entre as TCA e TMA, discriminando animais que apresentam maior precocidade e aqueles que alcançam o peso corporal adulto mais rapidamente com menor proporção, sendo representado pelos machos Guzerá e Tabapuã, assim como pelas fêmeas de todas as raças (Figura 3). O CP2 pode ser usado como um índice para melhor discriminar animais menos precoces e mais pesados à maturidade, podendo ser representado pelos machos Nelore e Nelore Mocho, por apresentarem relação positiva com esse CP. Embora sejam menos precoces, segundo a Associação dos Criadores de Nelore do Brasil (ACNB, 2021), esses machos apresentam em comum ossatura leve, robusta (forte), musculatura compacta, boa conformação e qualidade de carcaça, o que é favorável para indústrias de carne.

Os agrupamentos das raças observados no *Heatmap* corroboram com os resultados apresentados anteriormente. A similaridade dos machos Nelore e Nelore Mocho tem relação com a formação da Nelore Mocho a partir da Nelore e com a seleção dos animais para pesos corporais em idades específicas. Observou-se que esses animais são mais pesados na idade adulta, com bom potencial de crescimento e ganhos médios diários do desmame até aos dois anos de idade, necessitando, entretanto, de melhorar a precocidade, dado que são mais tardios à maturidade apresentando menores porcentagens de seus pesos assintóticos. Ressalta-se que, essas raças foram selecionadas exclusivamente para produção de carne (Santiago, 1986) e são bastante utilizadas em cruzamentos por todas as regiões do país, compondo os maiores efetivos de zebuínos criados nas regiões do Brasil.

Os machos Guzerá e Tabapuã são mais similares, apresentando crescimento rápido e maior no primeiro semestre de vida com maturidade precoce, devido aos maiores valores de TCA₂₀₅ e *K*. Esses animais também apresentaram valores intermediários para os demais parâmetros comparados ao primeiro grupo, o que provavelmente, levou a ficarem no mesmo grupo com as fêmeas. A raça Guzerá foi selecionada para dupla aptidão (corte e leite) desde a sua introdução no final do século XIX e tem mostrado capacidade de se adaptar às diversas condições climáticas do Brasil (Santos et al., 2012). Além do potencial para dupla aptidão, a raça Guzerá se destaca entre os zebuínos por sua elevada rusticidade, o que a torna um importante recurso

pecuário em áreas tropicais (Peixoto et al., 2014). Já a raça Tabapuã foi a primeira raça mocha de zebu formada no Brasil para produção de carne (Santiago, 1986) e apresenta desempenho de crescimento similar ao das outras principais raças zebuínas criadas no Brasil (Araujo et al., 2022; Jorge et al., 1998).

As fêmeas das quatro raças ficaram no mesmo grupo apresentando padrão semelhante, sendo os animais mais precoces. Ressalta-se que, as fêmeas, além de poderem ser abatidas precocemente, são responsáveis pela manutenção do rebanho nos anos subsequentes e, portanto, atenção especial deve ser dada a elas no sistema de produção (Silva et al., 2018), principalmente, a pasto. Fêmeas com vida mais longa tendem a ser mais lucrativas devido à sua maior capacidade de retorno do capital investido em sua criação (Queiroz et al., 2007). Além disso, fêmeas de porte menores consomem menos alimentos e isso é importante para os sistemas de criação. Segundo Malhado et al. (2009), os impactos econômico nos custos da alimentação é ainda mais acentuado nas fêmeas, por permanecerem mais tempo no ambiente de produção consumindo alimentos. Desse modo, a seleção de fêmeas precoces é importante não apenas pelo impacto na economia da atividade, mas também, na sustentabilidade dos sistemas de criação.

O tempo de permanência das fêmeas no rebanho é importante e indica sua habilidade reprodutiva, uma vez que, as que apresentam falhas na reprodução são descartadas mais cedo (Mercadante et al., 2000). O início da vida reprodutiva das fêmeas é dependente de sua condição corporal, sendo reflexo das taxas de crescimento e influenciada, principalmente, pelo ganho de peso da desmama ao ano (Fernandes Júnior et al., 2019). Dessa forma, a precocidade implica em menos tempo para o início da vida reprodutiva nas fêmeas, que é um determinante no número de animais disponíveis para reprodução, longevidade produtiva, intervalo de geração e intensidade de seleção (Lacerda et al., 2018), aumentando a rentabilidade da atividade.

Os machos Guzerá e Tabapuã e as fêmeas de todas as raças apresentaram maior precocidade, desse modo, podem ser abatidos mais cedo em relação aos machos Nelore e Nelore Mochó. Contudo, é necessário que as carcaças se ajustem às exigências do mercado em termos de peso corporal e cobertura de gordura (grau de acabamento). Geralmente, os frigoríficos exigem carcaças com mínimo de 3 mm de espessura de gordura subcutânea (Pacheco et al., 2005; Ferraz et al., 2020). A cobertura de gordura das carcaças é importante porque, durante o resfriamento reduz as perdas por exsudação e mantém a boa aparência visual da carcaça (Brondani et al., 2006), especialmente, no

que se refere à qualidade sensorial.

O mercado consumidor é dinâmico, diverso e está em constante mudança, sendo a segmentação dos sistemas de produção também uma tendência. Assim, se os produtores ou indústrias de carne desejarem animais de maiores tamanhos corporais (maior peso corporal à maturidade), os machos da raça Nelore Mocho e Nelore podem ser a melhor opção, pois apresentaram bons desempenhos para crescimento e ganhos diários do desmame até aos dois anos de idade. Além disso, as raças com a melhor conformação tendem a ser mais valiosas economicamente (Albertí et al., 2005). Porém, o manejo desses animais precisa suprir suas maiores exigências nutricionais por serem mais tardios, o que leva a maiores custos econômicos da atividade, principalmente, em sistemas de produção a pasto com baixo nível de tecnificação.

Conclusão

O Modelo de Brody com efeitos fixos de raça-sexo e aleatório de animal associados aos três parâmetros do modelo é o mais adequado para descrever o crescimento das quatro principais raças zebuínas criadas a pasto no Brasil. Os machos Guzerá e Tabapuã são mais precoces e os machos Nelore Mocho e Nelore demonstram mais semelhanças entre si por serem mais tardios. As fêmeas da raça Nelore e Nelore Mocho, são mais pesadas na idade adulta, com menores porcentagens de seus pesos assintóticos e menos precoces do que as Tabapuã e Guzerá, entretanto, o padrão de crescimento das quatro raças é semelhante com pequenas diferenças observadas nos ganhos médios diários. A diversidade entre as raças zebuínas, evidenciadas pelas análises multivariadas é importante dado a grande variação de mercados consumidores no Brasil e nos países importadores de carne bovinas brasileiras. Os resultados deste estudo podem auxiliar melhoristas e produtores em estratégias de manejo alimentar e definição de raça a ser utilizado, no intuito de obter maior lucratividade em regime alimentar a pasto.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB). Á

Associação de Brasileira de Criadores de Zebu (ABCZ) pela cessão dos dados.

Referências Bibliográficas

ACNB-**Associação dos Criadores de Nelore do Brasil - Caracterização Racial**. Disponível em: < <http://www.nelore.org.br/raca/caracterizacao>>. Acesso em: 15 ago. 2021.

ADAME, P.; RÍO, M. DEL; CAÑELLAS, I. A mixed nonlinear height–diameter model for pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.). **Forest Ecology and Management**, v.256, p.88-98, 2008.

ALBERTÍ, P.; RIPOLL, G.; GOYACHE, F.; LAHOZ, F.; OLLETA, J.L.; PANEA, B.; SAÑUDO, C. Carcass characterisation of seven Spanish beef breeds slaughtered at two commercial weights. **Meat Science**, v.71, p.514-521, 2005.

ALVES, R.F.S.; PEREIRA, K.D.; CARNEIRO, A.P.S.; EMILIANO, P.C.; CARNEIRO, P.L.S.; MALHADO, C.H.M.; MARTINS FILHO, R. Nonlinear mixed effects models for comparing growth curves for Guzerá cattle. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v.21, p.1-10, 2020.

ARAUJO, A.C.; CARNEIRO, P.L.S.; ARAUJO, J.I.M.; CAMPOS, B.M.; REZENDE, M.P.G.; MARTINS FILHO, R.; BRITO, L.F.; MALHADO, C.H.M. Phenotypic differences for growth, feed efficiency, and age of first calving of Brazilian zebu females. **Tropical Animal Health and Production**, v.54, p.111, 2022.

ARAUJO NETO, F.R.; OLIVEIRA, D.P.; ASPILCUETA-BORQUIS, R.R.; VIEIRA, D.A.; GUIMARÃES, K.C.; OLIVEIRA, H.N.; TONHATI, H. Selection of nonlinear mixed models for growth curves of dairy buffaloes (*Bubalus bubalis*). **The Journal of Agricultural Science**, v.158, p.218-224, 2020.

ARRÉ, F.A.; CAMPELO, J.E.G.; SARMENTO, J.L.R.; FILHO, L.A.S.F.; CAVALCANTE, D.H. A comparison of nonlinear models for describing weight-age data in anglo-nubian does. **Revista Caatinga**, v.32, p.251-258, 2019.

ARRUDA, R.M.S.; SOUZA, J.C.; JARDIM, R.J.D.; FERRAZ FILHO, P.B.; SILVA, L.O.C. Growth curves and nutritional requirements for maintenance of asymptotic weight of Nelore cattle. **Revista Ciência Agrônômica**, v.49, p.692-698, 2018.

BARROS, I.C.; MOTA, R.R.; SILVA, L.P.; CARNEIRO, P.L.S.; MARTINS FILHO, R.; MALHADO, C.H.M. Avaliação genética do crescimento de bovinos Nelore Mocho, por meio de modelos de multicaracterísticas. **Revista Ceres**, v.65, p.402-406, 2018.

BRONDANI, I.L.; SAMPAIO, A.A. M.; RESTLE, J.; ALVES FILHO, D.C.; FREITAS, L.S.; AMARAL, G.A.; SILVEIRA, M.F.; CEZIMBRA, I.M. Composição física da carcaça e aspectos qualitativos da carne de bovinos de diferentes raças alimentados com diferentes níveis de energia. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.35, p.2034-2042, 2006.

BURNHAM, K.P.; ANDERSON, D.R. Multimodel Inference. **Sociological Methods &**

Research, v.33, p.261-304, 2004.

CAMPOS, B.M.; CARMO, A.S.; EGITO, A.A.; MARIANTE, A.S.; ALBUQUERQUE, M.S.M.; GOUVEIA, J.J.S.; MALHADO, C.H.M.; VERARDO, L.L.; SILVA, M.V.G.B.; CARNEIRO, P.L.S. Genetic diversity, population structure, and correlations between locally adapted zebu and taurine breeds in Brazil using SNP markers. **Tropical Animal Health and Production**, v.49, p.1677-1684, 2017.

CARNEIRO, A.P.S.; MUNIZ, J.A.; CARNEIRO, P.L.S.; MALHADO, C.H.M.; FILHO, R.M.; E SILVA, F.F. Identidade de modelos não lineares para comparar curvas de crescimento de bovinos da raça Tabapuã. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v.49, p.57-62, 2014.

DOMÍNGUEZ-VIVEROS, J.; RODRÍGUEZ-ALMEIDA, F.A.; AGUILAR-PALMA, G.N.; CASTILLO-RANGEL, F.; SAIZ-PINEDA, J.F.; VILLEGAS-GUTIÉRREZ, C. Fitting of non-linear models to characterize the growth of five zebu cattle breeds. **Livestock Science**, v.242, p.104303, 2020.

FERNANDES JÚNIOR, G.A.; GARCIA, D.A.; HORTOLANI, B.; ALBUQUERQUE, L.G. Phenotypic relationship of female sexual precocity with production and reproduction traits in beef cattle using multivariate statistical techniques. **Italian Journal of Animal Science**, v.18, p.182-188, 2019.

FERRAZ, F.M.; SILVA, F.V.; OLIVEIRA, L.L.S.; BORGES, I.; ALVES, D.D.; ROCHA JÚNIOR, V.R. Characterization of carcasses of Zebu cattle raised in a semiarid region according to sex. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.49, p.20200044, 2020.

FREITAS, A.R. DE. Curvas de crescimento na produção animal. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.34, p.786-795, 2005.

GALEANO-VASCO, L.F.; CERÓN-MUÑOZ, M.F.; NARVÁEZ-SOLARTE, W. Ability of non-linear mixed models to predict growth in laying hens. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.43, p.573-578, 2014.

GARNERO, A.D. V.; MARCONDES, C.R.; BEZERRA, L.A.F.; OLIVEIRA, H.N.; LÔBO, R.B. Parâmetros genéticos da taxa de maturação e do peso assintótico de fêmeas da raça Nelore. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v.57, p.652-662, 2005.

GHAVI HOSSEIN-ZADEH, N. Modelling growth curve in Moghani sheep: comparison of non-linear mixed growth models and estimation of genetic relationship between growth curve parameters. **The Journal of Agricultural Science**, v.155, p.1150-1159, 2017.

GIOLO, S.R.; HENDERSON, R.; DEMÉTRIO, C.G.B. Mixed-effects growth curves in the valuation of Nelore sires. **Scientia Agricola**, v.66, p.84-89, 2009.

HOSSEIN-ZADEH, N.G.; GOLSHANI, M. Comparison of non-linear models to describe growth of Iranian Guilan sheep. **Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias**, v.29, p.199-209, 2016.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. PPM 2020:** rebanho bovino cresce 1,5% e chega a 218,2 milhões de cabeças. (2020). Disponível em: Disponível em: < <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias>>. Acesso em: 15 dez. 2021.

IBIAPINA NETO, V.; BARBOSA, F.J.V.; CAMPELO, J.E.G.; SARMENTO, J.L.R. Non-linear mixed models in the study of growth of naturalized chickens. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.49, p.1-14, 2020.

JORGE, A.M.; FONTES, C.A. DE A.; PAULINO, M.F.; GOMES JÚNIOR, P.G.; FERREIRA, J.N. Desempenho produtivo de animais de quatro raças zebuínas , abatidos em três estádios de maturidade . 1 . Ganho de peso e de carcaça e eficiência de ganho. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.27, p.766-769, 1998.

LACERDA, V.V.; CAMPOS, G.S.; ROSO, V.M.; SOUZA, F.R.P.; BRAUNER, C.C.; BOLIGON, A.A. Effect of mature size and body condition of Nelore females on the reproductive performance. **Theriogenology**, v.118, p.27-33, 2018.

LINDSTROM, M.J.; BATES, D.M. Nonlinear Mixed Effects Models for Repeated Measures Data. **Biometrics**, v.46, p.673, 1990.

LOPES, F.B.; MAGNABOSCO, C.U.; SOUZA, F.M. DE; ASSIS, A.S. DE; BRUNES, L.C. Análises de dados longitudinais em bovinos Nelore Mocho por meio de modelos não lineares. **Archivos de Zootecnia**, v.65, p.123-129, 2016.

MALHADO, C.H.M.; CARNEIRO, P.L.S.; MARTINS FILHO, R.; PEREIRA, D.G.; AFFONSO, P.R.A.M.; AZEVEDO, D.M.M.R.; SOUZA, J.C. Parâmetros e tendência genética da taxa de maturação e peso assintótico de bovinos da raça Nelore no estado da Bahia. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v.10, p.245-255, 2009.

MALHADO, C.H.M.; REZENDE, M.P.G.; MALHADO, A.C.M.; AZEVÊDO, D.M.M.R.; SOUZA, J.C.; CARNEIRO, P.L.S. Comparison of nonlinear models to describe the growth curves of Jaffarabaddi, Mediterranean and Murrah Buffaloes. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v.19, p.1485-1494, 2017.

MARINHO, K.N.S.; FREITAS, A.R.; FALCÃO, A.J.S.; DIAS, F.E.F. Nonlinear models for fitting growth curves of Nelore cows reared in the Amazon Biome. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.42, p.645-650, 2013.

MERCADANTE, M.E.Z.; LÔBO, R.B.; OLIVEIRA, H.N. Estimativas de (Co)variâncias entre características de reprodução e de crescimento em fêmeas de um rebanho Nelore. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.29, p.997-1004, 2000.

OLIVEIRA, H.N.; LÔBO, R.B.; PEREIRA, C. SILVA. Comparação de modelos não-lineares para descrever o crescimento de fêmeas da raça Guzará. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.1843-1851, 2000.

PACHECO, P.S.; SILVA, J.H.S.; RESTLE, J.; ARBOITTE, M.Z.; BRONDANI, I.L.; ALVES FILHO, D.C.; FREITAS, A.K. Características quantitativas da carcaça de novilhos jovens e superjovens de diferentes grupos genéticos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.34, p.1666-1677, 2005.

PARO DE PAZ, C.C.; VENTURINI, COSTA, G.; CONTINI, E.; COSTA, R.L.D.; LAMEIRINHA, L.P.; QUIRINO, C.R. Nonlinear models of Brazilian sheep in adjustment of growth curves. **Czech Journal of Animal Science**, v.63, p.331-338, 2018.

PEIXOTO, M.G.C.D.; SANTOS, D.J.A.; BORQUIS, R.R.A.; BRUNELI, F.Â.T.; PANETTO, J.C.C.; TONHATI, H. Random regression models to estimate genetic parameters for milk production of Guzerat cows using orthogonal legendre polynomials. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v.49, p.372-383, 2014.

PINHEIRO, J.; BATES, D. **Mixed-Effects Models in S and S-PLUS**. Statistics ed. New York: Springer-Verlag, 2000.

QUEIROZ, S.A.; FIGUEIREDO, G.; SILVA, J.A.I.V.; ESPASANDIN, A.C.; MEIRELLES, S.L.; OLIVEIRA, J.A. Estimativa de parâmetros genéticos da habilidade de permanência aos 48, 60 e 72 meses de idade em vacas da raça Caracu. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.36, p.1316-1323, 2007.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **A language and environment for statistical computing**online, 2020.

SANTIAGO, A.A. O Zebu na Índia, no Brasil e no mundo. **Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola**, p.744, 1986.

SANTORO, K.R.; BARBOSA, S.B.P.; BRASIL, L.H.A.; SANTOS, E.S. Estimativas de parâmetros de curvas de crescimento de bovinos Zebu, criados no estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.34, p.2262-2279, 2005.

SANTOS, L.H.; OLIVEIRA, S.M.P.; MALHADO, C.H.M.; CARNEIRO, P.L.S.; MARTINS FILHO, R.; LÔBO, R.N.B.; RODRIGUES, D.S. Estrutura populacional e tendências genéticas e fenotípicas da raça Guzerá no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v.13, p.1032-1043, 2012.

SARMENTO, J.L.R.; TORRES, R.A.; SOUSA, W.H.; PEREIRA, C.S.; LOPES, P.S.; BREDA, F.C. Estimacão de parâmetros genéticos para características de crescimento de ovinos Santa Inês utilizando modelos uni e multicaracterísticas. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinaria e Zootecnia**, v.58, p.581-589, 2006.

SILVA, D.O.; SANTANA, M.L.; AYRES, D.R.; MENEZES, G.R.O.; SILVA, L.O.C.; NOBRE, P.R.C.; PEREIRA, R.J. Genetic parameters for stayability to consecutive calvings in Zebu cattle. **Animal**, v.12, p.1807-1814, 2018.

SILVA, N.A.M.; LANA, A.M.Q.; SILVA, F.; SILVEIRA, F.G.; BERGMANN, J.A.G.; SILVA, M.A.; TORAL, F.L.B. Seleção e classificação multivariada de modelos de crescimento não lineares para bovinos Nelore. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v.63, p.364-371, 2011.

SOUZA, L.A.; CAIRES, D.N.; CARNEIRO, P.L.S.; MALHADO, C.H.M.; MARTINS FILHO, R. Curvas de crescimento em bovinos da raça Indubrasil criados no Estado do Sergipe. **Revista Ciência Agronômica**, v.41, p.671-676, 2010.

SUGIURA, N. Further analysts of the data by akaike' s information criterion and the

finite corrections. **Communications in Statistics - Theory and Methods**, v.7, p.13-26, 1978.

VALLE, F.R.A.F.; FONTES, C.A.A.; FERNANDES, A.M.; OLIVEIRA, T.S.; PROCESSI, E.F. Carcass traits and meat quality of Brangus \times Zebu steers in grazing systems receiving supplementation. **Scientia Agricola**, v.78, 2021.

YANG, Y.; HUANG, S.; MENG, S.X.; TRINCADO, G.; VANDERSCHAAF, C.L. A multilevel individual tree basal area increment model for aspen in boreal mixedwood stands. **Canadian Journal of Forest Research**, v.39, p.2203-2214, 2009.

IV – CAPÍTULO II

INTERAÇÃO GENÓTIPO-AMBIENTE PARA PARÂMETROS DA CURVA DE CRESCIMENTO DE BOVINOS NELORE VIA MODELOS DE NORMAS DE REAÇÃO

Resumo – Os parâmetros da curva de crescimento de bovinos são influenciados por fatores genéticos e ambientais e, provavelmente, por sua interação. Assim, avaliar a interação genótipo-ambiente (IGA) nesses parâmetros torna-se importante, visto que negligenciar a IGA pode afetar os programas de melhoramento genético. Nesse sentido, objetivou-se avaliar a existência de efeito da IGA sobre o peso assintótico (A) e taxa de maturidade (K) da curva de crescimento de bovinos da raça Nelore, utilizando modelos hierárquicos Bayesianos de normas de reação. Os dados fornecidos pela Associação Brasileira de Criadores de Zebu compreendem informações de 145252 animais para o parâmetro A e 144761 para K , nascidos entre 1970 a 2014, criados a pasto no Brasil. Foram utilizados cinco modelos, o modelo animal padrão (MA), que ignora a IGA, e os modelos hierárquicos de normas de reação com variâncias residuais homogêneas e heterogêneas com um e dois passos (MHNRRHO_{1P}, MHNRRHO_{2P}, MHNRRHE_{1P} e MHNRRHE_{2P}, respectivamente). O modelo MHNRRHO_{1P} para os dois parâmetros apresentou o melhor ajuste. As estimativas de herdabilidade no MA para A e K foram 0,45 e 0,47, respectivamente. No MHNRRHO_{1P} as herdabilidades aumentaram à medida que o ambiente melhorou, variando de 0,24 a 0,82 para A e de 0,34 a 0,87 para K ao longo do gradiente ambiental. As correlações entre o intercepto e inclinação das normas de reação para A e K foram de alta magnitude (0,95 e 0,88, respectivamente), indicando que animais com alto valor genético para os parâmetros tendem a responder positivamente aos melhores ambientes. A maioria dos reprodutores utilizados para ambos os parâmetros é robustos à variação ambiental, entretanto, quando se considera os reprodutores com maior número de progênes, verificou-se IGA, com efeito de escala para A e complexa para K , evidenciando a importância de se considerar a inclusão da IGA nas avaliações genéticas nos rebanhos de bovinos Nelore do Brasil.

Palavras-chave: avaliação genética, gradiente ambiental, regressão aleatória, peso assintótico, taxa de maturidade, modelos não lineares mistos

GENOTYPE-ENVIRONMENT INTERACTION FOR GROWTH CURVE PARAMETERS IN NELLORE CATTLE VIA REACTION NORM MODELS

Abstract – The parameters of the growth curve of cattle are influenced by genetic and environmental factors and, probably, by their interaction. Thus, evaluating the genotype-environment interaction (GEI) in these parameters becomes important, since neglecting the GEI can affect genetic improvement programs. In this sense, the objective was to evaluate the existence of an effect of the GEI on the asymptotic weight (A) and maturity rate (K) of the growth curve of Nellore cattle using Bayesian hierarchical reaction norm models. The data was provided by the Brazilian Association of Zebu Breeders and comprise information on 145,252 animals for the parameter A and 144,761 for K , which were born between 1970 and 2014 and raised on pasture in Brazil. Five models were used, the standard animal model (AM), which ignores the GEI, and the hierarchical reaction norm models with homogeneous and heterogeneous residual variances in one and two steps (MHNRRHO_{1P}, MHNRRHO_{2P}, MHNRRHE_{1P} and MHNRRHE_{2P}, respectively). The MHNRRHO_{1P} model for both parameters showed the best fit. The heritability estimates in the AM for A and K were 0.45 and 0.47, respectively. For the MHNRRHO_{1P}, heritabilities increased as the environment improved, ranging from 0.24 to 0.82 for A and from 0.34 to 0.87 for K along the environmental gradient. The correlations between the intercept and the slope of the reaction norms for A and K were of high magnitude (0.95 and 0.88, respectively), indicating that animals with high genetic value for the parameters tend to respond positively to the best environments. Most of the sires used for both parameters are robust to environmental variation, however, when considering the sires with the highest number of progenies, GEI was evidenced, with a scaling effect for A and complex for K , evidencing the importance of considering the inclusion of IGA in genetic evaluations in herds of Nellore cattle in Brazil.

Key-words: genetic evaluation, environmental gradient, random regression, asymptotic weight, maturity rate, mixed nonlinear models

Introdução

As raças zebuínas (*Bos taurus indicus*) são predominantes no país, devido à rusticidade e adaptabilidade aos diferentes ambientes de produção, que ocorre predominantemente a pasto. A raça Nelore é a mais difundida e utilizada para produção de carne, tanto como raça pura ou em cruzamentos em todo território nacional, apresentando o maior efetivo de animais (ABCZ, 2022). Por isso, é considerada uma raça importante para a pecuária de corte na região tropical e para o abastecimento de carne no cenário mundial (Carvalho et al., 2019).

O peso corporal em determinadas idades e ganhos de peso diários são variáveis de grande importância em programas de melhoramento genético de bovinos de corte. Geralmente, são usados em modelos matemáticos para modelar o crescimento dos animais via curvas de crescimento. Dentre as técnicas estatísticas utilizadas para o ajuste de curvas de crescimento, os modelos não lineares mistos vêm se tornando uma alternativa bastante utilizada em várias espécies/raças de animais (Alves et al., 2020; Araujo Neto et al., 2020; Kheirabadi & Rashidi, 2019; Ibiapina Neto et al., 2020; Sousa et al., 2021). A utilização desses modelos utilizados para mimetizar o fenômeno do crescimento dos animais, tem melhor flexibilidade para obter as estimativas dos parâmetros das curvas de crescimento dos animais, devido à possibilidade de modelar a variabilidade entre e intra indivíduos além da inclusão de efeitos aleatórios para melhor partição dos componentes de variâncias.

Adicionalmente, temos a interpretação biológica dos parâmetros da curva de crescimento, como do peso assintótico (A) e taxa de maturidade (K) que é bem conhecida e retratada em estudos de bovinos de corte. São considerados os parâmetros mais importantes nos sistemas de produção (Araujo Neto et al., 2020; Coutinho et al., 2015), sendo usados para identificar animais com maior taxa de crescimento e maior ganho de peso em idades específicas precocemente. Além disso, eles podem ser usados como critérios de seleção em programas de melhoramento genético de bovinos de corte, no intuito de alterar a forma da curva de crescimento dos animais, buscando animais precoces e peso corporal satisfatório à maturidade.

Alguns pesquisadores já estimaram parâmetros e valores genéticos para A e K em diferentes espécies/raças de animais (Coyne et al., 2015; Forni et al., 2009; Garnero et al. 2005; Ghavi Hossein-Zadeh, 2017; Lupi et al., 2016; Malhado et al., 2009; Santoro et al., 2005) e concluíram que esses parâmetros são hereditários e podem ser

usados no desenvolvimento de estratégias de seleção genética. No entanto, a interação genótipo-ambiente (IGA) não tem sido considerados na estimação dos componentes de (co)variância, utilizando um modelo animal comum (MA). A pressuposição com o uso do MA é que as características são afetadas pelos mesmos genes em diferentes ambientes (Slagboom et al., 2021). Contudo, esta abordagem pode não ser adequada, quando na realidade existem diversos ambientes de produção específicos (Ambrosini et al., 2016).

A diversidade de condições geográficas, climáticas e sistemas de produção que os animais de corte são criados no Brasil pode levar a diferentes desempenhos dos genótipos (Carvalho et al., 2019), o que caracteriza a IGA como a resposta diferenciada dos genótipos às variações das condições ambientais (Falconer & Mackay, 1996). Assim, avaliar a ocorrência da IGA nos parâmetros A e K em rebanhos zebuínos torna-se importante, pois pode alterar a classificação dos reprodutores e/ou nas variâncias (genética, residual e fenotípica) das características. Além disso, estudos da IGA podem auxiliar na escolha dos melhores reprodutores de acordo com o ambiente de produção.

Um das alternativas para estudos da IGA são os modelos de normas de reação (MNR). Tais modelos têm sido utilizados para avaliar a IGA devido ser possível modelar as características utilizando um gradiente ambiental (Ambrosini et al., 2016; De Jong, 1995; Santos et al., 2019). Além disso, o mérito genético dos animais, ou valor genético predito, pode ser obtido para cada ambiente de produção específico.

A IGA tem sido amplamente estudada em características de crescimento e reprodutivas de diferentes raças de bovinos de corte utilizando MNR no Brasil, (Ambrosini et al., 2016; Souza et al. 2016; Santos et al., 2019; Santos et al., 2020; Silva et al., 2019). No entanto, não foram encontrados estudos que abordaram a IGA nas avaliações genéticas dos parâmetros da curva de crescimento de bovinos Nelore. Dessa forma, o objetivo com o presente estudo foi avaliar a existência e potencial efeito da IGA sobre os parâmetros A e K da curva de crescimento de bovinos da raça Nelore, utilizando modelos hierárquicos Bayesianos de normas de reação.

Materiais e Métodos

Dados

Os registros de peso corporal de 240800 animais da raça Nelore foram

fornecidos pela Associação Brasileira de Criadores de Zebu (ABCZ) com informações de animais nascidos entre 1970 a 2014, criados no Brasil em regime alimentar a pasto. Os animais utilizados possuíam pelo menos três registros de pesos corporais, do nascimento aos 950 dias de idade.

Parâmetros da curva de crescimento (A e K)

A estrutura geral dos modelos de crescimento foi $y_t = \mu_{Y_t} + \varepsilon_t$, para $y_t \sim N(\mu_{Y_t}, \sigma_{Y_t}^2)$. Os parâmetros da curva de crescimento dos animais foram estimados utilizando os modelos não lineares de Richards ($\mu_{Y_t} = A(1 - Be^{-Kt})^{-m} + \varepsilon$), Brody ($\mu_{Y_t} = A(1 - Be^{-Kt}) + \varepsilon$), Logístico ($\mu_{Y_t} = A(1 - e^{-Kt})^{-1} + \varepsilon$), Von Bertalanffy ($\mu_{Y_t} = A(1 - Be^{-Kt})^3 + \varepsilon$) e Gompertz ($\mu_{Y_t} = Ae^{Be^{-Kt}} + \varepsilon$), em que μ_{Y_t} é a média populacional do peso corporal dos animais na idade t ; A é o peso assintótico (estimativa do peso adulto); B é o parâmetro de integração do animal, determinado pelos valores iniciais de y e t ; K é a taxa de maturidade; m é o parâmetro que define o ponto de inflexão da curva e ε o erro aleatório.

Os ajustes dos modelos foram feitos com uso da função *nlme* e a avaliação da heterocedasticidade foi realizada com uso do argumento *varPower* e a medida repetida no tempo foi por meio do argumento de estrutura autoregressiva contínua *corCARI* existentes na biblioteca *nlme*, implementado no software R (Pinheiro e Bates, 2000). Foi considerado o sexo como efeito fixo e os animais efeito aleatório nos modelos não lineares mistos. As estimativas dos parâmetros foram obtidas pelo o método de máxima verossimilhança e a comparação entre os modelos foi realizada pelo critério de informação de Akaike corrigido (Sugiura, 1978), bem como, as funções derivadas conforme as recomendações de Burnham e Anderson (2004).

Análise de interação genótipo-ambiente (IGA)

O modelo de Von Bertalanffy com efeito fixo de sexo e aleatório de animal associados aos parâmetros A e K do modelo, apresentou o menor valor do Akaike corrigido (análises prévias), sendo considerado o mais adequado para descrever o crescimento dos animais. Os parâmetros A e K desse modelo foram utilizados como fenótipos nas análises posteriores da IGA (Tabela 1).

O software SAS (Sas University Edition, Cary, NC, EUA, 2018) foi utilizado para preparar, formatar e descrever os dados dos parâmetros (A e K) em arquivos separados para a análise da IGA, utilizando rotinas desenvolvidas por Cardoso (2008). Os grupos de contemporâneos (GC) foram formados, considerado os efeitos de sexo, fazenda e fazenda do criador, ano e época de nascimento. As épocas de nascimento foram agrupadas em quatro classes, sendo de maio a julho; agosto a outubro; novembro a janeiro; fevereiro a abril. Foram excluídos dos bancos de dados, animais pertencentes à GC desconectados, com registros duplicados e com menos de 20 observações, animais com valores de A e K fora do intervalo de ± 3 desvios padrão da média do CG e reprodutores com menos de 10 progênes. A conectabilidade entre os GC foi avaliada usando o programa AMC (Roso & Schenkel, 2006), que considera o número de ligações genéticas (mínimo 10 laços genéticos) diretas para determinar a conectabilidade entre os GC, mantendo um arquipélago principal apenas de animais conectados. O número de animais conectados no arquipélago principal foi de 145252 e 144761 em 2970 e 2956 GC para A e K , respectivamente (Tabela 1). O Pedigree continha para A e K , 211008 e 210584 indivíduos, respectivamente.

Tabela 1. Estatísticas descritivas do peso assintótico (A) e taxa de maturidade (K) de bovinos Nelore criado a pasto no Brasil.

Parâmetro	N	Média (Desvio padrão)	Mínimo	Máximo
A (kg)	145252	441,75 \pm 108,43	265,48	583,93
K (%)	144761	0,0030 \pm 0,00094	0,0015	0,0043

N: números de animais conectados no arquipélago principal.

O Programa INTERGEN 1.2 (Cardoso, 2010) foi utilizado empregando o modelo animal padrão (MA) e modelos hierárquicos de normas de reação homocedástico e heterocedástico (MHNH). O MA, que ignora a IGA, foi usado para estimar os valores genéticos e obter as soluções dos GC, que foi utilizado como gradiente ambiental nas análises de IGA. Além disso, o MA também foi usado para comparação com os MNRH, e apresentou a seguinte estrutura para os parâmetros A e K : $y_{ij} = x_i' \beta + X_j + a_i + \varepsilon_{ij}$ (1), em que: y_{ij} é o registro do animal i no ambiente j ; β é o vetor de efeitos fixos; x_i' é o vetor de incidência dos efeitos fixos; X_j é o efeito ambiental aleatório normalmente distribuído, definido como efeitos de CG; a_i é o valor genético aditivo do animal i ; ε_{ij} é o erro aleatório.

Para os MHNR foram utilizadas duas metodologias, de forma que o valor genético dos animais foi obtido em função do nível ambiental, correspondente à solução do GC ao qual o registro pertence, isto é, para cada nível ambiental, há um valor genético específico de cada animal (Cardoso et al., 2005). A primeira metodologia foi utilizar o modelo hierárquico de normas de reação com dois passos (MHNR_{2P}) proposto por Kolmodin et al. (2002). O MHNR_{2P} usa as soluções ambientais do MA como covariáveis conhecidas em um modelo de regressão aleatória, que teve a seguinte estrutura: $y_{ij} = x_i'\beta + \phi\widehat{X}_j + a_i + b_{ai}\widehat{X}_j + \varepsilon_{ij}$ (2), em que: ϕ é o coeficiente de regressão linear fixo de y_{ij} em \widehat{X}_j ; a_i é o valor genético aditivo direto do intercepto ou nível da norma de reação do animal i ; b_{ai} é o coeficiente de regressão aleatório ou inclinação da norma de reação direta do animal i no ambiente representando por \widehat{X}_j ; \widehat{X}_j é o preditor de X_j obtido no MA e ε_{ij} é o erro residual. Os outros termos foram descritos no (1). A segunda metodologia foi utilizar o modelo hierárquico de normas de reação em um passo (MHNR_{1P}) proposta por Su et al. (2006), que apresenta estimação simultânea para as soluções dos GC (X_j) e predição das normas de reação, com a seguinte estrutura: $y_{ij} = x_i'\beta + X_j + a_i + b_{ai}X_j + \varepsilon_{ij}$ (3). Os termos foram descritos anteriormente no (1) e (2).

Duas diferentes pressuposições foram utilizadas para a variância residual nos modelos, sendo esta a de homocedasticidade para MA, MHNR_{1P} (MHNRHO_{1P}) e MHNR_{2P} (MHNRHO_{2P}), com $e_i \sim N(0, \sigma_e^2)$; e de heteroscedasticidade para os modelos MHNR_{2P} (MHNRE_{2P}) e MHNR_{1P} (MHNRE_{1P}), com $e_i \sim N(0, \sigma_{e_{ij}}^2)$ (Ambrosini et al., 2016; Cardoso et al., 2005).

As estimativas dos componentes de variância foram obtidas usando inferência Bayesiana, utilizando o amostrador de *Gibbs*, por meio de métodos de Monte Carlo via cadeias de Markov (MCMC). Para os modelos heterocedásticos, foi necessária uma aplicação do algoritmo *Metropolis-Hastings* para estimação dos componentes de variância, semelhante à Ambrosini et al. (2016). Uma análise-piloto foi realizada com aproximadamente, 55000 iterações, 5500 de *burn-in* e salvamento a cada cinco amostras (*thin*). Posteriormente, com o pacote BOA - *Bayesian output analysis* (Smith, 2007), em linguagem R (R Development Core Team, 2016), foi aplicado o teste de Raftery & Lewis, (1992) para a determinação de um novo tamanho de cadeia e período de salvamento e o período de descarte (*burn-in*) foi avaliado segundo o critério de Heidelberger & Welch (1983). Estes procedimentos foram repetidos até alcançar a

convergência das cadeias. As médias, desvios padrão e percentis a *posteriori* dos parâmetros foram obtidos das densidades marginais posteriores pelo procedimento *KDE* (*Kernel Density Estimator*) do SAS®. A convergência das cadeias foi observada pelo teste de Geweke (Geweke, 1992) no pacote BOA.

As estimativas das variâncias genéticas aditivas diretas no ambiente X ($\sigma_a^2|X$) e as herdabilidades diretas no ambiente X ($h_a^2|X$) foram obtidas por: $\sigma_a^2|X = \text{var}(a_i + b_{1i}X_j) = \sigma_a^2 + \sigma_b^2X^2 + 2\sigma_{a,b}X$ e $h_a^2|X = \sigma_a^2|X/\sigma_a^2|X + \sigma_e^2|X$, em que: $\sigma_e^2|X$ é a variância residual no ambiente X, obtida por σ_e^2 no modelo homocedástico e $\sigma_e^2|X = \sigma_e^2\eta^X$ no modelo heteroscedástico simplificado, sendo η variância do parâmetro de heterogeneidade de variância residual no gradiente ambiental (X), seguindo a estrutura do modelo proposto por Cardoso et al. (2005).

Os critérios adotados para a comparação dos modelos (MA, MHNRRHO_{2P}, MHNRRHO_{1P}, MHNRRHE_{2P} e MHNRRHE_{1P}) foram os seguintes: critério de informação da Deviance (DIC), Deviance baseada na ordenada preditiva condicional (OPC) e Deviance baseada no fator de Bayes (DFB). Menores valores indicam melhor ajuste ao modelo.

A correlação de Spearman foi utilizada para avaliar a classificação dos reprodutores entre os ambientes de baixo, médio e alto nível de produção do melhor modelo, com o intuito de verificar a ocorrência de reordenação entre os reprodutores no A e K. Além disso, os reprodutores foram classificados de acordo com o desvio padrão e a média da inclinação da norma de reação, em extremamente robusto ($|b_j| < \sigma_b$), robusto ($\sigma_b \leq |b_j| < 2\sigma_b$), plástico $2\sigma_b \leq |b_j| < 3\sigma_b$ e extremamente plástico ($|b_j| \leq 3\sigma_b$) (Ambrosini et al., 2016).

Resultados

Os modelos MA e MHNRRHO_{1P} apresentaram convergência das cadeias ($P > 0,05$) de probabilidade pelo teste Geweke (1992) para A e K. Os modelos que consideram a heterogeneidade das variâncias residuais em um e dois passos (MHNRRHE_{1P} e MHNRRHE_{2P}, respectivamente) e homogeneidade da variância residual em dois passos (MHNRRHO_{2P}) não convergiram. De acordo com os critérios DIC, PCO e DBF, o MHNRRHO_{1P} apresentou o melhor ajuste para A e K, comparado ao MA.

As amplitudes das soluções dos GC para a definição do gradiente ambiental

variaram de $-154,40$ a $143,41$ para A e $-1,39$ a $1,25$ para K , caracterizando os ambientes de baixo a alto nível de manejo, respectivamente, sendo o valor zero o ambiente de produção médio. As estimativas de herdabilidade no MA para A e K foram de $0,45 \pm 0,08$ e $0,47 \pm 0,01$, respectivamente. No $MHNRHO_{1P}$ os valores de herdabilidade no ambiente de médio e alto nível de manejo foram maiores (altas magnitudes) que no MA e variaram de $0,24 \pm 0,01$ a $0,82 \pm 0,003$ para A e de $0,34 \pm 0,01$ a $0,87 \pm 0,002$ para K ao longo do gradiente ambiental (Figura 1).

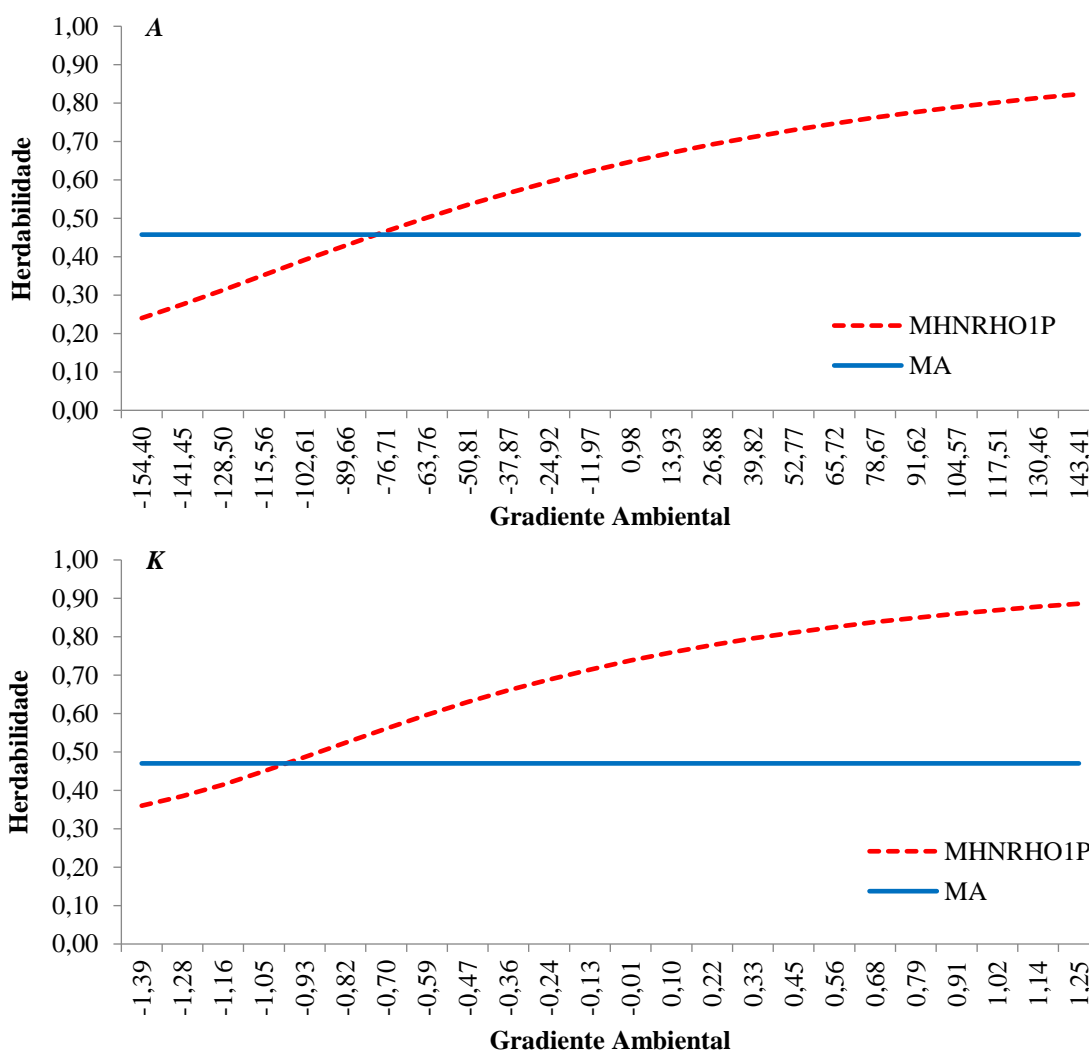


Figura 1. Herdabilidade dos parâmetros A (peso assintótico) e K (taxa de maturidade) de bovinos da raça Nelore criados a pasto no Brasil, estimada pelos modelos MA e $MHNRHO_{1P}$ ao longo do gradiente ambiental.

As correlações de Spearman entre os valores genéticos preditos dos reprodutores nos ambientes baixo, médio e alto do $MHNRHO_{1P}$ para A e K variaram de 0,93 a 0,99 e de 0,52 a 0,99, respectivamente (Figura 2). Os valores das correlações para A entre os

ambientes foram positivas e de alta magnitude e para K , foram positivas e de moderada a alta magnitude, evidenciando mudanças de classificação, principalmente, na comparação entre o ambiente baixo e alto nível de manejo. A correlação entre os ambientes médio e alto foi acima de 0,98 para ambos os parâmetros avaliados.

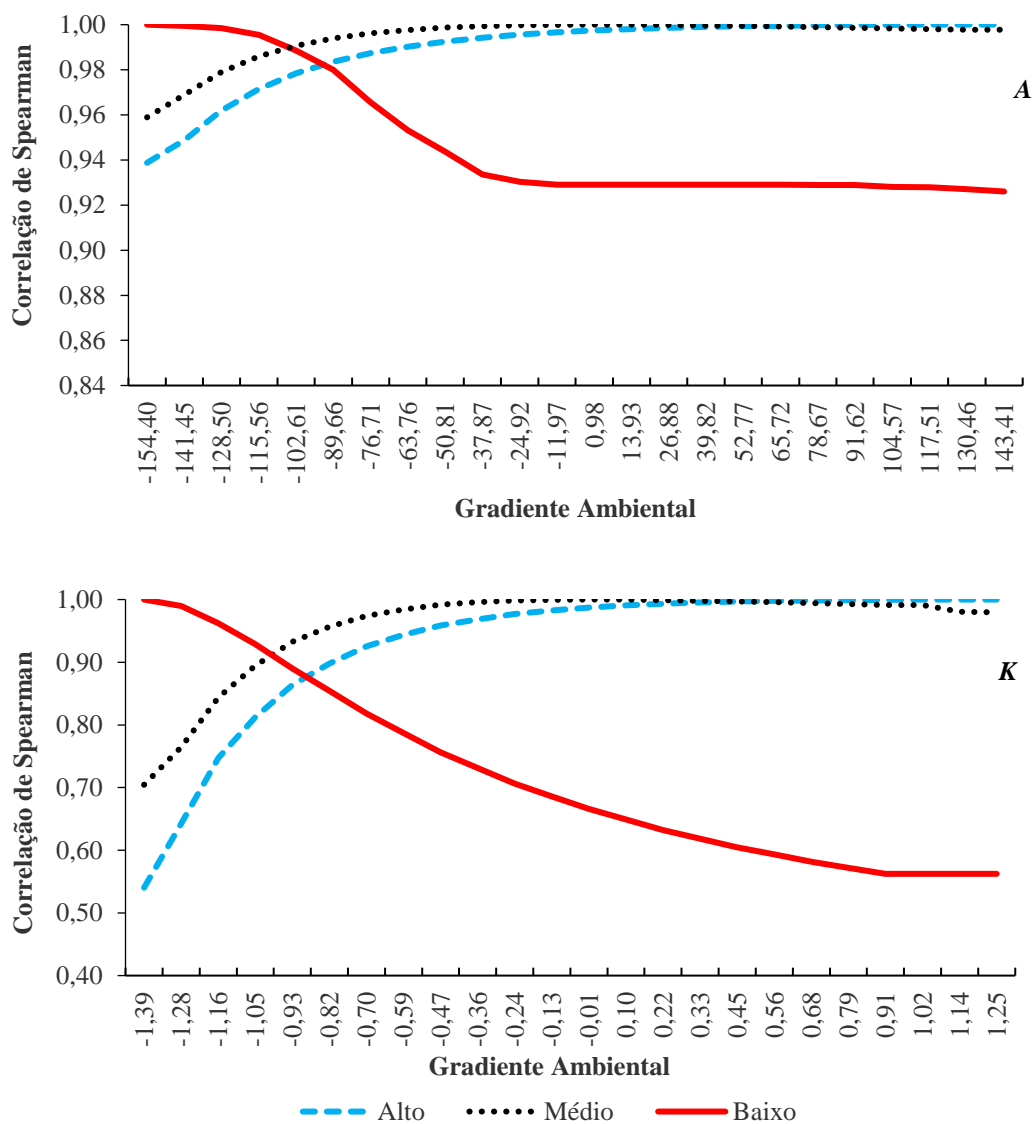


Figura 2. Correlações de Spearman entre os valores genéticos preditos dos reprodutores para os parâmetros A (peso assintótico) e K (taxa de maturidade) obtidas pelo MHNHRHO_{1P} nos diferentes níveis ambientais (baixo, médio, alto), em bovinos Nelore criados a pasto no Brasil.

As estimativas médias *a posteriori* das correlações entre o intercepto e inclinação das normas de reação foram altas e de 0,95 e 0,88 para A e K, respectivamente. Além disso, as normas de reação dos 10 reprodutores com maiores números de progênes para A ao longo do gradiente ambiental sugere a presença de

IGA, com efeito escala, apresentando poucas alterações na classificação dos reprodutores (Figura 3). Para K , houve maior ocorrência de reclassificação dos animais, principalmente, nos ambientes baixo e médio com a melhoria do ambiente (favorável), o que indica IGA complexa. Observou-se ainda para os parâmetros maiores variações entre os valores genéticos dos reprodutores nos ambientes de médio e alto nível de produção.

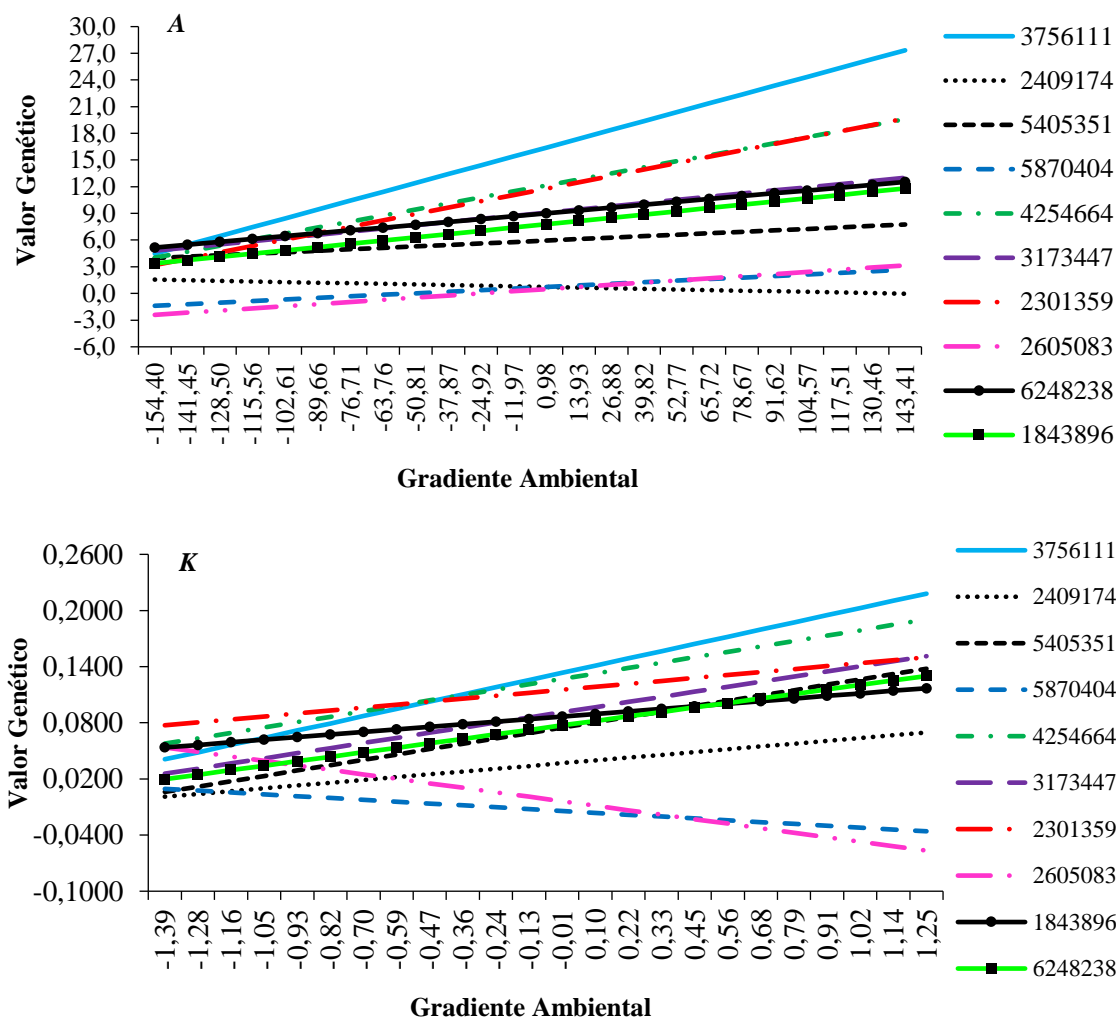


Figura 3. Normas de reação ambientais para os parâmetros A (peso assintótico) e K (taxa de maturidade) obtidas para os 10 reprodutores Nelore com maior número de progênie no Brasil.

O desvio padrão da inclinação da norma de reação (b_j) foram de 0,022 e 0,030 para A e K , respectivamente. A maioria dos reprodutores apresentaram baixa sensibilidade ambiental para ambos os parâmetros, com mais de 70% dos genótipos extremamente robustos, seguidos dos robustos com mais de 24% e abaixo de 5% com genótipos plásticos ou extremamente plásticos (Figura 4).

Dos 10 reprodutores com maior número de progênes para *A*, um é robusto e nove extremamente robustos. Já para *K*, um é plástico, três robustos e seis extremamente robustos (Figuras 3 e 4).

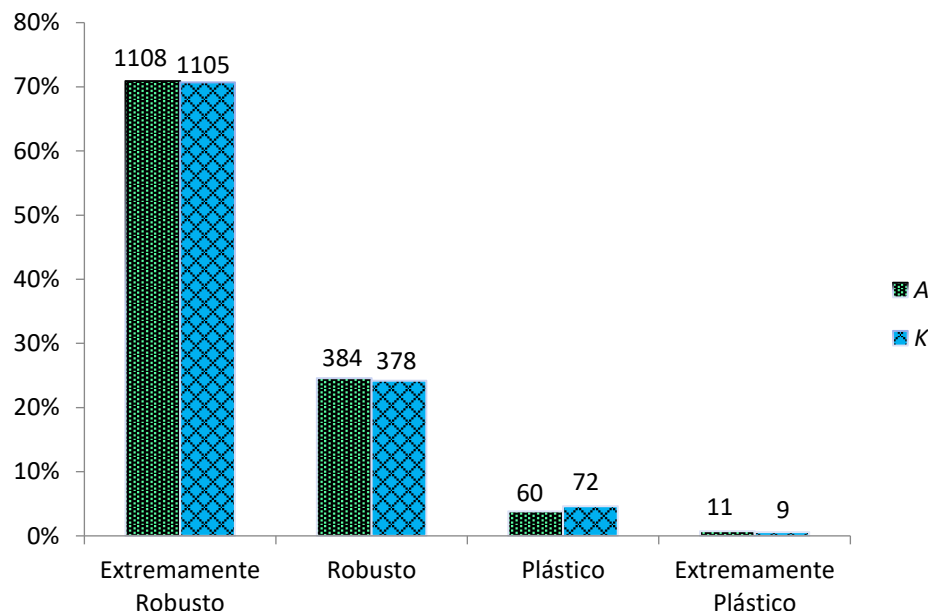


Figura 4. Porcentagem de reprodutores Nelore com genótipos extremamente robustos, robustos, plásticos e extremamente plásticos para os parâmetros *A* (peso assintótico) e *K* (taxa de maturidade).

As médias de progênes por reprodutor para *A* e *K* foram maiores para os classificados como robustos (robusto e extremamente robusto) comparados aos reprodutores plásticos (plástico e extremamente plástico). Houve maior variação dos valores genéticos médios no gradiente ambiental dos genótipos classificados como plásticos do que os robustos para os parâmetros avaliados (Tabela 2).

Tabela 2. Número médio de progênes e valor genético médio nos diferentes ambientes e genótipos.

Genótipo	Número de reprodutores	Média progênes	Valor genético médio por ambiente		
			Baixo	Médio	Alto
Peso assintótico (<i>A</i>)					
R e ER	1492	188,95	-0,16	-0,42	-0,66
P e EP	71	114,53	-3,41	-10,21	-16,45
Taxa de maturidade (<i>K</i>)					
R e ER	1483	186,79	-0,0024	0,0060	0,0145
P e EP	81	48,60	-0,0126	0,0173	0,0534

R: robusto; ER: extremamente robusto; P: plástico; EP: extremamente plástico.

Discussão

O melhor ajuste do $MHNRHO_{IP}$ em relação aos outros, tem sido bastante observado em características de crescimento e reprodutivas de diferentes raças de bovinos de corte (Ambrosini et al., 2016; Santos et al., 2019; Santos et al., 2020; Silva et al., 2019; Souza et al., 2016), evidenciando que é mais adequado estimar os efeitos do ambiente simultaneamente aos outros parâmetros do modelo, como proposto por Su et al. (2006). Essa estratégia elimina a possibilidade de predição tendenciosa do mérito genético dos animais para as características de interesse.

O uso da heterogeneidade de variâncias residuais proporciona melhor partição da variação total, no entanto, podem ocorrer problemas de convergência devido ao maior número de parâmetros a serem estimados (Santos et al., 2019), fato que também foi observado em nosso estudo. Além disso, as matrizes de incidência desses modelos são mais densas e a estrutura de covariâncias fica mais complexa, dificultando a convergência de forma proporcional ao aumento do conjunto de dados (El Faro & Albuquerque, 2003), resultando em maior tempo computacional. Por outro lado, a pressuposição de homogeneidade de variâncias residuais, geralmente, tende a proporcionar melhores ajustes (Ambrosini et al., 2014). Os modelos com essa pressuposição têm sido recomendados, principalmente quando os reprodutores e matrizes avaliados possuem progênes em rebanhos diferentes (Araujo et al., 2009), o que minimiza os efeitos da heterogeneidade de variâncias sem prejudicar a estimativa dos parâmetros genéticos das características de interesse econômico.

As estimativas de herdabilidade para A e K (Figura 1) indicaram que a seleção é possível e resultará em progresso genético no rebanho. Além disso, melhores respostas à seleção podem ser alcançadas quando praticadas nos ambientes de melhor nível de produção, em razão das altas magnitudes das herdabilidades obtidas ($MHNRHO_{IP}$). Dessa forma, dependendo do objetivo é possível mudar ou alterar os parâmetros da curva de crescimento de bovinos de corte, por seleção, para melhor identificar animais precoces com peso corporal satisfatório à maturidade.

O aumento das herdabilidades nos ambientes de melhor nível de produção observado no $MHNRHO_{IP}$ é possível, pois a maior proporção da variação fenotípica pode ser devida a fatores genéticos, como mencionado por Cardoso et al. (2011). Além disso, as condições necessárias nesses ambientes podem proporcionar aos animais uma

expressão maior de seu potencial genético, conseqüentemente, aumentar excessivamente as magnitudes das herdabilidades. Esse comportamento, também, tem sido observado em diversos estudos de características de crescimento em bovinos de corte (Ambrosini et al., 2016; Corrêa et al., 2009; Mattar et al., 2011; Santos et al., 2019; Zubler et al., 2021).

Vale ressaltar que são comuns estudos utilizando somente o MA para os parâmetros da curva de crescimento de bovinos Nelore, obtidos de diferentes modelos não lineares tradicionais. Dentre os estudos, alguns mostraram estimativas de herdabilidades variando de baixa à alta magnitude (Garnero et al., 2005; Garnero et al., 2013; Lopes et al., 2012; Malhado et al., 2009; Santoro et al., 2005), com valores variando de 0,10 a 0,46 para A e de 0,14 a 0,48 para K . Essas variações entre as herdabilidades podem está relacionadas à presença da IGA que é, geralmente, ignorada no processo das análises via MA, além da metodologia e banco de dados de tamanhos diferentes, como relatados por Garnero et al. (2013).

As altas correlações de Spearman para A entre as classificações dos reprodutores no $MHNRHO_{1P}$ entre todos os ambientes (Figura 2), indicam que os animais selecionados em um nível de produção poderiam também demonstrar bom desempenho nos outros ambientes, sugerindo ausência de problemas na escolha dos animais em função da IGA. Resultado semelhante foi relatado por Mattar et al. (2011) para peso ao sobreano em bovinos Canchim, caracterizando efeito escala como a forma de IGA. Para K , alguns animais selecionados no ambiente de baixo nível podem não ser recomendados para uso em ambientes de médio e alto nível de produção, devido às correlações de Spearman de moderada a alta, observadas no $MHNRHO_{1P}$. Sendo um indicativo de identificação de genótipos mais adequados para cada ambiente de produção. Segundo Ambrosini et al. (2016), mesmo que as correlações sejam moderadas, podem haver mudanças importantes na classificação dos reprodutores que podem comprometer ganhos. Isso torna-se especialmente importante na pecuária atual, em que os custos de produção são cada vez maiores e tudo que possa melhorar a eficiência de produção deve ser considerada.

As correlações entre intercepto e inclinação das normas de reação mostraram que os animais com alto valor genético para os parâmetros, principalmente, para A , tendem a responder positivamente aos melhores ambientes. Estimativas altas de correlações entre o intercepto e inclinação são indicativas de presença de IGA, com efeito de escala (Falconer & Mackay, 1996). Já as mais baixas indicam IGA complexa

com reclassificação dos animais (Pegolo et al., 2011) ao longo do gradiente ambiental. É importante lembrar que a IGA, com efeito escala não leva a escolha equivocada de reprodutores, mas a IGA complexa sim.

Os efeitos da IGA sobre A e K para os 10 reprodutores com maior número de progênes, evidenciou a importância da inclusão desse efeito nas avaliações genéticas, mais especialmente para K , visto que os genótipos com IGA complexa para A foram poucos. Avaliações genéticas sem considerar a IGA podem levar à utilização equivocada de reprodutores, prejudicando assim a seleção de animais precoces com peso corporal favorável à maturidade, o que pode gerar prejuízos econômicos para a bovinocultura de corte. Adicionalmente, essa importância se dá por esses parâmetros serem comumente utilizados como ferramenta de auxílio na busca de animais precoces com peso corporal favorável em idades específicas e estarem diretamente ligados à relação custo/benefício da atividade em diversas espécies/raças de animais.

Em geral, a IGA ocorre quando os ambientes em que vivem os animais interferem na sua capacidade de expressar seu potencial genético. No entanto, o ambiente não altera a constituição genética de um indivíduo, mas sim a expressão do genoma, pois o melhor genótipo em um ambiente pode não ser em outro (Warwick & Legates, 1980), sendo esse tipo de interação (complexa) a mais grave. Dessa forma, ao identificar a IGA e sua intensidade (efeito), torna-se possível prever o desempenho dos animais ao longo do gradiente ambiental, oferecendo maior segurança na aquisição do material genético para um ambiente de produção de interesse específico.

As mudanças da inclinação da norma de reação estão diretamente relacionadas à IGA e refletem a sensibilidade ambiental dos genótipos na resposta ao ambiente. Essa sensibilidade ambiental, conhecida também como plasticidade fenotípica, constitui as mudanças fenotípicas observadas por genótipos em ambientes distintos, sendo os indivíduos mais sensíveis denominados genótipos plásticos e os de menor sensibilidade os robustos ou estáveis (Falconer, 1990).

Os genótipos robustos foram os mais utilizados pelos produtores (Tabela 2). Esses reprodutores demonstram poucas variações nos seus valores genéticos ao longo do gradiente ambiental, apresentando maiores valores genéticos para A , ou seja, produzem progênes tardias com maiores pesos corporais à maturidade. Já os plásticos podem ser utilizados na busca de animais mais precoces, principalmente, nos ambiente médio e alto nível de produção. Isso evidenciou que para a raça Nelore tem se utilizado de forma intensa reprodutores que transmitem maior peso corporal adulto e não

sensíveis aos ambientes produção. No entanto, o que se busca nos últimos anos são animais precoces com menor peso corporal na idade adulta e mais viáveis economicamente, o que pode reduzir o ciclo de produção, devido permanecem menos tempos nos sistemas de criação.

O aumento nos valores genéticos para K com a melhoria do ambiente de produção, foi observado tanto para os genótipos plásticos e robustos. Contudo, os maiores valores genéticos observados para os plásticos com a melhoria do ambiente de criação, indicam que esses reprodutores podem transmitir maior precocidade se forem selecionados para os ambientes de alto nível de produção.

Provavelmente, o maior uso de reprodutores robustos, esteja relacionado com alguns fatores como, a não consideração da IGA nas avaliações genéticas das características de interesse econômico em bovinos de corte, as preferências dos pecuaristas por reprodutores com base somente na diferença esperada na progênie (DEP) para peso corporal e maior disponibilidade do próprios genótipos famosos disponível no mercado com grande quantidade de doses de sêmen. Além disso, Santos et al. (2019) afirmaram que esse fato pode ser devido a menor sensibilidade dos genótipos robustos as mudanças ambientais que é muitas vezes interpretado de forma equivocada, trazendo a ideia de que são melhores devido manterem seu potencial genético mesmo em ambientes distintos.

Na busca de genótipos altamente produtivos e estáveis para a maioria dos sistemas de produção, tem sido indicado a seleção de animais robustos que apresentam bom desempenho independente do gradiente ambiental, no entanto, é difícil para um animal apresentar altas DEP em diferentes gradientes ambientais (Rezende et al., 2020). Nesse contexto, a utilização de genótipos robustos deve ser feito com cuidado em bovinos de corte. Isso devido alguns estudos já terem demonstrado que estes genótipos tendem a ser menos produtivos (Ambrosini et al., 2014; 2016; Cardoso & Tempelman, 2012; Mattar et al., 2011; Santos et al., 2019) do que os plásticos, principalmente, nos ambientes que propiciam a expressão máxima do potencial genético (Santos et al., 2019; Silva et al., 2019). Segundo Rezende et al. (2020), em situações específicas, recomenda-se a utilização de reprodutores plásticos, pois podem ser utilizados em ambientes específicos, para corrigir e/ou melhorar os índices produtivos e reprodutivos dos rebanhos de corte.

Conclusão

As estimativas de herdabilidades aumentaram com a melhoria ambiental e evidenciou que a seleção para os parâmetros das curvas de crescimento é possível e resultará em progresso genético, principalmente, nos ambientes de melhor manejo de produção. Existe IGA para os parâmetros avaliados da curva de crescimento de bovinos da raça Nelore do Brasil, com efeito de escala para A , com pouca reclassificação dos reprodutores e complexa para K , evidenciando a importância de se considerar a inclusão deste efeito nas avaliações genéticas nos rebanhos de corte dessa raça. Os reprodutores mais utilizados são robustos que transmitem maior peso adulto e menor precocidade, mas existem reprodutores plásticos, em menor proporção, que permitem a seleção de animais precoces de acordo com o ambiente de produção.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB). À Associação de Brasileira de Criadores de Zebu (ABCZ) pela cessão dos dados.

Referências Bibliográficas

ABCZ. **Associação Brasileira de Criadores de Zebu**. 2022. Disponível em <<https://www.abcz.org.br/a-abcz/racas-zebuinas>> Acesso em 20 de fev. de 2022.

ALVES, R.F.S.; PEREIRA, K.D.; CARNEIRO, A.P.S.; EMILIANO, P.C.; CARNEIRO, P.L.S.; MALHADO, C.H.M.; MARTINS FILHO, R. Nonlinear mixed effects models for comparing growth curves for Guzará cattle. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v.21, p.1-10, 2020.

AMBROSINI, D.P.; CARNEIRO, P.L.S.; BRACCINI NETO, J.; MARTINS FILHO, R.; AMARAL, R.S.; CARDOSO, F.F.; MALHADO, C.H.M. Reaction norms models in the adjusted weight at 550 days of age for Polled Nelore cattle in Northeast Brazil. **Revista Brasileira de Zootecnia**. v.43, p.351-357, 2014.

AMBROSINI, D.P.; MALHADO, C.H.M.; FILHO, R.M.; SOUZA CARNEIRO, P.L. Interação genótipo x ambiente via modelos de normas de reação para características de crescimento em bovinos nelore. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, p.177-186, 2016.

ARAÚJO, C.V.; RESENDE, G.S.A.; ARAÚJO, S.I.; RENNÓ, F.P.; TOMAZINI,

A.P.I.; MARQUES, J.R.F. Interação genótipo x ambiente para produção de leite na raça Pardo Suíço, utilizando-se inferência Bayesiana. **Acta Scientiarum Animal Science**, v.31, p.205-211, 2009.

ARAUJO NETO, F.R.; OLIVEIRA, D.P.; ASPILCUETA-BORQUIS, R.R.; VIEIRA, D.A.; GUIMARÃES, K.C.; OLIVEIRA, H.N.; TONHATI, H. Selection of nonlinear mixed models for growth curves of dairy buffaloes (*Bubalus bubalis*). **The Journal of Agricultural Science**, v.158, p.218-224, 2020.

BURNHAM, K.P.; ANDERSON, D.R. Multimodel Inference. **Sociological Methods & Research**, v.33, p.261-304, 2004.

CARDOSO, L.L.; BRACCINI NETO, J.; CARDOSO, F.F.; COBUCCI, J.A.; BIASSUS, I.O. e BARCELLOS, J.O.J. Hierarchical Bayesian models for genotype \times environment estimates in post-weaning gain of Hereford bovine via reaction norms. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.40, p.294-300, 2011.

CARDOSO, F. F. **Manual de utilização do Programa INTERGEN – Versão 1.0 em estudos de genética quantitativa animal**. Bagé: Embrapa Pecuária Sul, 75p. (Documentos, 74), 2008.

CARDOSO, F.F., ROSA, G.J.M. e TEMPELMAN, R.J. Multiple-breed genetic inference using heavy tailed structural models for heterogeneous residual variances. **Journal of Animal Science**, v.83, p.1766-1779, 2005.

CARDOSO, F.F. **Aplicação da Inferência Bayesiana no Melhoramento Animal Usando o Programa INTERGEN Versão 1,2**. Bagé: Embrapa Pecuária Sul, 34p. (Documentos, 111), 2010.

CARDOSO, F.F.; TEMPELMAN, R.J. Linear reaction norm models for genetic merit prediction of Angus cattle under genotype by environment interaction. **Journal of Animal Science**. v.90, p.2130-41, 2012.

CARVALHO, C.V.D.; COSTA, R.B.; CAMARGO, G.M.F.; BITTENCOURT, T.C.C. Genotype x environment interaction for reproductive traits in Brazilian Nelore breed cattle. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v.20, p.1-13, 2019.

CORRÊA, M.B.B.; DIONELLO, N.J.L.; CARDOSO, F.F. Caracterização da interação genótipo-ambiente e comparação entre modelos para ajuste do ganho pós-desmama de bovinos Devon via normas de reação. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.38, p.1460-1467, 2009.

COUTINHO, C.C.; MERCADANTE, M.E.Z.; JORGE, A.M.; PAZ, C.C.P.; EL FARO, L.; MONTEIRO, F.M. Growth curves of carcass traits obtained by ultrasonography in three lines of Nelore cattle selected for body weight. **Genetics and Molecular Research**, v.14, p.14076-14087, 2015.

COYNE, J.M.; BERRY, D.P.; MÄNTYSAARI, E.A.; JUGA, J.; MCHUGH, N. Comparison of fixed effects and mixed model growth functions in modelling and predicting live weight in pigs. **Livestock Science**, v.177, p.8-14, 2015.

DE JONG, G. Phenotypic plasticity as a product of selection in a variable environment.

The American Naturalist, v.145, p.493-512, 1995.

El Faro, L.; Albuquerque, L.G. Utilização de Modelos de Regressão Aleatória para Produção de Leite no Dia do Controle, com Diferentes Estruturas de Variâncias Residuais, **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.32, p.1104-1113, 2003.

FALCONER, D.S. Selection in different environments: Effects on environmental sensitivity (reaction norm) and on mean performance. **Genetical Research**, v.56, p.57-70, 1990.

FALCONER, D.S.; MACKAY, T.F.C. **Introduction to Quantitative Genetics**. Longman Group. 4a ed. Essex, UK. 1996.

FORNI, S.; PILES, M.; BLASCO, A.; VARONA, L.; OLIVEIRA, H.N.; LÔBO, R.B.; ALBUQUERQUE, L.G. Comparison of different nonlinear functions to describe Nelore cattle growth. **Journal of Animal Science**, v.87, p.496-506, 2009.

GARNERO, A.D.V.; MARCONDES, C.R.; BEZERRA, L.A.F.; OLIVEIRA, H.N.; LÔBO, R.B. Parâmetros genéticos da taxa de maturação e do peso assintótico de fêmeas da raça Nelore. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v.57, p.652-662, 2005.

Garnero, A.D.V.; Marcondes, C.R.; Araújo, R.O.D.; Oliveira, H.N.D.; Lôbo, R.B. Inferência bayesiana aplicada à estimação de herdabilidades dos parâmetros da curva de crescimento de fêmeas da raça Nelore. **Ciência Rural**, v.43, p.702-708, 2013.

GEWEKE J. Evaluating the accuracy of sampling-based approaches to the calculations of posterior moments. **Bayesian Statistics**, v.4, p.641-649, 1992.

GHAVI HOSSEIN-ZADEH, N. Modelling growth curve in Moghani sheep: comparison of non-linear mixed growth models and estimation of genetic relationship between growth curve parameters. **The Journal of Agricultural Science**, v.155, p.1150-1159, 2017.

HEIDELBERGER, P.; WELCH, P.D. Simulation run length control in the presence of an initial transient. **Operations Research**, v.31, p.1109-1144, 1983.

IBIAPINA NETO, V.; BARBOSA, F.J.V.; CAMPELO, J.E.G.; SARMENTO, J.L.R. Non-linear mixed models in the study of growth of naturalized chickens. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.49, p.1-14, 2020.

KHEIRABADI, K.; RASHIDI, A. Modelling and genetic evaluation of Markhoz goat growth curve parameters. **Small Ruminant Research**, v.170, p.43-50, 2019.

KOLMODIN, R.; STRANDBERG, E.; MADSEN, P.; JENSEN, J.; JORJANI, H. Genotype by environment interaction in Nordic dairy cattle studied using reaction norms. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section A - Animal Science**, v.52, p.11-24, 2002.

LOPES, F.B.; SILVA, M.C.; MARQUES, E.G.; MCMANUS, C.M. Analysis of longitudinal data of beef cattle raised on pasture from northern Brazil using nonlinear models. **Tropical Animal Health and Production**, v.44, p. 1945-1951, 2012.

LUPI, T.M.; LEÓN, J.M.; NOGALES, S.; BARBA, C.; DELGADO, J.V. Genetic parameters of traits associated with the growth curve in Segureña sheep. **Animal**, v.10, p.729-735, 2016.

MALHADO, C.H.M.; CARNEIRO, P.L.S.; MARTINS FILHO, R.; PEREIRA, D.G.; AFFONSO, P.R.A.M.; AZEVEDO, D.M.M.R.; SOUZA, J.C. Parâmetros e tendência genética da taxa de maturação e peso assintótico de bovinos da raça Nelore no estado da Bahia. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v.10, p.245-255, 2009.

MATTAR, M.; SILVA, L.O.C.; ALENCAR, M.M.; CARDOSO, F.F. Genotype \times environment interaction for long-yearling weight in Canchim cattle quantified by reaction norm analysis1. **Journal of Animal Science**, v.89, p.2349-2355, 2011.

PEGOLO, N.T.; ALBUQUERQUE, L.G.; LÔBO, R.B.; OLIVEIRA, H.N. Effects of sex and age on genotype \times environment interaction for beef cattle body weight studied using reaction norm models. **Journal Animal Science**, v.89, p.3410-3425, 2011.

PINHEIRO, J.; BATES, D. **Mixed-Effects Models in S and S-PLUS**. Statistics ed. New York: Springer-Verlag, 2000.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria, 2016. Disponível em: <<http://www.rproject.org/>>. Acesso em: nov. 2020.

RAFTERY, A.E.; LEWIS, S.M. One longrun with diagnostics: Implementation strategies for Markov Chain Monte Carlo. **Statistical Science**. v.7, p.493-497, 1992.

REZENDE, M.P.G.; MALHADO, C.H.M.; BIFFANI, S.; CARNEIRO, P.L.S.; CARRILLO, J.A.; BOZZI, R. Genotype-environment interaction for age at first calving in Limousine and Charolais cattle raised in Italy, employing reaction norm model. **Livestock Science**, v.232, p.103912, 2020.

ROSO, V. M.; SCHENKEL, F.S. AMC – A computer program to assess the degree of connectedness among contemporary groups. **In: 8th World Congresson Genetics Applied to Livestock Production**, Belo Horizonte, MG, Brasil. p communication no 27-26, 2006.

SANTOS, J.; MALHADO, C.H.; AMBROSINI, D.; FILHO, R.; ARAUJO, A.; CARNEIRO, P.L. Normas de reação para peso aos 365 e 550 dias de idade em bovinos Guzerá no nordeste do Brasil. **Archivos de Zootecnia**, v.68, p.562-570, 2019.

SANTOS, J.C.; MALHADO, C.H.M.; CARNEIRO, P.L.S.; REZENDE, M.P.G.; COBUCI, J.A. Genotype-environment interaction for age at first calving in Holstein cows in Brazil. **Veterinary and Animal Science**, v.9, p.100098, 2020.

SANTORO, K.R.; BARBOSA, S.B.P.; BRASIL, L.H.A.; SANTOS, E.S. Estimativas de parâmetros de curvas de crescimento de bovinos Zebu, criados no estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.34, p.2262-2279, 2005.

SAS. Free Statistical Software, SAS University Edition. Disponível em: <http://www.sas.com/en_us/software/university-edition.html>. Acesso em: 20 nov 2018.

SLAGBOOM, M.; SØRENSEN, A.C.; THOMASEN, J.R.; LIU, H.; KARGO, M.; HJORTØ, L. Ignoring genotype by environment interaction in the genetic evaluation of dairy cattle reduces accuracy but may increase selection intensity. **Journal of Dairy Science**, v.104, p.12756-12764, 2021.

SILVA, T.L.; CARNEIRO, P.L.S.; AMBROSINI, D.P.; LÔBO, R.B.; FILHO, R.M.; MALHADO, C.H.M. Genotype-environment interaction in the genetic variability analysis of reproductive traits in Nellore cattle. **Livestock Science**, v.230, p.103825, 2019.

SMITH, B. J. **Bayesian output analysis program (BOA)** version 1.1.7.2 User's manual. University of Iowa, Iowa, 2007.

SOUSA, V.C.; BIAGIOTTI, D.; SARMENTO, J.L.R.; SENA, L.S.; BARROSO, P.A.; BARJUD, S.F.L.; ALMEIDA, M.K.S.; SANTOS, N.P.S. Nonlinear mixed models for characterization of growth trajectory of New Zealand rabbits raised in tropical climate. **Animal Bioscience**, v.35, p.648, 2022.

SOUZA, L.D.A.; MALHADO, C.H.M.; BRACCINI NETO, J.; MARTINS FILHO, R.; CARNEIRO, P.L.S. Genotype-environment interactions on the weight of Tabapua cattle in the northeast of Brazil. **Revista Caatinga**, v.29, p.206-215, 2016.

SU, G.; MADSEN, P.; LUND, M.S.; SORENSEN, D.; KORSGAARD, I.R.; JENSEN, J. Bayesian analysis of the linear reaction norm model with unknown covariates. **Journal of Animal Science**, v.84, p.1651-1657, 2006.

SUGIURA, N. Further analysts of the data by akaike' s information criterion and the finite corrections. **Communications in Statistics - Theory and Methods**, v.7, p.13-26, 1978.

WARWICK, E.J.; LEGATES, J. **Cría y mejoramiento del ganado**. 3 ed. México: McGraw-Hill, 1980. 623 p.

ZUBLER, R.; ARAÚJO, C.V.; MENEZES, F.L.; MOTA, R.R.; ARAÚJO, S.I.; LÔBO, R.B.; NAKABASHI, L.R.M. Genotype-environment interaction effects on weight gain in cattle using reaction norms. **Research, Society and Development**, v.10, n.13, p. e278101321244, 2021.

V – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem ou predição das curvas de crescimento das raças de bovinos zebuínos do Brasil pode ser realizadas por meio dos modelos não lineares mistos de Brody (com efeitos fixos de raça-sexo e aleatório de animal associados aos três parâmetros do modelo), em razão dos melhores ajustes apresentados aos conjuntos de dados dessas raças. As diferenças de crescimento entre essas raças foram bem evidenciadas pelas análises dos parâmetros das curvas de crescimento e análises multivariadas complementares. Os machos da raça Guzerá e Tabapuã são mais precoces à maturidade do que Nelore e Nelore Mocho. Essa tendência também foi evidenciada entre as fêmeas, sendo Tabapuã e Guzerá mais precoces do que as demais, embora sejam semelhantes o crescimento das fêmeas das quatro raças, com pequenas diferenças nos ganhos médios diários. Essas informações são relevantes para programas de melhoramento genético para definição de critérios de seleção relacionados à precocidade de crescimento e ganhos de pesos diários dos animais em idades específicas, podendo auxiliar melhoristas e produtores nas tomadas de decisões. Outro fator que devemos estar atentos é o efeito da interação genótipo-ambiente (IGA) sobre as características de interesse econômico em bovinos de corte, pois animais que são bons para um ambiente nem sempre têm o mesmo resultado em outro ambiente de produção. Observamos que os efeitos da IGA são evidentes e devem ser considerados em avaliações genéticas para os parâmetros da curva de crescimento de bovinos Nelore. A modelagem inadequada desses efeitos pode levar a predições tendenciosas de valores genéticos e, conseqüentemente, reduzir a resposta à seleção. Além disso, resultar em perdas econômicas para o produtor, uma vez que, as progênes são frequentemente criadas em ambientes muito diferentes daqueles onde eram mantidas para predizer seus valores genéticos. A seleção para os parâmetros das curvas de crescimento é possível e resultará em maior resposta à seleção, principalmente, nos ambientes de melhor nível de produção devido às altas herdabilidades observadas ao logo do gradiente ambiental. A maioria dos reprodutores utilizados para ambos os parâmetros são robustos, evidenciando o uso desigual dos genótipos no rebanho. Recomendamos mais estudos para avaliar o efeito da IGA sobre os parâmetros estudados, principalmente, utilizando informações genômicas nos modelos de normas de reação para obter melhores

informações da predição do mérito genético dos rebanhos de corte num gradiente ambiental.