

TAINARA LUANA DA SILVA SOARES

**INTERAÇÃO GENÓTIPO X AMBIENTE PARA PRODUÇÃO DE LEITE,
GORDURA E PROTEÍNA UTILIZANDO MODELOS DE NORMAS DE REAÇÃO
EM BOVINOS GUZERÁ**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Paulo Sávio Lopes

Coorientadores: Maria Gabriela C. Diniz Peixoto
Renata Veroneze
Fabyano Fonseca e Silva

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S676i
2022
Soares, Tainara Luana da Silva, 1994-
Interação genótipo x ambiente para produção de leite,
gordura e proteína utilizando modelos de normas de reação em
bovinos Guzerá / Tainara Luana da Silva Soares. – Viçosa, MG,
2022.

1 dissertação eletrônica (33 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Paulo Sávio Lopes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Zootecnia, 2022.

Referências bibliográficas: f. 29-33.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.597>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Leite - Produção. 2. Bovinos de leite. 3. Interação
genótipo-ambiente - Métodos estatísticos. I. Lopes, Paulo Sávio,
1958-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Zootecnia. Programa de Pós-Graduação em Zootecnia.
III. Título.

CDD 22. ed. 636.2142

Bibliotecário(a) responsável: Euzébio Luiz Pinto CRB-6/3317


TAINARA LUANA DA SILVA SOARES

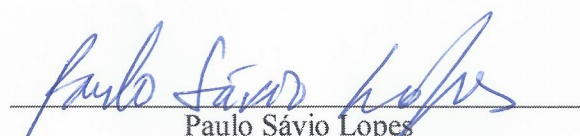
**INTERAÇÃO GENÓTIPO X AMBIENTE PARA PRODUÇÃO DE LEITE,
GORDURA E PROTEÍNA UTILIZANDO MODELOS DE NORMAS DE REAÇÃO
EM BOVINOS GUZERÁ**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 15 de julho de 2022.

Assentimento:


Tainara Luana da Silva Soares
Autora


Paulo Sávio Lopes
Orientador

“My head was feeling scared
But my heart was feeling free”
The thing – Pixies

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Maria, pela sua luta para criar todos os filhos e sempre priorizando nossa educação.

Ao meu pai Luiz, que teve uma passagem breve na minha vida, mas deixou lições que carrego comigo sempre.

Ao meu irmão Elisvan, e minhas irmãs Taiana e Tuane, pelo apoio desde a graduação e pelos empréstimos que um dia pagarei.

Ao meu sobrinho Luiz, que ainda não conheci.

Ao meu orientador Paulo Sávio, pela orientação, apoio, confiança e ensinamentos.

À minha coorientadora Maria Gabriela por ter tornado esse trabalho possível e todas as suas sugestões para enriquecer este estudo.

Ao professor Fabyano com quem convivi pouco, mas que contribuiu com esse trabalho, com orientações e sugestões no início e depois com as publicações deixadas por ele.

À professora Renata por sua contribuição em momentos de dúvidas.

À Eula e ao Delvan pelo apoio, (muita) paciência e ensinamentos.

À Matilde por sua amizade e conselhos.

À Fernanda que percorreu todo esse caminho comigo.

Aos professores e funcionários da Universidade Federal de Viçosa que tornaram tudo isso possível.

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

A todos que fazem parte do GDMA pelo acolhimento, amizade e aprendizado.

Aos meus amigos Gean, Keoma e Larissa que estão longe fisicamente, mas estão sempre presentes na minha vida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Programa Nacional de Melhoramento do Guzerá para Leite (PNMGuL), à Embrapa Gado de Leite e ao Centro Brasileiro de Melhoramento Genético do Guzerá (CBMG²) pela disponibilização dos dados para realizar este trabalho.

E a todos que acreditaram em mim.

BIOGRAFIA

TAINARA LUANA DA SILVA SOARES, filha de Luiz Carlos Bispo Soares e Maria José da Silva, nasceu em Três Marias, Minas Gerais, em 22 de maio de 1994. Em fevereiro de 2014 iniciou o curso de Zootecnia pelo Centro Universitário de Patos de Minas e graduou-se em Zootecnia em dezembro de 2018. Iniciou o Mestrado em Zootecnia em março de 2020 no Programa de Pós – Graduação da Universidade Federal de Viçosa, realizando suas pesquisas na área de Melhoramento Animal. Em julho de 2022, submeteu-se à defesa da dissertação para obtenção do título de Magister Scientiae em Zootecnia.

RESUMO

SOARES, Tainara Luana da Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2022. **Interação genótipo x ambiente para produção de leite, gordura e proteína utilizando modelos de normas de reação em bovinos Guzerá.** Orientador: Paulo Sávio Lopes. Coorientadores: Maria Gabriela Campolina Diniz Peixoto, Renata Veroneze e Fabyano Fonseca e Silva (*in memoriam*).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a ocorrência de interação genótipo x ambiente (IGA) em características de produção de leite (PL305), gordura (G305) e proteína (P305) truncadas em 305 dias de animais da raça Guzerá. Foram utilizados 6823 registros de PL305, 2466 registros de G305 e 1870 registros de P305 fornecidos pelo Programa Nacional de Melhoramento do Guzerá para Leite (PNMGuL), coordenado pela Embrapa Gado de Leite e pelo Centro Brasileiro de Melhoramento Genético do Guzerá (CBMG²). A estação de parto foi dividida em seca (abril a setembro) e chuvosa (outubro a março). Apenas as informações de vacas primíparas foram utilizadas. Os grupos de contemporâneos (GC) foram formados considerando rebanho e ano de parto. Foram incluídos nesse estudo apenas GC com no mínimo três registros de filhas de dois reprodutores diferentes. As análises foram realizadas em dois passos. No primeiro passo foram estimados os efeitos ambientais sobre os fenótipos utilizando um modelo animal multicaracterístico ignorando a IGA. No segundo passo, a ocorrência de IGA foi avaliada através de análises unicaracterísticas utilizando modelo de normas de reação e considerando variância residual heterogênea. As soluções de GC obtidas no passo 1, dadas como desvio da média, foram utilizadas como gradiente ambiental, representando ambientes de baixo a alto nível de manejo. Os reprodutores foram classificados quanto à sensibilidade e as normas de reação para os touros com no mínimo 15 filhas foram apresentadas graficamente. Observou-se incremento das estimativas de variância genética ao longo do gradiente ambiental para todas as características avaliadas. O mesmo ocorreu para a variância residual com exceção da classe 5 da G305 e da classe 4 da P305. As estimativas de herdabilidade aumentaram levemente conforme houve aumento do nível de manejo. As estimativas de correlação entre o intercepto e a inclinação da curva de norma de reação foram 0,998 para PL305; 0,989 para G305; e 0,987 para P305. A correlação genética entre os ambientes de baixo (quantil 5%), médio (quantil 55%) e alto (quantil 95%) nível de manejo foram de alta magnitude. A maioria dos reprodutores foram classificados como robustos para todas as características, seguidos pelos sensíveis e extremamente sensíveis. O mesmo foi observado para a quantidade de filhas. Não foi observada a reclassificação dos touros para PL305 e G305. Para P305 a reclassificação

não foi significativa. Contudo, os valores genéticos dos animais foram alterados ao longo do gradiente ambiental, mesmo para animais classificados como robustos. Esses resultados permitem concluir que houve interação genótipo x ambiente com efeito escala para as características avaliadas com impacto sobre as predições de valores genéticos.

Palavras-chave: Sensibilidade ambiental. Regressão aleatória. Herdabilidade.

ABSTRACT

SOARES, Tainara Luana da Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2022. **Genotype x environment interaction for milk, fat and protein yields using reaction norms models in Guzerá cattle.** Adviser: Paulo Sávio Lopes. Co-advisers: Maria Gabriela Campolina Diniz Peixoto, Renata Veroneze and Fabyano Fonseca e Silva (*in memoriam*).

The aim of this work was to evaluate the occurrence of genotype-environment interaction (IGA) in milk (PL305), fat (G305) and protein (P305) production traits truncated in 305 days of Guzerá animals. 6823 records of PL305, 2466 records of G305 and 1870 records of P305 provided of the National Program for the Improvement of Guzerá for Dairy Purpose (PNMGuL), coordinated jointly by Embrapa Dairy Cattle and the Brazilian Center for the Genetic Improvement of Guzerá (CBMG²) were used. The calving season was divided into dry (April to September) and rainy (October to March). Only information from primiparous cows was used. The contemporary groups (CG) were formed considering herd and calving year. Only GC with at least three records of daughters from two different sires were included in this study. The analyzes were carried out in two steps. In the first step, environmental effects on phenotypes were estimated using a multi-trait animal model ignoring IGA. In the second step, the occurrence of IGA was evaluated through single-trait analyzes using a reaction norms model and considering heterogeneous residual variance. The GC solutions obtained in step 1, given as standard deviation from the mean, were used as an environmental gradient, representing low to high level management environments. The sires were classified for sensitivity and reaction norms for sires with at least 15 daughters were presented graphically. An increase in genetic variance estimates was observed across the environmental gradient for all evaluated traits. The same occurred for the residual variance with the exception of class 5 for G305 and class 4 for P305. The heritability estimates increased slightly as the level of management increased. Correlation estimates between the intercept and the slope of the reaction norm curve were 0.998 for PL305; 0.989 for G305; and 0.987 for P305. The genetic correlation between low (55% quantile), medium (55% quantile) and high (95% quantile) environments was of high magnitude. Most sires were classified as robust for all traits, followed by sensitive and extremely sensitive. The same was observed for the number of daughters. No reraking of sires for PL305 and G305 was observed. For P305 the reraking was not significant. However, the genetic values of the animals were altered across the environmental gradient, even for animals classified as robust. These results allow us to conclude that there was a genotype-environment interaction with a scale effect for the evaluated traits with an impact on the predictions of genetic

values.

Keywords: Environmental sensitivity. Random regression. Heritability.

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	11
2.REVISÃO DE LITERATURA.....	12
2.1 A raça Guzerá	12
2.2 Interação genótipo-ambiente (IGA)	13
2.3 Normas de reação.....	15
3.MATERIAL E MÉTODOS.....	16
4.RESULTADOS	19
5.DISSCUSSÃO.....	24
6.CONCLUSÃO.....	28
7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

1. INTRODUÇÃO

O Guzerá é uma raça zebuína conhecida por apresentar bons índices zootécnicos quando criada em regiões de clima tropical e condições adversas. A raça destaca-se por ser de duplo propósito, ou seja, pode ser utilizada para produção de leite, carne ou ambos. Apesar da rusticidade e desempenho elevado, existem fatores que podem influenciar a capacidade produtiva desses animais.

O fenótipo é expresso pela ação de fatores genéticos (genótipo), ambientais e a interação entre eles. De acordo com Falconer & Mackay (1996), alterações no desempenho de diferentes genótipos submetidos a diferentes ambientes caracterizam a interação genótipo x ambiente (IGA). Como consequência, aqueles genótipos classificados como melhores em um ambiente podem não o ser em outros. A IGA pode atuar de forma distinta, portanto uma determinada condição ambiental pode causar maior efeito sobre alguns genótipos do que sobre outros.

O Brasil é um país de grande extensão territorial caracterizado por sua diversidade de ambientes. Aliada a isso, a evolução das biotecnologias da reprodução, principalmente a inseminação artificial, ampliou o uso de touros provados, permitindo a distribuição do seu material genético à várias regiões do país, de modo que, os touros têm sido expostos a ambientes heterogêneos (BARUSELLI et al., 2019; SILVA et al., 2021a; SILVA et al., 2021b). Considerando que a avaliação genética tradicional desconsidera a IGA, as progênes desses animais podem não apresentar o desempenho produtivo esperado quando criadas em ambientes diferentes daqueles em que os pais foram selecionados (SANTOS et al., 2019).

Estudos recentes têm utilizado modelos de normas de reação obtidos via regressão aleatória para avaliar a IGA. Essa abordagem considera que os genótipos possuem sensibilidades diferentes a mudanças específicas do ambiente (KOLMODIN et al., 2002). Os modelos de normas de reação podem ser utilizados para avaliar características que variam gradualmente e continuamente ao longo do tempo e/ou espaço (FAZEL et al., 2018). Assim, no gradiente ambiental, são traçadas curvas aleatórias (normas de reação) dos valores genéticos para as características avaliadas, dessa forma cada indivíduo pode apresentar uma trajetória diferente (HAYES et al., 2016). Desse modo, os modelos de normas de reação permitem prever os valores genéticos de um indivíduo em diferentes ambientes (SARTORI et al., 2022), observar a mudança no desempenho de um genótipo quando ocorre variação no ambiente (AMBROSINI et al., 2016) e definir os indivíduos que serão geneticamente superiores em ambientes específicos (MULIM et al., 2021b).

Santana Jr. et al. (2019) ao avaliarem animais da raça Guzerá sob estresse térmico, observaram a IGA influenciando negativamente na produção de leite no pico da lactação, quando os animais atingem seu patamar produtivo. O resultado dessa pesquisa demonstra que mesmo sendo animais rústicos, o desempenho produtivo dos diferentes genótipos pode alterar de acordo com o ambiente de produção. Este estudo foi o primeiro a considerar o efeito da IGA sobre os constituintes do leite da raça Guzerá, portanto faz-se necessário que novas pesquisas sejam realizadas considerando não somente a produção de leite, como também seus constituintes e diferentes gradientes ambientais, a fim de direcionar os indivíduos para ambientes adequados, promovendo melhor desempenho produtivo, ganho genético e retorno econômico para o produtor.

O objetivo deste estudo foi avaliar a presença de IGA para as características de produção de leite, gordura e proteína de animais da raça Guzerá utilizando modelos de normas de reação e assumindo as soluções para os efeitos de grupos de contemporâneos como gradiente ambiental.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A raça Guzerá

O Guzerá é uma raça indiana, que se originou especificamente no estado de Gujarat na Índia, região que possui territórios desérticos e pré-desérticos caracterizados por solos arenosos, pouca precipitação, terras secas e clima discrepante. Tais condições tornaram o Guzerá termotolerante, resistente a endo e ectoparasitas e capaz de aproveitar forragens de baixo valor nutricional (ROSSE et al., 2017; PAIVA et al., 2020). Além da rusticidade, esses animais destacam-se por serem de duplo propósito (PIRES et al., 2020). A raça foi introduzida no Brasil no século XIX e, posteriormente, espalhou-se por todas as regiões do país, adaptando-se às diversas condições ambientais. Atualmente, os animais são selecionados para produção de carne, leite e duplo propósito (PEIXOTO et al., 2021).

A genotipagem de marcadores do tipo SNPs na raça Guzerá têm possibilitado a avaliação do desequilíbrio de ligação, endogamia, tamanho efetivo e estrutura populacional. Os resultados das análises apontam que a endogamia presente na população se originou no início do século XX, momento em que as raças zebuínas passaram por uma redução do efetivo populacional. Isto significa que a população atual é originária de poucos ancestrais fundadores, o que justifica a semelhança genética entre os animais (FONSECA et al., 2016; PEIXOTO et al., 2021).

No Brasil, o melhoramento da raça iniciou na década de 90 com a criação do Centro Brasileiro de Melhoramento do Guzerá (CBMG), o braço técnico da Associação dos Criadores de Guzerá do Brasil (ACGB). O programa obteve grandes conquistas nessa década como a implantação dos esquemas de teste de progênie e do Núcleo MOET (Múltipla Ovulação e Transferência de Embriões) para avaliar as características leiteiras e de duplo propósito e a criação do programa de melhoramento das características de corte e reprodução. Já no ano de 2000 foi publicado o primeiro sumário de touros Guzerá para leite (MENICUCCI et al., 2022). Atualmente, o sumário do Guzerá contempla informações genéticas de características leiteiras, conformação, manejo, corte e reprodução. Além das DEPs (diferença esperada na progênie), os touros também são classificados em função do desempenho de suas filhas frente ao nível de manejo dos rebanhos (BRUNELI et al., 2021).

Além de aumentar o ganho genético dos animais, o programa de melhoramento genético do Guzerá busca manter as características de rusticidade e duplo propósito, visa uma exploração sustentável da raça e preocupa-se em envolver a comunidade científica e criadores nas pesquisas desenvolvidas (MENICUCCI et al., 2022).

2.2 Interação genótipo x ambiente (IGA)

De acordo com Falconer & Mackay (1996), o fenótipo dos indivíduos é resultante da soma dos efeitos genéticos (genótipo), ambientais e da interação entre eles. A interação genótipo x ambiente (IGA) é observada quando genótipos em ambientes diferentes apresentam desempenhos distintos. Como consequência, a ordem de classificação dos indivíduos pode ser alterada, sendo assim, o indivíduo que apresenta desempenho superior em um ambiente pode apresentar desempenho inferior em outro.

Na presença de IGA, o conjunto de genes responsáveis pela expressão das características pode diferir conforme o ambiente (WAKCHAURE et al., 2016). Alguns alelos e/ou genes podem ter sua expressão inibida devido às mudanças ambientais alterando a expressão fenotípica dos genótipos, com isso, pode haver reclassificação dos animais nos diferentes ambientes (PFEIFFER et al., 2016; FAZEL et al., 2018). Assim, as progênies podem ter desempenho inferior quando criadas em ambientes distintos daqueles em que os pais foram selecionados, ocasionando na redução do mérito genético dos animais (MOTA et al., 2016; VAN DER LAAK et al., 2016).

Os genótipos apresentam plasticidade fenotípica em relação às mudanças ambientais, sendo classificados como sensíveis e robustos. Os animais sensíveis podem

apresentar mudanças no fenótipo devido à influência ambiental. Já aqueles com genótipos robustos, independentemente do ambiente ao qual estão inseridos, mantêm o desempenho produtivo, sem mudanças significativas (WAKCHAURE et al., 2016).

As progênes sensíveis podem ter o desempenho inferior quando submetidas a ambientes diferentes daqueles em que os pais foram selecionados. Devido a isso, os programas de melhoramento precisam levar em consideração a IGA no momento da seleção dos animais, visto que o Brasil é um país caracterizado por sua diversidade de ambientes e sistema de criação de bovinos (CORRÊA et al., 2007).

No sumário da raça Guzerá encontra-se uma medida chamada de reação ao ambiente produtivo que classifica os touros como sensíveis ou robustos. Animais sensíveis positivos indicam que a progênie será capaz de produzir conforme a DEP apresentada no sumário em condições de manejo alto. Já as progênes dos animais sensíveis negativos são produtivas em ambientes de manejo baixo. Os animais robustos, independentemente do ambiente de criação, não apresentam mudanças significativas no desempenho. Para avaliar a reação ao ambiente produtivo, o valor genético dos animais é predito em função dos efeitos dos grupos de contemporâneos e ajustados a um modelo de norma de reação (BRUNELI et al., 2021).

Os genótipos podem ser classificados em quatro tipos de acordo com a ocorrência de IGA. No primeiro tipo, o comportamento dos genótipos é semelhante em qualquer ambiente, neste caso há ausência de interação. No segundo tipo, a mudança de ambiente provoca reordenamento dos genótipos, porém a variância entre os desempenhos é pouco significativa. O terceiro tipo é caracterizado por não haver alteração na classificação dos genótipos, mas ocorrem mudanças significativas na variância dos diferentes ambientes. O quarto e último tipo é quando ocorre uma interação significativa, em que há importante reordenamento dos genótipos (MARCONDES & MATOS, 2010).

A heterogeneidade de variância é considerada como uma forma primária de IGA e tende a afetar, principalmente, características com baixa herdabilidade devido à variância ambiental influenciar na maior parte da expressão da característica (OLIVEIRA et al., 2020). Nesse caso, ocorre IGA com efeito escala, pois é observada pouca ou nenhuma reclassificação dos genótipos ao longo do gradiente ambiental (VAN DER LAAK et al., 2016). As avaliações que assumem homogeneidade de variâncias podem obter resultados viesados, pois as variâncias diferem entre os rebanhos devido às condições de manejo e ambiente de criação (MOTA et al., 2016).

A IGA causada pela heterogeneidade de variâncias provoca mudanças na variância

genética, fenotípica e ambiental, alterando também as estimativas dos parâmetros genéticos e fenotípicos (WAKCHAURE et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2020). Em consequência disso, quando a heterogeneidade é desconsiderada, ocorre redução da acurácia da predição dos valores genéticos, os genótipos podem ser classificados de forma inadequada, ocasionando redução da resposta à seleção e progresso genético (GUZZO et al., 2018). Além disso, os animais podem ser direcionados erroneamente para ambientes que não favorecem a expressão do desempenho genético (FAZEL et al., 2018).

Os modelos multicaracterísticos têm sido utilizados para investigar a ocorrência de IGA quando o gradiente ambiental é uma variável categórica (ERBE et al., 2021). Essa abordagem assume como características diferentes, mas correlacionadas, a expressão fenotípica dos genótipos em ambientes distintos (ZHANG et al., 2019). A presença ou ausência de IGA é avaliada utilizando a correlação da característica nos diferentes ambientes, sendo que valor de correlação menor que 0,80 indica que a IGA atua na expressão da característica avaliada (SILVA et al., 2021a). Os modelos multicaracterísticos foram utilizados para avaliar a IGA entre países (MONTALDO et al., 2017), regiões (GAIA et al., 2018), média produtiva (PANETTO et al., 2018) e sistemas de produção de leite convencional e orgânico (PFEIFFER et al., 2016). Outra metodologia usada para avaliar a IGA são os modelos de normas de reação que serão descritos no próximo tópico.

2.3 Normas de reação

Os modelos de normas de reação descrevem o desempenho de um genótipo como uma função do ambiente e têm sido utilizados na investigação de IGA para avaliar características que mudam gradualmente e continuamente em função do gradiente ambiental. Essa abordagem pressupõe que os genótipos apresentam sensibilidades distintas às mudanças ambientais (KOLMODIN et al., 2002).

A norma de reação pode ser predita através de funções de covariância encontradas por meio de modelos de regressão aleatória (AMBROSINI et al., 2016). A função de covariância é uma função contínua que descreve as (co)variâncias de características que mudam continuamente no espaço e/ou tempo (PEREIRA et al., 2010). Por meio dessa abordagem é possível descrever o comportamento dos parâmetros ao longo de uma trajetória (NIGUSSIE et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2015).

Kirkpatrick e Heckman (1989) citam três vantagens que favorecem o uso de modelos de dimensão infinita. Primeira: é possível obter uma descrição completa para todos os pontos ao longo de uma trajetória contínua, em vez de apenas em pontos de referência. Segunda:

a previsão da resposta à seleção é mais precisa, pois é possível avaliar os efeitos da seleção em todos os pontos. Terceira: os modelos de dimensão infinita são mais eficientes estatisticamente para estimar parâmetros de um conjunto de dados finitos.

De acordo com Albuquerque (2004), nos modelos de regressão aleatória são ajustadas duas equações de regressão aleatória, uma para o efeito genético direto e outra para o efeito ambiental, e uma curva de regressão fixa relacionada ao desempenho médio da população. A tendência genética dos animais é obtida como um desvio da curva fixa e os valores genéticos são preditos para os coeficientes de regressão genéticos. Dessa forma, é possível obter diferentes curvas de valores genéticos associadas aos diferentes indivíduos e prever valores genéticos dentro do intervalo da curva, mesmo para pontos em que o fenótipo do indivíduo seja desconhecido.

Nos modelos de normas de reação os valores genéticos dos animais são divididos em intercepto e inclinação. O valor do intercepto é o mesmo em qualquer condição ambiental, sendo independente do ambiente, enquanto que a inclinação descreve a sensibilidade do genótipo às mudanças ambientais, portanto é a parte dependente do ambiente. Valores de inclinação significativamente diferentes de zero podem indicar IGA (SCHIMID et al., 2021; TORO-OSPINA et al., 2022; SARTORI et al., 2022).

Os modelos de normas de reação foram utilizados em diversos estudos que investigaram a ocorrência de IGA em características de produção de leite (SANTANA Jr. et al., 2016; SANTANA Jr. et al., 2019; CHERUIYOT et al., 2020; SANTOS et al., 2020; BOHLOULI et al., 2021; ERBE et al., 2021; MULIM et al., 2021a; TORO-OSPINA et al., 2022).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Os dados foram provenientes da base de dados do Programa Nacional de Melhoramento do Guzerá para Leite (PNMGuL), coordenado pela Embrapa Gado de Leite em parceria com o Centro Brasileiro de Melhoramento Genético do Guzerá (CBMG²). O banco de dados é composto de informações individuais de genealogia e desempenho, data de nascimento, data e ordem de parto, e estação de parto. As características avaliadas neste estudo foram: produção de leite (PL305), gordura (G305) e proteína (P305) truncadas em 305 dias com as respectivas datas de mensuração.

Foi utilizado o software R (R Project, <http://www.r-project.org>) para organizar e realizar as análises de consistência dos arquivos de dados. A estação de parto foi dividida em seca

(abril a setembro) e chuvosa (outubro a março). Os grupos de contemporâneos (GC) foram definidos considerando rebanho e ano de parto. Foram considerados neste estudo apenas as informações de primíparas, fenótipos dentro da amplitude de \pm três desvios padrão da média e somente GC com no mínimo três registros de filhas de pelo menos dois reprodutores diferentes. A análise descritiva dos dados encontra-se na tabela 1.

Tabela 1. Número de observações (N), média (kg), mínimo (kg), máximo (kg), quantidade de grupos de contemporâneos (GC) para as características de produção de leite e seus constituintes

Características	N	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo	GC
PL305	6823	2033,00	1001,27	105	6487,00	421
G305	2466	85,03	38,83	3	281,17	150
P305	1870	61,59	28,95	4	242,00	84

PL305 = produção de leite truncada em 305 dias; G305 = produção de gordura do leite truncada em 305 dias; P305 = produção de proteína do leite truncada em 305 dias.

As análises foram realizadas em dois passos. No primeiro passo foram estimados os efeitos ambientais (soluções de grupos de contemporâneos) sobre os fenótipos utilizando um modelo animal multicaracterístico que ignora a existência de IGA. As análises foram realizadas utilizando o seguinte modelo:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \mathbf{Z}\mathbf{u} + \mathbf{e} \quad (1)$$

em que: \mathbf{y} é o vetor de observações (PL305, G305 e P305); $\boldsymbol{\beta}$ é o vetor de efeitos fixos (estação de parto e GC) e da covariável (idade linear da vaca ao parto); \mathbf{u} é o vetor de efeito aleatório genético aditivo; \mathbf{X} e \mathbf{Z} são as matrizes de incidência de efeitos em $\boldsymbol{\beta}$ e \mathbf{u} , respectivamente; e \mathbf{e} é o vetor de efeito residual aleatório. Os efeitos genético aditivo e residual assumiram distribuição normal em que: $\mathbf{u} \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{A} \otimes \mathbf{G})$; e $\mathbf{e} \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{I} \otimes \mathbf{R})$, em que \mathbf{A} é a matriz dos numeradores dos coeficientes de parentesco; \mathbf{I} é uma matriz identidade; \mathbf{G} é a matriz de variância e covariância genética e \mathbf{R} é a matriz de variância e covariância residual.

Após o primeiro passo foi obtido um vetor de fenótipos corrigidos para os efeitos fixos (\mathbf{y}^*), sendo: $\mathbf{y}^* = \mathbf{y} - (\mathbf{X}\boldsymbol{\beta}_0) = \mathbf{Z}\hat{\mathbf{u}} + \hat{\mathbf{e}}$.

No segundo passo, foi realizada análise unicaracterística, utilizando as soluções para grupos de contemporâneos (desvio em relação à média) como gradiente ambiental. A variância residual heterogênea foi ajustada segundo a recomendação de Zhang et al. (2019). Para isso, os valores encontrados para as soluções dos GC foram arredondados e divididos em

cinco classes (0, 20%), (20, 40%), (40, 60%), (60, 80%) e (80, 100%), de modo que cada classe ficasse com número semelhante de animais. Na tabela 2 são apresentados o número de animais e o intervalo das soluções de GC de cada classe para as características avaliadas. Polinômios de Legendre lineares foram utilizados para modelar os efeitos genéticos aditivos.

Tabela 2. Quantidade de animais (N) e amplitude das soluções de GC (desvio em relação à média) em cada classe de variância residual heterogênea para as características avaliadas

Classes	PL305		G305		P305	
	N	Amplitude	N	Amplitude	N	Amplitude
1	1672	-366 : 752	572	4 : 35	446	-1 : 27
2	1394	753 : 1111	457	36 : 50	379	28 : 36
3	1365	1112 : 1416	553	51 : 61	361	37 : 43
4	1361	1417 : 2034	510	62 : 82	381	44 : 52
5	1031	2035 : 4011	374	83 : 163	303	53 : 158

PL305 = produção de leite truncada em 305 dias; G305 = produção de gordura do leite truncada em 305 dias; P305 = produção de proteína do leite truncada em 305 dias

O modelo de norma de reação foi ajustado para cada característica como se segue:

$$\mathbf{y}_{ij}^* = \boldsymbol{\mu} + \mathbf{a}_i + \mathbf{b}_i \hat{\boldsymbol{\beta}}_{GCij} + \boldsymbol{\xi}_{ij} \quad (2)$$

em que: \mathbf{y}_{ij}^* são os valores fenotípicos corrigidos do animal i para o nível j dos efeitos estimados de GC ($\hat{\boldsymbol{\beta}}_{GCij}$); $\boldsymbol{\mu}$ é a média geral; \mathbf{a}_i e \mathbf{b}_i são os coeficientes aleatórios linear e angular, respectivamente, para a regressão do valor genético aditivo ($\hat{\mathbf{u}}_i$) sobre os níveis dos j soluções de GC; e $\boldsymbol{\xi}_{ij}$ é o termo residual. A distribuição conjunta para $\mathbf{a}_i = [a_1, a_2, \dots, a_n]'$ e $\mathbf{b}_i = [b_1, b_2, \dots, b_n]'$ com $\boldsymbol{\theta} = [\mathbf{a}_i, \mathbf{b}_i]'$ foi dada por $\boldsymbol{\theta} \sim N(0, \boldsymbol{\Sigma}_{ab} \otimes \mathbf{A})$ em que: $\boldsymbol{\Sigma}_{ab} = \begin{bmatrix} \sigma_a^2 & \sigma_{ab}^2 \\ \sigma_{ab}^2 & \sigma_b^2 \end{bmatrix}$.

Para o ajuste dos modelos (1) e (2) foi utilizado o software AIREMLF90 e para a obtenção do \mathbf{y}^* foi utilizado o software PREDICTF90 (MISZTAL et al., 2018). Os valores genéticos preditos do indivíduo i no nível ambiental j foram calculados utilizando a equação: $\hat{u}_{ij} = \mathbf{K}'_j \hat{\boldsymbol{\theta}}_i = \hat{a}_i + \hat{b}_i \hat{\boldsymbol{\beta}}_{GCj}$, em que \mathbf{K}'_j é a matriz transposta de coeficientes de Legendre para cada característica no ambiente j e $\hat{\boldsymbol{\theta}}_i$ é o vetor dos valores genéticos para os coeficientes de regressão (coeficiente linear e angular da norma de reação). As estimativas de variância genética ($\hat{\sigma}_{u_i}^2$) e a herdabilidade (\hat{h}_j^2) para as características avaliadas nos níveis ambientais j , foram calculadas,

respectivamente, por: [1] $\hat{\sigma}_{u_j}^2 = \mathbf{K}'_j \Sigma_{ab} \mathbf{K}_j = \hat{\sigma}_a^2 + 2\hat{\sigma}_{ab_j} \hat{\beta}_{GC_j} + \hat{\sigma}_{b_j}^2 (\hat{\beta}_{GC_j})^2$, em que: $\hat{\sigma}_a^2$ é o componente de variância genética para o coeficiente linear; $\hat{\sigma}_{b_j}^2$ é o componente de variância do coeficiente angular; e $\hat{\sigma}_{ab_j}$ é o componente de covariância entre o coeficiente linear e angular; e

[2] $\hat{h}_j^2 = \frac{\hat{\sigma}_{u_j}^2}{\hat{\sigma}_{u_j}^2 + \hat{\sigma}_e^2}$ em que $\hat{\sigma}_e^2$ é o componente de variância residual.

As (co)variâncias e correlações genéticas estimadas entre a característica no nível ambiental j e j' foram obtidas por: [3] $\hat{\sigma}_{u_{jj'}} = \mathbf{K}'_j \Sigma_{ab_j} \mathbf{K}_{j'} = \hat{\sigma}_a^2 + \sigma_{ab} \hat{\beta}_{GC_j} + \sigma_{ab} \hat{\beta}_{GC_{j'}} + \hat{\sigma}_b^2 \hat{\beta}_{GC_j} \hat{\beta}_{GC_{j'}}$, em que $\hat{\sigma}_{u_{jj'}}$ é a covariância genética entre a característica no nível j e j' ; e [4]

$\hat{g}_{jj'} = \frac{\hat{\sigma}_{u_{jj'}}}{\sqrt{\hat{\sigma}_{u_j}^2 \hat{\sigma}_{u_{j'}}^2}}$ em que $\hat{g}_{jj'}$ é a correlação genética para a característica no nível j e j' .

Foi realizada a correlação genética entre os ambientes de baixo (quantil 5%), médio (quantil 55%) e alto (quantil 95%) nível de manejo. Os genótipos foram classificados em robustos $|\mathbf{s}_i| < \mathbf{1}\sigma_s$, sensíveis $\mathbf{1}\sigma_s \geq |\mathbf{s}_i| < \mathbf{2}\sigma_s$ e extremamente sensíveis $|\mathbf{s}_i| \geq \mathbf{2}\sigma_s$, admitindo uma escala de plasticidade baseada no valor individual absoluto da inclinação (\mathbf{s}_i) e no desvio padrão da inclinação (σ_s).

4. RESULTADOS

As estimativas das variâncias genética e residual para as características avaliadas constam na figura 1. As soluções de GC foram definidas como gradiente ambiental, sendo que estas foram dadas como o desvio da média dos GC. As amplitudes das soluções de GC foram de -366 a 4011 para PL305, 4 a 163 para G305 e -1 a 158 para P305, representando ambientes de baixo a alto nível de manejo.

Foram observadas alterações na variância genética aditiva ao longo do gradiente ambiental com incremento das estimativas conforme houve aumento do nível de manejo para todas as características avaliadas. Para a característica PL305 o comportamento da variância residual foi similar ao da variância genética. Para a característica G305, a variância residual aumentou até a classe 4, sendo que a classe 5 apresentou valores semelhantes a classe 3. Para P305, a variância residual aumentou até a classe 3, decaindo na classe 4 e aumentando novamente na classe 5. As estimativas de variância genética foram menores que às residuais para todas as características, exceto nas classes 5 de G305 e P305.

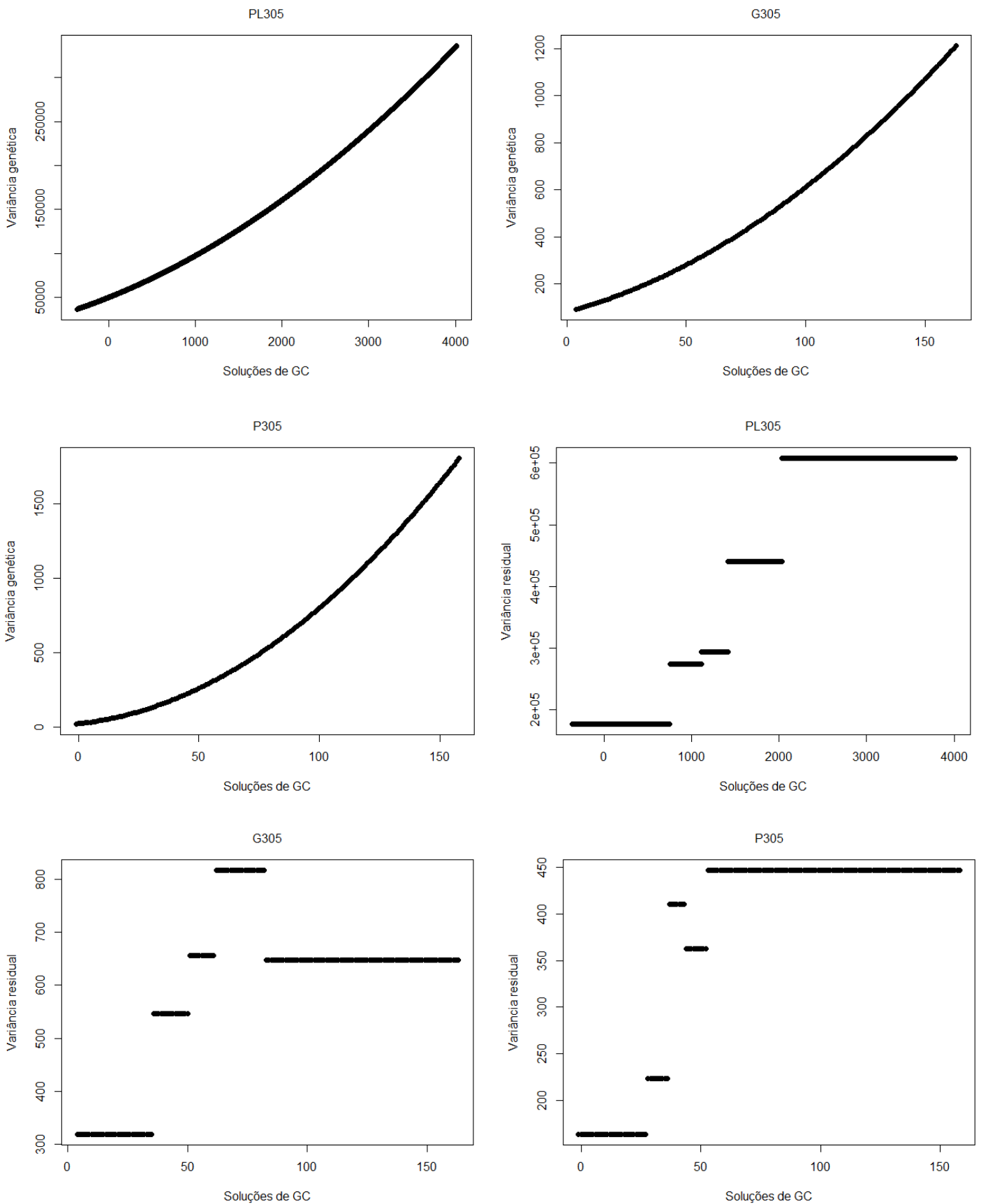


Figura 1. Variância genética e residual para as características de produção de leite (PL305), gordura (G305) e proteína (P305) ao longo do gradiente ambiental

Apesar de apresentar valores médios semelhantes, as estimativas de herdabilidade (Figura 2) das características avaliadas, com exceção das classes 5 de G305 e P305, aumentaram levemente no decorrer do gradiente ambiental, apresentando valores de baixa à média magnitude. Para as classes 5 de G305 e P305, as estimativas de herdabilidade foram mais acentuadas com valores variando de média a alta magnitude.

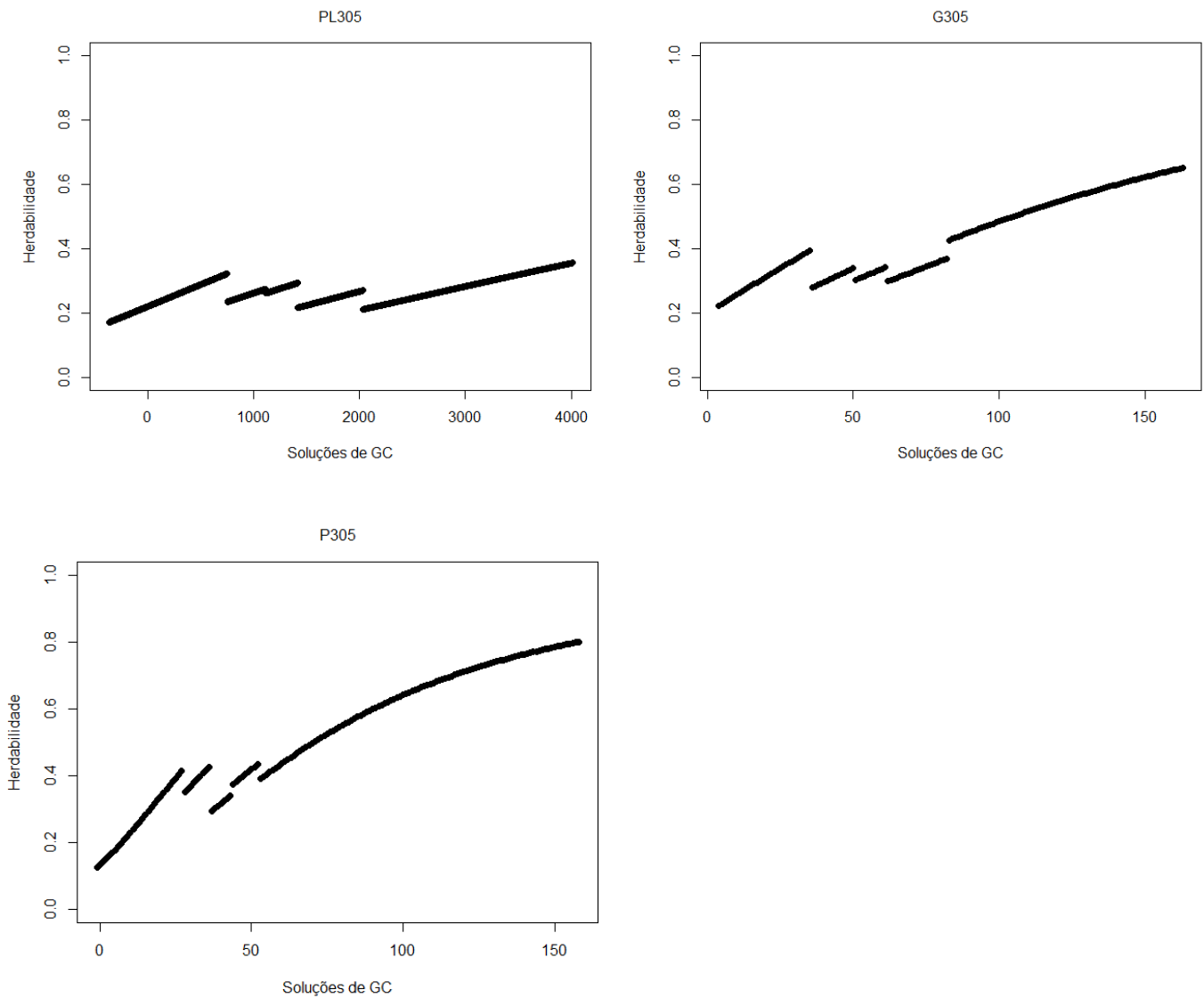


Figura 2. Herdabilidade para as características de produção de leite (PL305), gordura (G305) e proteína (P305)

As estimativas de correlação entre o intercepto e a inclinação da norma de reação foram de 0,998 para PL305; 0,989 para G305; e 0,987 para P305. As correlações genéticas (figura 3) entre os ambientes de baixo (quantil 5%), médio (quantil 55%) e alto nível de manejo (quantil 95%) foram de alta magnitude para todas as características.

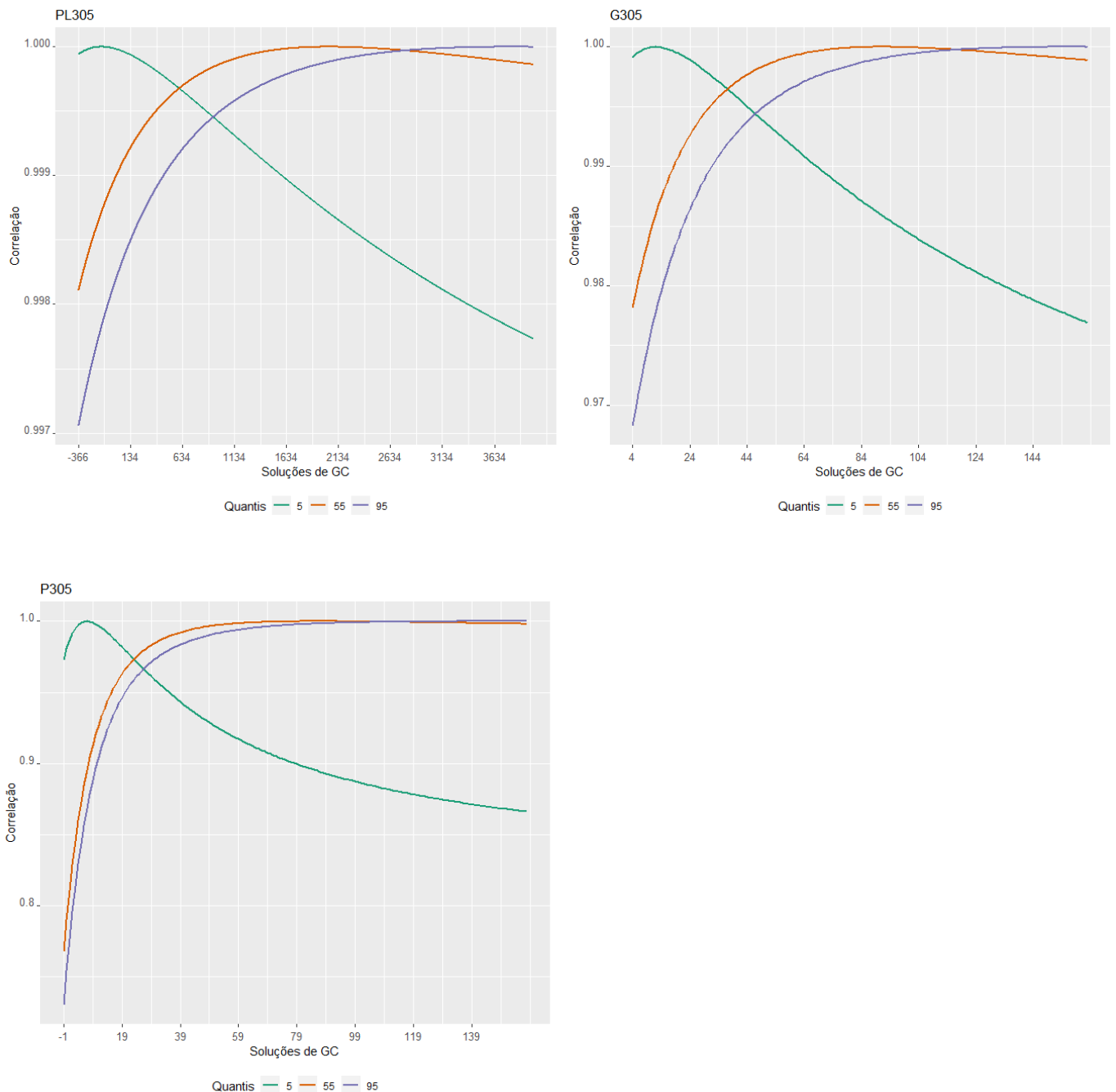


Figura 3. Correlação genética entre os valores baixo (quantil 5%), intermediário (quantil 55%) e alto (quantil 95%) do gradiente ambiental para as características produção de leite (PL305), gordura (G305) e proteína (P305)

Os reprodutores foram classificados em robustos, sensíveis e extremamente sensíveis (Figura 4). Para PL305 69,94% dos animais foram robustos, 21,91% sensíveis e 8,15% extremamente sensíveis. Para G305 67,26% dos animais foram robustos, 22,33% sensíveis e 10,41% extremamente sensíveis. Para P305 65,71% foram robustos, 25,31% sensíveis e 8,98% extremamente sensíveis. Em relação ao número de filhas (Figura 5), foi observado que os touros robustos apresentaram maior número de filhas, seguidos pelos touros

sensíveis e extremamente sensíveis.

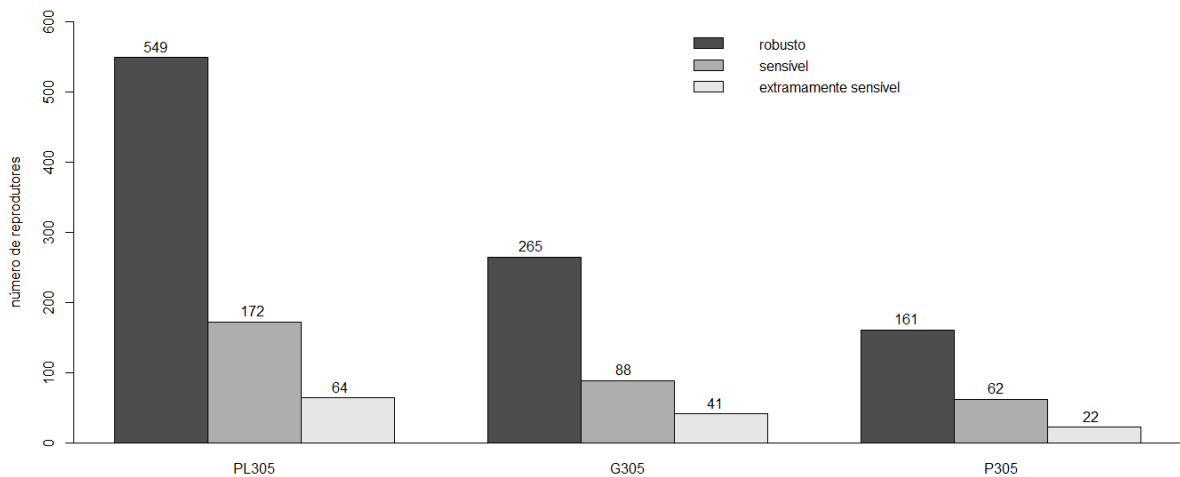


Figura 4. Classificação dos reprodutores conforme a sensibilidade para as características de produção de leite (PL305), gordura (G305) e proteína (P305)

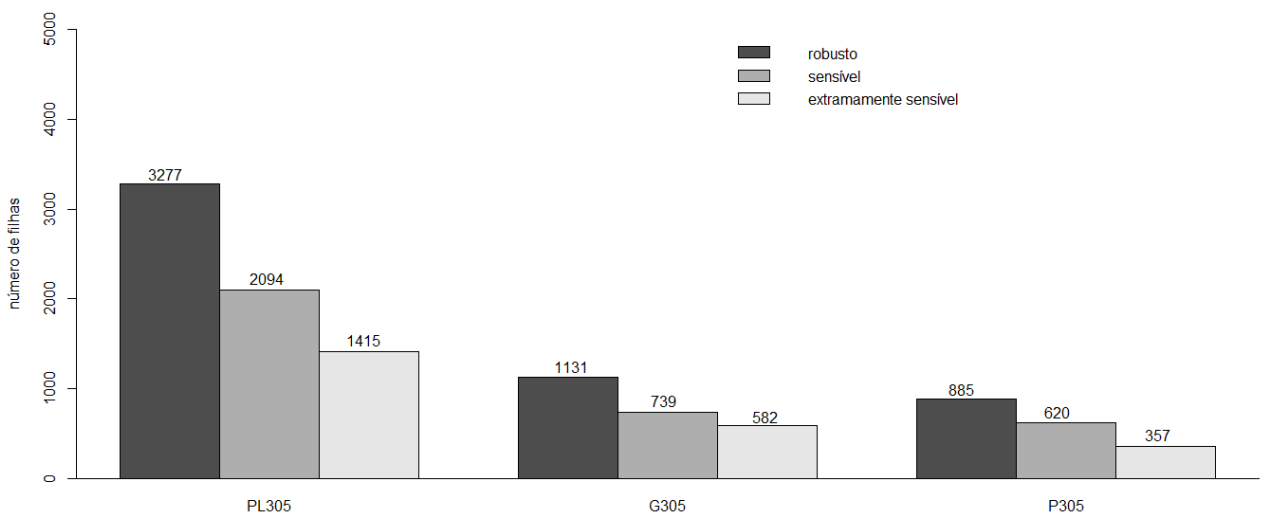


Figura 5. Total de filhas dos reprodutores avaliados de acordo com as classes de sensibilidade para as características de produção de leite (PL305), gordura (G305) e proteína (P305)

Ao se avaliar a norma de reação dos touros com no mínimo 15 filhas (Figura 6), observa-se que os valores genéticos dos animais apresentaram menores variações nos ambientes de baixo nível de manejo e variações mais elevadas nos ambientes de alto nível de manejo. Foram observados poucos animais classificados como sensíveis negativos. Não houve inversão da classificação dos touros para PL305 e G305. Para P305 houve inversão pouco significativa na classificação dos animais.

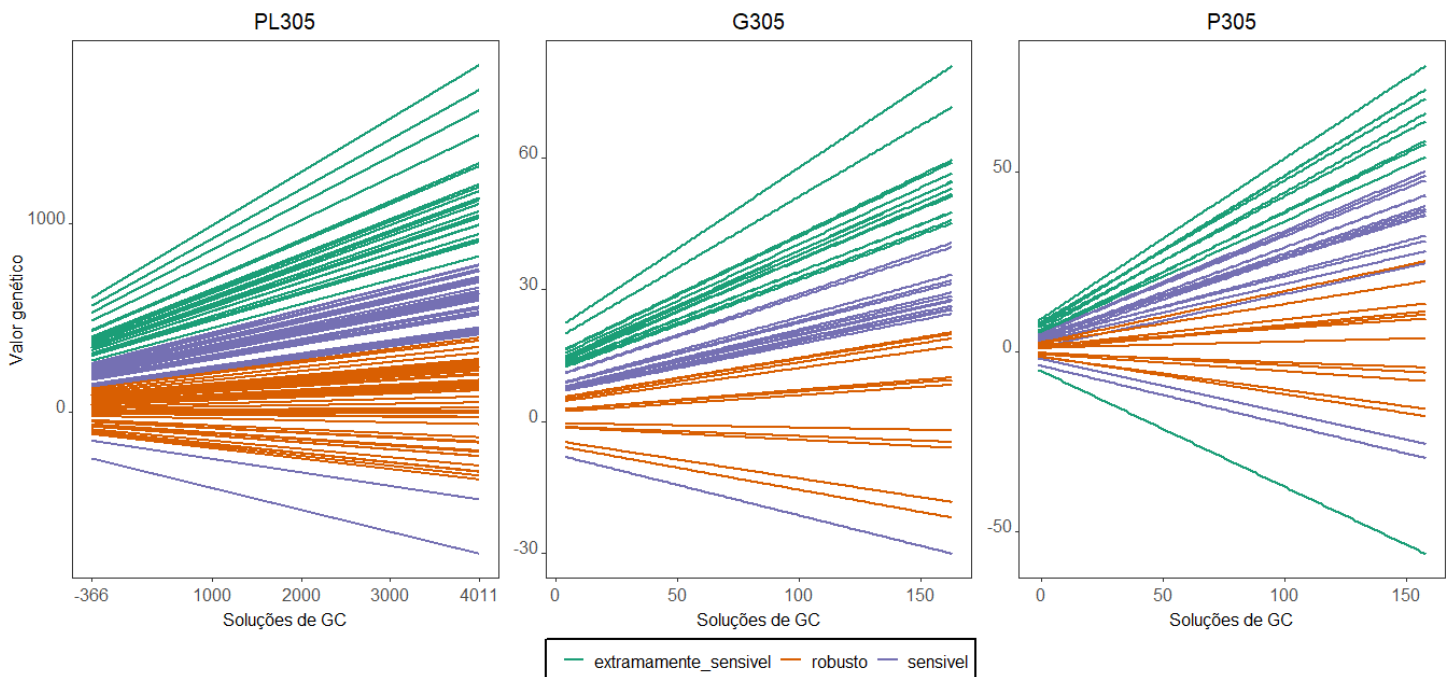


Figura 6. Normas de reação ao longo do gradiente ambiental para a produção de leite (PL305), gordura (G305) e proteína (P305) dos touros com no mínimo 15 filhas

5. DISCUSSÃO

As estimativas de variância genética aumentaram ao longo do gradiente ambiental para todas as características avaliadas. O mesmo foi observado para as estimativas de variância residual, com exceção da classe 5 de G305 e classe 3 de P305. Em geral, a variância genética foi menor que a variância residual e ambas as variâncias aumentaram proporcionalmente ao longo do gradiente ambiental. Estudos anteriores avaliando IGA para características de produção de leite, gordura e proteína também encontraram variações nas estimativas de variâncias genética e residual ao longo do gradiente ambiental (GAIA et al., 2018; MOREIRA et al., 2019; SANTANA Jr. et al., 2019; BOHLOULI et al., 2021; CHERUIYOT et al., 2020; SARTORI et al., 2022).

Maiores estimativas de variância genética em ambientes com maior nível de manejo podem ser justificados pelo fato que melhores condições de manejo permitem que os animais tenham capacidade de expressar seu potencial genético. A variância residual superior à genética indica que a variabilidade fenotípica é em sua maioria resultante de fatores ambientais. Os valores semelhantes de variância residual entre a classe 3 e 5 de G305 demonstram que as condições ambientais para essas classes contribuíram de forma similar para a variabilidade residual. De acordo com Oliveira et al. (2020), mudanças nas variâncias genética e residual é uma forma inicial para identificar a IGA e, mesmo não alterando a classificação dos genótipos,

pode influenciar negativamente na resposta à seleção, uma vez que os genótipos podem apresentar valores genéticos inferiores em ambientes com menores variabilidades.

As estimativas de herdabilidade ao longo do gradiente ambiental variaram de 0,17 a 0,36 para PL305, 0,22 a 0,65 para G305 e 0,13 a 0,80 para P305. Os valores de herdabilidade descritos na literatura encontram-se entre 0,10 a 0,35 para produção de leite, 0,22 para produção de gordura e 0,29 para produção de proteína (SANTANA Jr. et al., 2019; PAIVA et al., 2020; BRITO et al., 2020; CARRARA et al., 2022) corroborando, em geral, com os resultados encontrados neste estudo.

A herdabilidade é a proporção da variância total atribuída à variância genética aditiva, portanto alterações nas estimativas de variâncias promovem mudanças nas estimativas de herdabilidade. Embora apresentem variações, as estimativas de herdabilidade foram similares ao longo dos gradientes ambientais para a maioria das classes. Isso se deve ao fato das variâncias genéticas e residuais terem alterado de forma proporcional ao longo dos gradientes ambientais. Os valores de herdabilidade encontrados indicam que a variância genética contribuiu para a variância fenotípica, portanto é possível obter ganhos genéticos através da seleção. Visto que, a variância fenotípica não foi constante ao longo do gradiente ambiental é esperado diferentes respostas à seleção em ambientes distintos para as características avaliadas.

Na Figura 7 é apresentada a distribuição dos animais no gradiente ambiental para G305 e P305. Nota-se que a maior parte dos dados está concentrada no início e meio do gradiente ambiental e poucos dados são observados na parte final do gradiente ambiental. As estimativas altas de herdabilidade encontradas na classe 5 das características G305 e P305 podem ter sido causadas devido à escassez de dados no final do gradiente ambiental, além disso foi observado que o intervalo do gradiente ambiental foi maior para essa classe. Esses fatores podem ter influenciado nas estimativas dos componentes de variância, superestimando a variância genética e a herdabilidade.

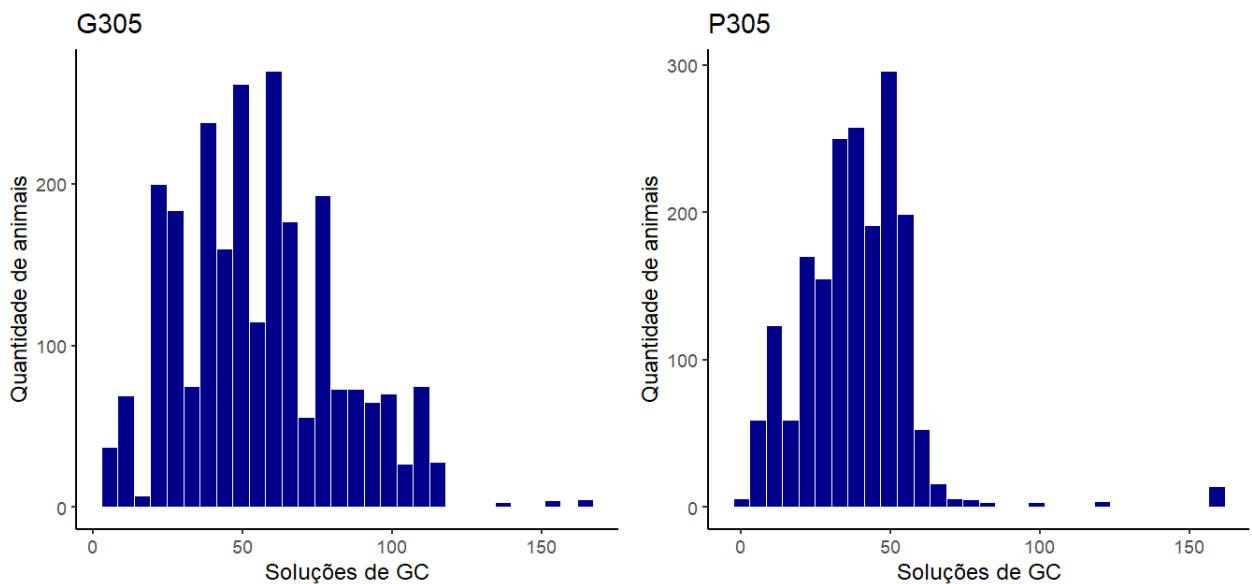


Figura 7. Distribuição dos animais avaliados ao longo do gradiente ambiental para produção de gordura (G305) e produção de proteína (P305) do leite

As correlações entre o intercepto e a inclinação foram superiores a 0,90 para todas as características avaliadas. De acordo com Ambrosini et al. (2016), a alta correlação entre o intercepto e a inclinação da norma de reação indica que os animais de maior valor genético médio no decorrer do gradiente ambiental tendem a apresentar melhores respostas em ambientes com elevado manejo.

Esses resultados discordam de Santana Jr. et al. (2019) que, ao avaliarem a produção de leite de animais Guzerá sob estresse térmico, encontraram valor de correlação entre o intercepto e a inclinação de -0,615. Os autores observaram que as normas de reação dos touros com alto valor genético variaram com respostas negativas ao longo do gradiente ambiental, enquanto que as normas de reação para os touros com baixo valor genético permaneceram constantes. Sendo assim, selecionar os animais para alta produção de leite sem considerar o efeito do estresse térmico poderia diminuir o mérito genético da raça.

Apesar de avaliar características leiteiras de animais Guzerá, os resultados diferentes observados entre o estudo atual e o realizado por Santana Jr. et al. (2019) podem ter sido causados pela diferença do gradiente ambiental adotado em cada estudo. Nas avaliações de estresse térmico, o Índice de Temperatura e Umidade (ITU) é considerado como gradiente ambiental, sendo o ITU a combinação de temperatura e umidade relativa. Já no grupo de contemporâneos há uma combinação de muitos fatores que incide sobre o rebanho em um determinado ano, assim diversos elementos combinados contribuem para os efeitos de soluções de GC. Portanto, a IGA pode atuar de forma diferenciada sobre as características de acordo com

o gradiente ambiental.

Foram observados valores altos de correlação genética entre os ambientes de baixo, médio e alto nível de manejo, indicando ausência de IGA complexa. Resultados semelhantes foram encontrados por Streit et al. (2012) e Shariati et al. (2007) ao avaliar características leiteiras de gado Holandês. Segundo esses autores, correlações genéticas altas entre os ambientes distintos indicam baixas ou ausência de reclassificação dos animais. Além disso, os resultados indicam que grupos de genes semelhantes estão envolvidos no controle das características avaliadas nos diferentes ambientes.

Em relação à sensibilidade dos animais, a maioria dos touros foram classificados como robustos, seguidos pelos sensíveis e extremamente sensíveis para todas as características avaliadas. O mesmo foi observado para a quantidade de filhas. Esses resultados demonstram que os genótipos robustos têm sido utilizados mais intensamente na raça Guzerá ou que as características de rusticidade e termotolerância dos touros robustos permitiu que as suas progênes se adaptassem melhor às diferentes condições ambientes presentes nas regiões tropicais do país.

Apesar de terem utilizado critérios de classificação dos touros diferentes do apresentado neste trabalho, Santos et al. (2020), ao trabalharem com dados de animais da raça Holandesa, observaram que a maioria dos touros foram classificados como extremamente robustos para as características de produção de leite, gordura e proteína. Esse comportamento também foi observado por Santos et al. (2019) para peso aos 365 e 550 dias de idade de animais Guzerá e Ambrosini et al (2016) para características de crescimento de bovinos Nelore.

De acordo com Santana Jr. et al. (2013) o ideal seria que os animais apresentassem norma de reação com alto intercepto e inclinação plana, ou seja, que os animais fossem robustos e com desempenho elevado em qualquer condição ambiental. Santos et al. (2020) ressaltam que o uso de genótipos plásticos em ambientes específicos pode aumentar o ganho genético e gerar melhor retorno econômico para o produtor.

Em relação às normas de reação e reclassificação dos touros, foi observado pequeno reordenamento dos animais apenas para P305. Esse resultado já era esperado devido aos valores altos de correlação genética entre ambientes indicar pouca ou nenhuma reclassificação dos animais. Resultados que diferem desse estudo foram relatados por Freitas et al. (2010), Santana Jr. et al. (2019) e Santos et al. (2020) que encontraram IGA complexa para características

leiteiras de bovinos. Embora a reclassificação não tenha sido significativa, houve alteração no valor genético dos animais, caracterizando IGA com efeito escala.

Segundo Streit et al. (2012), quando não ocorre reclassificação dos genótipos ao longo do gradiente ambiental, mas os componentes de variância aumentam com o aumento do nível produtivo, parte desse aumento é devido ao efeito escala, também causado por IGA. Porém, é difícil quantificar quanto da mudança nos componentes de variância é atribuída à IGA. De acordo com Calus e Veerkamp (2003) o efeito escala pode não alterar a classificação dos genótipos quando somente uma característica é avaliada. Contudo, se características com diferentes efeitos forem combinadas em um índice econômico, pode haver reclassificação baseada no índice, enfatizando a importância de se incluir a sensibilidade ambiental nas avaliações genéticas dos programas de melhoramento, em vez de somente corrigir esses efeitos no modelo estatístico. Segundo Toro-Ospina et al. (2022) para que os valores genéticos sejam mais acurados é importante considerar os efeitos da IGA nos modelos de avaliações genéticas, a fim de evitar a seleção inadequada dos genótipos.

6. CONCLUSÃO

Não foi observada presença de interação genótipo x ambiente complexa para as características de produção de leite, gordura e proteína de animais da raça Guzerá. No entanto, as estimativas de variâncias genéticas e residuais mudaram ao longo do gradiente ambiental indicando presença de interação genótipo x ambiente com efeito escala.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, L. G. Regressão aleatória: nova tecnologia pode melhorar a qualidade das avaliações genéticas. In: V Simpósio Brasileiro de Melhoramento Animal. **Anais...** Pirassununga: SBMA, 2004.
- 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.
- BARUSELLI, P. S.; CATUSSI, B. L. C.; ABREU, L. A.; ELLIFF, F. M.; SILVA, L. G.; BATISTA, E. S.; CREPALDI, G. A. Evolução e perspectivas da inseminação artificial em bovinos. **Revista Brasileira de Reprodução Animal**, v.43, n.2, p.308-314, 2019.
- BOHLOULI, M.; YIN, T.; HAMMAMI, H.; GENGLER, N.; KÖNIG, S. Climate sensitivity of milk production traits and milk fatty acids in genotyped Holstein dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v.104, n.6, 2021.
- BRITO, L. C.; PEIXOTO, M. G. C. D.; CARRARA, E. R.; SILVA, F. F.; VENTURA, BRUNELI, F. A. T.; LOPES, P. S. Genetic parameters for milk, growth, and reproductive traits in Guzerá cattle under tropical conditions. **Tropical Animal Health and Production**, v.52, n.5, p. 2251-2257, 2020.
- BRUNELI, F. A. T.; PEIXOTO, M. G. C. D.; SANTANA JUNIOR, M. L.; PEREIRA, R. J.; ARBEX, W. A.; PENNA, V. M.; ZADRA, L. E. F.; VERNEQUE, R. S.; LÔBO, R. B.; CARVALHO, M. R. S. Programa Nacional de Melhoramento do Guzerá para Leite: resultados do Teste de Progênie, do Arquivo Zootécnico Nacional e do Núcleo MOET. **Embrapa Gado de Leite - Documentos (INFOTECA-E)**, 2021.
- CALUS, M. Á.; 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, n.11, p.3756-3764, 2003.
- CARRARA, E. R.; PEIXOTO, M. G. C. D.; VERONEZE, R.; SILVA, F. F.; RAMOS, P. V. B.; BRUNELI, F. A. T.; ZADRA, L. E. F.; VENTURA, H. T.; JOSAHKIAN, L. A.; LOPES, P. S. **Animal Bioscience**, 2022.
- CHERUIYOT, E. K.; NGUYEN, T. T. T.; HAILE-MARIAM, M.; COCKS, B. G.; ABDELSAYED, M.; PRYCE, J. E. Genotype-by-environment (temperature-humidity) interaction of milk production traits in Australian Holstein cattle. **Journal of Dairy Science**, v. 103, n.3, 2020.
- CORRÊA, M. B. B.; DIONELLO, N. J. L.; CARDOSO, F. F. Efeito da interação genótipo-ambiente na avaliação genética de bovinos de corte. **R. Bras. Agrociência**, v.13, n.2, p.153-159, 2007.
- ERBE, M.; EDEL, C.; EMMERLING, R.; GOTZ, K. Assessing various environmental descriptors with respect to genotype x environment interaction for milk production traits in Bavarian Fleckvieh cattle. **Journal of Animal Breeding and Genetics**, 2022.

- FALCONER, D. S.; MACKAY, T. F. C. Introduction to Quantitative Genetics. 4th Edition, **Harlow: Longman Group Ltda.**, 1996.
- FAZEL, Y.; ESMAILIZADEH, A.; MOMEN, M.; ASADI FOZI, M. Importance of genotype by environment interaction on genetic analysis of milk yield in Iranian Holstein cows using a random regression model. **Animal Production Science**, v.59, n.8, p.1438-1445, 2018.
- FONSECA, P. A. S.; SANTOS, F. C.; ROSSE, I. C.; VENTURA, R. V.; BRUNELI, F. A. T.; PENNA, V. M.; VERNEQUE, R. S.; MACHADO, M. A.; SILVA, M. V. G. B.; CARVALHO, M. R. S.; PEIXOTO, M. G. C. D. Retelling the recent evolution of genetic diversity for Guzerá: inferences from LD decay, runs of homozygosity and N_e over the generations. **Livestock science**, v.193, p.110-117, 2016.
- GAIA, R. C.; FARIAS, R. M.; MOREIRA, R. P.; MARTINS, R.; MULIM, H. A.; LAGOS, E. B.; VALLOTO, A.; PEDROSA, V. B. Impacto da interação genótipo x ambiente nas herdabilidades para produção de leite em bovinos da raça holandesa. In: 28^o Congresso Brasileiro de Zootecnia, 55^o Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia. **Anais...** Goiânia: SBZ, 2018.
- GUZZO, N.; SARTORI, C.; MANTOVANI, R. Heterogeneity of variance for milk, fat and protein yield in small cattle populations: The Rendena breed as a case study. **Livestock Science**, v.213, p.54-60, 2018.
- HAYES, B. J.; DAETWYLER, H. D.; GODDARD, M. E. Models for genome x environment interaction: examples in livestock. **Crop Science**, v. 56, n. 5, p. 2251-2259, 2016.
- KIRKPATRICK, M; HECKMAN, N. A quantitative genetic model for growth, shape and other dimensional characters. **Journal of Mathematical Biology**, v. 27, p. 429-450, 1989.
- KOLMODIN, R.; STRANDBERG, E.; MADSEN, P.; JENSEN, J.; JORJANI, H. Genotype by environment interaction in Nordic dairy cattle studied using reaction norms. **Acta Agriculture Scandinavia, Section A, Animal Science**, v.52, p.11-24, 2002.
- MARCONDES, C. R.; MATOS, A. S. Interação genótipo-ambiente em bovinos: revisão de estudos no Brasil. **Embrapa Amazônia Oriental-Documentos (INFOTECA-E)**, 2010.
- MENICUCCI, A. M. F.; PEIXOTO, M. G. C. D.; TEODORO, R. L.; VERNEQUE, R. S.; PENNA, V. M. História do CBMG. Centro Brasileiro do Melhoramento Genético do Guzerá. Disponível em: <<https://www.cbmguzera.com.br/index.html>>. Acesso em: 22/11/2021.
- MISZTAL, I.; TSURUTA, S.; LOURENÇO, D.; MASUDA, Y.; AGUILAR, I.; LEGARRA, A.; VITEZICA, Z. **Manual for BLUPF90 family of programs**. Estados Unidos: University of Georgia, 2018. 142 p.
- MONTALDO, H. H.; PELCASTRE-CRUZ, A.; CASTILLO-JUÁREZ, H.; RUIZ-LÓPEZ, F. J.; MIGLIOR, F. Genotype x environment interaction for fertility and milk yield traits in Canadian, Mexican and US Holstein cattle. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v.15, n.2, 2017.
- MOREIRA, R. P.; PINTO, L. F. B.; VALLOTO, A. A.; PEDROSA, V. B. Evaluation of

genotype by environment interactions on milk production traits of Holstein cows in southern Brazil. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, v.32, n.4, p.459-466, 2019.

MOTA, R. R.; TEMPELMAN, R. J.; LOPES, P. S.; AGUILAR, I.; SILVA, F. F.; CARDOSO, F. F. Genotype by environment interaction for tick resistance of Hereford and Braford beef cattle using reaction norm models. **Genetics Selection Evolution**, v. 48, n. 1, p. 1-12, 2016.

MULIM, H. A.; CARNEIRO, P. L. S.; MALHADO, C. H. M.; PINTO, L. F. B.; MOURÃO, G. B.; VALLOTO, A. A.; PEDROSA, V. B. Genotype by environment interaction for fat and protein yields via reaction norms in Holstein cattle of southern Brazil. **Journal of Dairy Research**, v.88, n.1, p.16-22, 2021a.

MULIM, H. A.; PINTO L. F. B.; VALLOTO, A. A.; PEDROSA, V. B. Genotype by environment interaction for somatic cell score in Holstein cattle of southern Brazil via reaction norms. **Anim Bioscience**, v.34, n.4, p.499-505, 2021b.

NIGUSSIE, H.; KEBEDE, K.; ABEGAZ, S.; PAL, S. K.; MEKASHA, Y. Application of random regression model (RRM) in dairy cattle genetic evaluation. In: Proceedings of the 19^o Annual Conference of Ethiopian Society of Animal Production. **Anais...** Addis Ababa, p.31-44, 2011.

OLIVEIRA, M. R. A.; CAMPELO, J. E. G.; AZEVÊDO, D. M. M. R.; PIRES, L. C.; SOUSA JÚNIOR, S. C. Modelagem ponderal de bovinos da raça Tabapuã utilizando modelos de regressão aleatória. **Acta Tecnológica**, v.10, n.2, 2015.

OLIVEIRA, P. H. L.; NUNES, D.; ANDRADE, A. S.; GOUVEIA JUNIOR, J.; SILVA, L. S.; Estudo da heterogeneidade de variâncias na avaliação genética para o peso corporal aos 450 dias de idade em animais da raça Nelore. **Brazilian Journal of Development**, v.6, n.10, p.79773-79788, 2020.

TORO-OSPINA, A. M. T.; FARIA, R. A.; CASTAÑO, P. D.; SANTANA JUNIOR, M. L.; GONZALEZ, L. G.; ESPASANDIN, A. C.; SILVA, J. A. V. Genotype-environment interaction for milk production of Gyr cattle in Brazil and Colombia. **Genes & Genomics**, p. 1-9, 2022.

PAIVA; J. T.; PEIXOTO, M. G. C. D.; BRUNELI, F. A. T.; ALVARENGA, A. B.; OLIVEIRA, H. R.; SILVA, A. A.; SILVA; D. A.; VERONEZE, R.; SILVA, F. F.; LOPES, P. S. Genetic parameters, genome-wide association and gene networks for milk and reproductive traits in Guzerá cattle. **Livestock Science**, v.242, 2020.

PANETTO, J. C. C.; VERARDO, L. L. ; MACHADO, M. A.; MARTINS, M. F.; FAZA, D. R. L. R.; SILVA, M. V. G. B. Genotype by environment interaction in Brazilian dairy Gir cattle. In: Proceedings of the world congress on genetics applied to livestock production.

PEIXOTO, M. G. C. D.; CARVALHO, M. R. S.; EGITO, A. A.; STEINBERG, R. S.; BRUNELI, F. A. T.; MACHADO, M. A.; SANTOS, F. C.; ROSSE, I. C.; FONSECA, P. A. S. Genetic Diversity and Population Genetic Structure of a Guzerá (*Bos indicus*) Meta-Population. **Animals**, v.11, n.4, p.1125, 2021.

PEREIRA, R. J.; LOPES, P. S.; VERNEQUE, R. S.; SANTANA JÚNIOR, M. L.; LAGROTTA, M. R.; TORRES, R. A. Funções de covariância para produção de leite no dia do

controle em bovinos Gir leiteiro. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.45, n.11, p.1303-1311, 2010.

PFEIFFER, C.; FUERST, C.; SCHWARZENBACHER, H.; FUERST-WALTL, B. Genotype by environment interaction in organic and conventional production systems and their consequences for breeding objectives in Austrian Fleckvieh cattle. **Livestock Science**, v.185, p.50–55, 2016.

PIRES, B. V.; FREITAS, L. A.; SILVA, G. V.; MENDONÇA, G. G.; SAVEGNAGO, R. P.; LIMA, M. L. P.; EL FARO, L.; CYRILLO, J. N. S.G.; PAZ, C. C. P. Maternal-offspring behavior of Guzerat beef cattle. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.55, 2020.

R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

ROBERTSON, A. The sampling variance of the genetic correlation coefficient. **Biometrics**. v. 15, n. 3, p. 469-485, 1959.

ROSSE, I. C.; ASSIS, J. G.; OLIVEIRA, F. S.; LEITE, L. R.; ARAUJO, F.; ZERLOTINI, A.; VOLPINI, A.; DOMINITINI, A. J.; LOPES, B. C.; ARBEX, W. A.; MACHADO, M. A.; PEIXOTO, M. G. C. D.; VERNEQUE, R. S.; MARTINS, M. F.; COIMBRA, R. S.; SILVA, M. V. G. B.; OLIVEIRA, G.; CARVALHO, M. R. S. Whole genome sequencing of Guzera cattle reveals genetic variants in candidate genes for production, disease resistance, and heat tolerance. **Mammalian genome**, v. 28, n. 1-2, p. 66-80, 2016.

SANTANA JR., M. L.; ELER, J. P.; CARDOSO, F. F.; ALBUQUERQUE, L. G. D.; FERRAZ, J. B. Phenotypic plasticity of composite beef cattle performance using reaction norms model with unknown covariate. **Animal**, v.7, n.2, p.202-210, 2013.

SANTANA JR., M. L.; BIGNARDI, A. B.; PEREIRA, R. J.; MENÉNDEZ-BUXADERA, A.; EL FARO, L. Random regression models to account for the effect of genotype by environment interaction due to heat stress on the milk yield of Holstein cows under tropical conditions. **Journal of applied genetics**, v. 57, n. 1, p. 119-127, 2016.

SANTANA JR., M. L.; PEREIRA, R. J.; BIGNARDI, A. B.; EL FARO, L.; PIRES, M. F. Á.; ANDRADE, R. G.; PEREZ, B. C.; BRUNELI, F. A. T.; PEIXOTO, M. G. C. D. Dual purpose Guzera cattle exhibit high dairy performance under heat stress. **Journal of Animal Breeding and Genetics**, v.137, n.5, p.486-494, 2019.

SANTOS, J. C.; MALHADO, C. H. M.; AMBROSINI, D. P.; MARTINS FILHO, R.; ARAUJO, A. C.; CARNEIRO, P. L. S. Normas de reação para peso aos 365 e 550 dias de idade em bovinos Guzera no Nordeste do Brasil. **Arch. Zootec.** v.68, 264, p.562-570, 2019.

SANTOS, J. C.; MALHADO, C. H. M.; COBUCI, J. A.; REZENDE, M. P. G.; CARNEIRO, P. L. S. Genotype-environment interaction for productive traits of Holstein cows in Brazil described by reaction norms. **Tropical Animal Health and Production**, v.52, n.5, p.2425-2432, 2020.

SARTORI, C.; TIEZZI, F.; GUZZO, N.; MANCIN, E.; TULIOZI, B.; MANTOVANI, R. Genotype by environment interaction and selection response for milk yield traits and

conformation in a local cattle breed using a reaction norm approach. **Animals**, v.12, n.7, p.839, 2022.

SCHIMID, M.; IMORT-JUST, A.; EMMERLING, R.; FUERST, C.; HAMANN, H.; BENNEWITZ, J. Genotype-by-environment interactions at the trait level and total merit index level for milk production and functional traits in Brown Swiss cattle. **Animal**, v.15, n.1, p.100052, 2021.

SILVA, D. A.; LOPES, P. S.; COSTA, C. N.; SILVA, A. A.; SILVA, H. T.; VERONEZE, R.; THOMPSON, G.; CARVALHEIRA, J. Genotype by environment interaction for Holstein cattle populations using autoregressive and within- and across-country multi-trait reaction norms test-day models. **Animal**, v.15, n.2, p.100084, 2021.

SILVA, J. A.; BIGNARDI, A. B.; CARDOSO, M. G. R.; FERRAZ, J. B. S.; ELER, J. P.; MENÉNDIZ-BUXADERA, A.; PEREIRA, R. J.; SANTANA JÚNIOR, M. L. Interação genótipo × ambiente térmico durante o final da gestação para peso ao nascimento de bovinos de corte compostos. In: XIV Simpósio Brasileiro de Melhoramento Animal. **Anais...** Santa Catarina: SBMA, 2021b.

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, n.5, p.380-389, 2012.

VAN DER LAAK, M.; VAN PELT, M. L.; JONG, G.; MULDER, H. A. Genotype by environment interaction for production, somatic cell score, workability, and conformation traits in Dutch Holstein-Friesian cows between farms with or without grazing. **Journal of Dairy Science**, v.99, n.6, 2016.

WAKCHAURE, R.; GANGULY, S.; PRAVEEN, P. K. Genotype x environment interaction in animal breeding: a review. **Biodivers. Conserv. Chang. Clim**, v.3, p.60-73, 2016.

ZHANG, Z.; KARGO, M.; LIU, A.; THOMASEN, J. R.; PAN, Y.; SU, G. Genotype-by-environment interaction of fertility traits in Danish Holstein cattle using a single-step genomic reaction norm model. **Heredity**, v.123, p.202–214, 2019.