

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA**

**AVALIAÇÃO BIOECONÔMICA DE SISTEMAS DE CRIA DE BOVINOS DE
CORTE INTENSIFICADOS COM IRRIGAÇÃO DE PASTAGENS**

FREDY ANDREY LOPEZ GONZALEZ
Mestre em Produção Animal/UFRGS
Zootecnista/UdeA[†]
Tecnólogo em Sistemas de Informação/UNAC[†]
[†]Colômbia

Tese apresentada como um dos requisitos à obtenção do Grau de Doutor em
Zootecnia
Área de Concentração Produção Animal

Porto Alegre (RS), Brasil
Dezembro de 2018

Catlogação na publicação

CIP - Catalogação na Publicação

GONZALEZ, FREDY ANDREY LOPEZ
AVALIAÇÃO BIOECONÔMICA DE SISTEMAS DE CRIA DE
BOVINOS DE CORTE INTENSIFICADOS COM IRRIGAÇÃO DE
PASTAGENS / FREDY ANDREY LOPEZ GONZALEZ. -- 2018.
144 f.
Orientador: JÚLIO OTÁVIO JARDIM BARCELLOS.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de
Pós-Graduação em Zootecnia, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. modelo bioeconômico. 2. otimização estocástica.
3. risco climático. 4. simulação de Monte Carlo. I.
BARCELLOS, JÚLIO OTÁVIO JARDIM, orient. II. Título.

Documento banca examinadora

Fredy Andrey Lopez Gonzalez
Mestre em Zootecnia

TESE

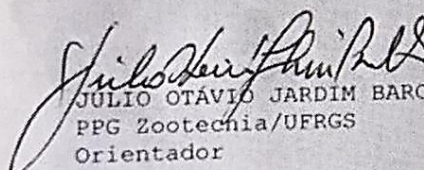
Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

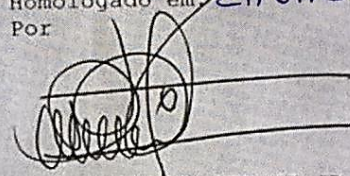
DOUTOR EM ZOOTECNIA

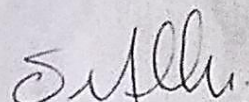
Programa de Pós-Graduação em Zootecnia
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

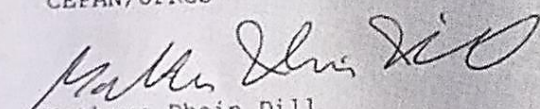
Aprovada em: 21.12.2018
Pela Banca Examinadora

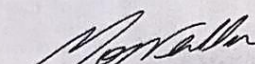
Homologado em: 21/01/2019
Por

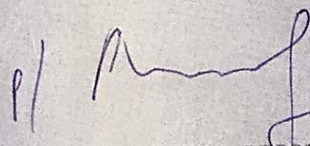

JULIO OTÁVIO JARDIM BARCELLOS
PPG Zootecnia/UFRGS
Orientador


DANILO PEDRO STREIT JR.
Coordenador do Programa de
Pós-Graduação em Zootecnia


Tamara Esteves de Oliveira
CEPAN/UFRGS


Matheus Dhein Dill
Universidade Federal Rural de Pernambuco


Marcelo Osório Wallau
Departamento de Agronomia/
Universidade da Flórida


CARLOS ALBERTO BISSANI
Diretor da Faculdade de Agronomia

“Be a free thinker and don't accept everything you hear as truth. Be critical and evaluate what you believe in”.

Αριστοτέλης

“Los seres humanos no nacen para siempre el día en que sus madres los alumbran, sino que la vida los obliga a parirse a sí mismos una y otra vez”.

Gabriel García Márquez

AGRADECIMENTOS

Ao Eterno, pela vida maravilhosa que me concedeu e pelas pessoas que ele colocou ao meu redor.

Agradeço a toda minha família, em especial a minha querida mãe, Marilce González González, pela educação, por todo o apoio e amor concedidos sempre. Aos meus queridos irmãos Yeison, July Margarita e Wilfran pelo companheirismo e parceria ao longo das nossas vidas. Aos meus prezados avós Carmen e Arturo pelo afeto e pelas suas orações para comigo, e a minha tia Elsy pelo seu carinho e apoio familiar em todo momento.

Ao meu amigo e pai Gregorio Restrepo pelos ensinamentos de vida, por apoiar os primeiros passos da minha educação e por me colocar dentro do avião rumo a Porto Alegre, fato que jamais esquecerei.

A minha família no Brasil, família Heller Pereira, agradeço por todo o acolhimento recebido, pelo carinho e atenção concedidos. Em especial a minha amada namorada Carolina, pelo seu amor, carinho, cuidado e por estar sempre ao meu lado. Também agradeço aos meus sogros, Natanael e Carmem, e aos avós Kurt e Alice, por serem pessoas tão maravilhosas e queridas que me oportunizaram tantas coisas maravilhosas aqui no Brasil.

À Profa. Liliana Mahecha Ledesma por me incentivar a realizar a viagem que construiu meu projeto de vida, a grande viagem ao Brasil.

A toda a equipe do NESPro nas suas diferentes gerações, em especial aos meus amigos Jusecléia Lopes e Amir Sessim pela amizade sincera e pela parceria.

Agradeço ao meu orientador e mentor, Júlio Otávio Jardim Barcellos, por todas as oportunidades concedidas, pelos ensinamentos e principalmente pelas lições de vida, que ficarão para sempre.

Agradeço ao Prof. Harold, por ter me recebido no Brasil, pela amizade, pela oportunidade e por todo o conhecimento adquirido.

Ao Prof. Nabinger pelas trocas de experiências e pela amizade.

Ao Prof. José Fernando Piva Lobato, muito obrigado pela amizade.

Ao Programa de Pós-Graduação em zootecnia, na pessoa do Prof. Danilo Streit Junior pela amizade e por estar sempre disposto a ajudar quando necessário.

Aos professores e demais funcionários da UFRGS, por terem contribuído no meu crescimento humano, técnico e profissional.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) do governo Brasileiro pelo apoio financeiro dos meus estudos de Pós-Graduação em nível de Mestrado e Doutorado.

AValiação Bioeconômica de Sistemas de Cria de Bovinos de Corte Intensificados com Irrigação de Pastagens ¹

Autor: Fredy Andrey Lopez Gonzalez

Orientador: Prof. Júlio Otávio Jardim Barcellos

RESUMO – A cria é a etapa de menor eficiência biológica devido ao alto custo energético de manutenção da vaca. Além disso, é um sistema que depende basicamente de tecnologias de processos, pois o uso de insumos não produz grandes impactos na produtividade final. Contudo, em decorrência da maior concorrência pelo uso de terras, a cria também passa por questionamentos com relação ao uso de processos mais intensivos de produção. Neste contexto, uma das formas de aumentar a produtividade é mantendo mais estável a produção de forragens, favorecendo variedades de elevado potencial de crescimento (p.e., capim sudão), sendo isto possível através do uso da irrigação de pastagens, que também ajuda a mitigar os efeitos dos fenômenos climáticos como El Niño Oscilação Sul. No entanto, a intensificação pode ter algumas desvantagens, frequentemente associadas a um maior consumo de insumos. Portanto, acima de um certo nível de intensificação, questiona-se o potencial de mitigação das mudanças climáticas sobre o aumento de produtividade. Assim, a proposta deste estudo foi desenvolver um modelo de simulação para avaliar os efeitos da intensificação em sistemas de cria, utilizando níveis de produção de energia por meio de pastagens cultivadas e a irrigação, sobre parâmetros bioeconômicos. A análise do sistema e sua síntese, através da relação dos submodelos de produção de energia, estrutura de rebanho, exigências de energia dos animais e o econômico, permitiu entender as respostas da intensificação sobre parâmetros bioeconômicos. Este estudo revela que a intensificação com irrigação pode aumentar a produtividade em 66%, intensificando no máximo 20% da área. Isto considerando os efeitos dos eventos climáticos que podem ocorrer nos sistemas de produção em um horizonte de 10 anos. Não obstante, os impactos biofísicos não compensaram o custo total associado à produção, indicando a descapitalização do sistema ao longo do tempo. Contudo, a irrigação minimizou o risco econômico, frente às mudanças climáticas, ao estabilizar a produção de energia no sistema. Em um contexto holístico do sistema, os resultados supracitados podem sinalizar outras perspectivas sobre a configuração deste sistema de produção. A primeira é a necessidade de avaliar as respostas bioeconômicas da intensificação, exclusivamente, no complexo campo natural. A segunda, avaliar a intensificação integrando outras fases produtivas de melhor eficiência biológica, como a recria, a terminação ou o ciclo completo. E a terceira, avaliar cenários alternativos que aumentam a eficiência bioeconômica da cria por meio de relações de eficiência entre o custo da terra, o custo de produção, a produção por área e o preço do produto.

Palavras-chave: modelo bioeconômico, otimização estocástica, risco climático, simulação de Monte Carlo

¹Tese de Doutorado em Zootecnia – Produção Animal, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (144 p.). Dezembro 2018.

BIOECONOMIC EVALUATION OF BEEF COW-CALF SYSTEMS INTENSIFIED WITH PASTURE IRRIGATION ²

Author: Fredy Andrey Lopez Gonzalez

Advisor: Prof. Júlio Otávio Jardim Barcellos

ABSTRACT - Cow-calf production is the least biologically efficient stage due to the high energy cost of maintaining the cow. In addition, it is a system that depends basically on process technologies, since the use of inputs does not produce great impacts on the final productivity. However, because of the greater competition for land use, the cow-calf production systems are being pressured to further intensify its production processes. In this context, one of the ways is to keep pasture production more stable, favoring varieties with high potential growth (e.g., sudangrass). This is possible through pasture irrigation, which also helps to mitigate the effects of climatic phenomena as El Niño Southern Oscillation. However, intensification may have some drawbacks, often associated with increased consumption of inputs. Therefore, above a certain level of intensification, the potential of climate change mitigation on productivity increase is questioned. Thus, the proposal of this study was to develop a simulation model to evaluate the effects of intensification in a cow-calf production system, using levels of energy production through cultivated pastures and irrigation, on bioeconomic parameters. The analysis of the system and its synthesis, through the relation of submodels energy production, herd structure, animal energy requirements and economic, allowed to understand the intensification responses on bioeconomic parameters. This study reveals that intensification with irrigation can increase productivity by 66%, intensifying at most 20% of the area. This considering the effects of climatic events that can occur in production systems over a 10-year horizon. However, these biophysical impacts could not afford the total cost associated with production, indicating the decapitalization of the system over time. Although, in this situation, irrigation proved to minimize the economic risk to climate change by stabilizing the energy production in the system. In a holistic ownership context, the above results may be signaling other perspectives on the configuration of the production system. The first is the need to evaluate the bioeconomic responses of intensification, exclusively, in the complex natural grassland. The second is to evaluate intensification by integrating other productive phases of better biological efficiency, such as rearing, finishing or whole cycle. And third, to evaluate alternative scenarios that increase the bioeconomic efficiency of the cow-calf through efficiency relations between the cost of land, the cost of production, the production per area and the price of the product.

Key words: bioeconomic model, climate risk, Monte Carlo simulation, stochastic optimization

²Doctoral thesis in Animal Science, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil (144 p.). December 2018.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	17
1. INTRODUÇÃO	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1. Sistemas de produção na bovinocultura de corte	20
2.1.1. Intensificação na cria de bovinos de corte	22
2.1.1.1. Fatores que influenciam os principais componentes biológicos da produtividade e da eficiência na cria de bovinos de corte.....	24
2.1.1.1.1. Produtividade	24
2.1.1.1.2. Eficiência.....	24
2.1.1.1.2.1. Componentes-chave da eficiência materna	25
2.1.1.1.2.2. Definições da eficiência materna	25
2.1.2. Estrutura de rebanho	30
2.1.2.1. Taxa de natalidade	31
2.1.2.2. Idade ao primeiro acasalamento.....	32
2.1.3. Fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS).....	34
2.1.3.1. A irrigação de pastagens como minimizadora do risco	35
2.1.4. Os custos de produção	36
2.2. Modelagem e simulação no contexto da produção de alimentos	38
2.2.1. Um breve contexto histórico	38
2.2.2. Classificação dos modelos de simulação	39
2.2.3. Etapas da elaboração de um modelo de simulação	40
2.2.4. Modelos agropecuários.....	43
2.2.4.1. Modelos na cria de bovinos de corte	45
3. HIPÓTESE E OBJETIVOS	47
3.1. Hipótese.....	47
3.2. Objetivo geral.....	47
3.2.1. Objetivos específicos	47
4. MÉTODO GERAL	47
CAPÍTULO II ¹	50
5. Intensification of cow-calf production: How does the system respond biologically to energy inputs in a long-term horizon?	51
CAPÍTULO III ¹	85

6. Intensificação da cria de bovinos de corte: Quais são as respostas bioeconômicas em um contexto de mudança climática e incerteza do preço de mercado?	86
CAPÍTULO IV	126
7. CONCLUSÕES.....	127
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	128
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	130
10. VITA.....	144

RELAÇÃO DE TABELAS

CAPITULO I

Tabela 1. Indicadores de resultados da bovinocultura de corte brasileira.....24

Tabela 2. Resumo das definições disponíveis para descrever a eficiência materna.....28

Tabela 3. Questões que determinam a aplicabilidade das definições que descrevem a eficiência materna.....29

Tabela 4. Estrutura do rebanho proposta para um sistema de cria com idade ao primeiro parto aos três anos e diferentes taxas de natalidade do rebanho de cria adulto.....31

Tabela 5. Quantidade de animais necessários para produzir 100 terneiros em função da taxa de natalidade e idade ao primeiro acasalamento.....32

Tabela 6. Simulação de ganho médio diário de peso vivo (GMD) em função do peso ao desmame e idade desejadas para novilhas provenientes de rebanhos com vacas adultas com peso vivo médio de 480 kg.....33

Tabela 7. Descrição dos itens de custo de produção para a pecuária.....37

Tabela 8. Custos de produção e indicadores econômicos de sistemas de cria de bovinos de corte.....38

Tabela 9. Modelos bioeconômicos envolvendo sistemas de cria de bovinos de corte, suas principais intervenções e respostas avaliadas.....46

CAPITULO II

Table 1. Parameters of the herd structure submodel.....81

Table 2. Parameters of the energy requirements submodel.....82

Table 3. Values of the parameters of the energy production submodel.....83

Table 4. Parameters of the pasture energy production submodel.....84

CAPITULO III

Tabela 1. Descrição geral dos cenários no horizonte de 10 anos.....117

Tabela 2. Parâmetros do submodelo estrutura de rebanho.....118

Tabela 3. Parâmetros do submodelo produção de energia.....119

Tabela 4. Parâmetros do submodelo produção de energia das pastagens.....120

Tabela 5. Variáveis aleatórias, seus parâmetros de distribuição de probabilidade e o peso médio das categorias animais comercializadas..... 121

Tabela 6. Efeito da intensificação sobre parâmetros biofísicos e econômicos da cria de bovinos de corte.....122

Tabela 7. Parâmetros físicos e econômicos da intensificação da cria de bovinos de corte, resultados médios anais de um horizonte de 10 anos.....123

Tabela 8. Efeito anual do nível de intensificação associado ao evento climático sobre parâmetros econômicos (US\$/ha/ano).....124

Tabela 9. Matriz de custo anual (US\$) por nível de intensificação da cria de bovinos de corte, resultados médios de um horizonte de 10 anos.....125

RELAÇÃO DE FIGURAS

CAPITULO I

- Figura 1.** Representação da cadeia produtiva da carne bovina.....20
- Figura 2.** Esquema geral do ciclo produtivo da produção de bovinos de corte...21
- Figura 3.** Fluxograma de processos de um sistema de cria de bovinos de corte.....22
- Figura 4.** Sistemas de produção de bovinos de corte de acordo com o regime alimentar.....23
- Figura 5.** Representação da distribuição da energia exigida pelos diferentes processos fisiológicos na produção de bovinos de corte.....26
- Figura 6.** Diagrama simplificado apresentando os principais componentes da eficiência materna e suas interações.....27
- Figura 7.** Taxa média de desfrute no Brasil e de sistemas mais evoluídos.....34
- Figura 8.** Linha do tempo resumindo os principais eventos que influenciaram o desenvolvimento de modelos de sistemas agrícolas.....39
- Figura 9.** Esquema geral da classificação dos modelos.....39
- Figura 10.** Esquema geral das etapas de elaboração de um modelo de simulação.....42
- Figura 11.** Representação simplificada do ciclo de modelagem, consistindo nos quatro principais passos do desenvolvimento do modelo e seus correspondentes elementos de avaliação.....43
- Figura 12.** Número de modelos agropecuários que foram aplicados para o desenvolvimento de políticas em diferentes regiões da União Europeia.....44
- Figura 13.** Setores para os quais as políticas foram avaliadas com modelos de simulação.....45

CAPITULO II

- Figure 1.** Geographic location of the Brazilian pampa biome.....70
- Figure 2.** Timeline of the main processes of the production cycle of beef cow-calf systems in the Southern Hemisphere.....71
- Figure 3.** Simplified general diagram of the proposed conceptual model for the intensification of beef cow-calf systems. Where A is the setting of intensification

levels (intervention), *B* shows the relations among the energy production submodel variables and *C* the relations among the herd structure submodel variables.....72

Figure 4. Simplified diagram of the relations among the energy requirements submodel variables.....73

Figure 5. Effect of intensification level on carrying capacity in a 10-year horizon.....74

Figure 6. Annual metabolizable energy production and requirements as a function of intensification level and ENSO event.....75

Figure 7. Carrying capacity (number of dams) and number of heads produced annually, as a function of intensification level and ENSO event.....76

Figure 8. Annual productivity and biological efficiency as a function of intensification level and ENSO event.....78

Figure 9. Productivity and annual biological efficiency as a function of intensification level in a 10-year horizon.....78

Figure 10. Metabolizable energy production and requirements, as a function of intensification level in a 10-year horizon.....79

Figure 11. Carrying capacity (number of dams) and number of heads produced annually, as a function of intensification level calculated for a 10-year horizon.....80

CAPITULO III

Figura 1. Localização geográfica do bioma pampa Brasileiro..... 109

Figura 2. Linha do tempo com os principais processos do ciclo produtivo dos sistemas de cria de bovinos de corte no hemisfério sul..... 110

Figura 3. Esquema geral simplificado do modelo conceitual proposto da intensificação dos sistemas de produção da cria de bovinos de corte. Em que *A* é a configuração dos níveis de intensificação (intervenção).....111

Figura 4. Participação percentual da produção de bezerros desmamados, das vacas de descarte e novilhas de descarte sobre a produtividade e receita anual, em um horizonte de 10 anos..... 112

Figura 5. Portfólio de risco da margem operacional efetiva, em um horizonte de 10 anos, em diferentes níveis de intensificação da cria de bovinos de corte com e sem uso de irrigação de pastagem. BS = cenário base; NI = média dos cenários intensificados sem irrigação; WI = média dos cenários intensificados com

irrigação (A, acima). Para mais detalhes sobre os cenários de B (abaixo), ver Tabela 1... 113

Figura 6. Análise de sensibilidade da margem operacional efetiva em decorrência da variação dos preços de mercado do bezerro desmamado, da vaca e da novilha de descarte, no BS (cenário base; barras verdes), na média dos cenários intensificados com irrigação (WI5%, WI10%, WI15% e WI20%; barras amarelas) e na média dos cenários intensificados sem irrigação (NI5%, NI10%, NI15% e NI20%; barras vermelhas). Os inputs foram ranqueados de acordo com o efeito na média da saída.....114

Figura 7. Otimização estocástica do peso do bezerro à desmama necessário (PEFW = ponto de equilíbrio físico) para neutralizar o custo operacional efetivo e seu respectivo impacto na MOE (margem operacional efetiva), com uma probabilidade de ocorrência de 90%. Estes resultados foram apresentados somente nos cenários onde a MOE foi negativa (sem irrigação, NI10%, NI15% e NI20%; com irrigação, WI15% e WI20%)..... 115

Figura 8. Otimização estocástica do preço do bezerro à desmama necessário (PEMP = ponto de equilíbrio monetário) para neutralizar o custo operacional efetivo e seu respectivo impacto na MOE (margem operacional efetiva), com uma probabilidade de ocorrência de 90%. Estes resultados foram apresentados somente nos cenários onde a MOE foi negativa (sem irrigação, NI10%, NI15% e NI20%; com irrigação, WI15% e WI20%)..... 116

RELAÇÃO DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABC	Custo baseado em atividades
BS	Baseline scenario
CC	Cull cow
CEPEA	Centro de estudos avançados em economia aplicada
CF	Custos fixos
CH	Cull heifer
COE	Custo operacional efetivo
CONABI	Companhia nacional de abastecimento
COT	Custo operacional total
CRF	Cost of remuneration factors
CSIRO	Commonwealth scientific and industrial research organisation
CT	Custo total
CV	Custos variáveis
CW	Calf weaned
DAR	Daily dry-matter accumulation rate
DM	Dry matter
ECF	Energetic concentration of forage diet
EE	Economic efficiency
EFH	Efficiency of forage harvest
EM	Energia metabolizável
ENOS	El Niño Oscilação Sul
ENSO	El Niño-Southern oscillation
EOC	Effective operational cost
EOM	Effective operating margin
FM	Forage mass
FSD	First order stochastic dominance
GA	Genetic algorithms
GMD	Ganho médio diário de peso vivo
ha	Hectare
L	Labor
LW	Live weight
MC	Monte Carlo
ME	Metabolizable energy
MEA	Metabolizable energy available
ML	Margem líquida
MS	Matéria seca
n.a	não aplicável
NCC	Number of cull cows
NCH	Number of cull heifers
NCW	Number of calves weaned
NESPro	Núcleo de Estudos em Sistemas de Produção de Bovinos de Corte e Cadeia Produtiva
NI	Not irrigated
NM	Net margin

NOAA	National oceanic and atmospheric administration
NRC	National research council
PCC	Price of cull cow
PCC	Market price of the cull cow
PCH	Price of cull heifer
PCH	Market price of the cull heifer
PCW	Price of calf weaned
PCW	Market price of the calf at weaning
PDF	Probability distribution functions
PER	Parâmetros de estrutura de rebanho
Pr	Productivity
PV	Peso vivo
R	Revenue
RMSP	Rendimento da matéria seca da pastagem
RS	Rio Grande do Sul
SEAPI	Secretaria de agricultura, pecuária e irrigação
TC	Total cost
Tcal	Tera calories
TDN	Total digestible nutrients
TOC	Total operating cost
TOM	Total operating margin
TSM	Temperatura da superfície do mar
UVCLW	Unit variable cost per additional kg of ive weight
VC	Variable costs
VEM	Valor econômico marginal
VEPZ	Valores econômicos de parâmetros zootécnicos
VPL	Valor presente líquido
VV	Vida útil da vaca
WCC	Weight of cull cow
WCH	Weight of cull heifer
WCW	Weight of calf at weaning
WCWSO	Weaning calf weight tested in stochastic optimization
WI	With irrigation

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial combinada com a mudança de preferências alimentares nas economias emergentes está levando a um aumento significativo na demanda por produtos de origem animal, que deverá duplicar até o ano de 2050. (Tilman et al., 2011). Esta modificação está acontecendo no contexto da mudança climática global e escassez de recursos associados, levando à necessidade de uma intensificação agrícola sustentável (Herrero et al., 2009; Garnett et al., 2013).

Dentro do ciclo produtivo da bovinocultura de corte, a cria é a fase de menor eficiência biológica (Nasca et al., 2015). Isto está fundamentado em que do total de energia metabolizável (**EM**) requerida anualmente, aproximadamente 70 a 75% é usada para atender as necessidades das funções de manutenção da vaca (Ferrell & Jenkins, 1985). Além disso, existe uma crescente necessidade de aumentar produtividade nos sistemas de cria, devido à concorrência com as lavouras pelo uso da terra (Oliveira et al., 2017), à necessidade de melhorar o resultado econômico do pecuarista (Ash et al., 2015) e à crescente demanda mundial por carne bovina (De Oliveira Silva et al., 2016).

O consumo de EM é um fator determinante para a produtividade na produção animal, e as estimativas da disponibilidade de energia nos alimentos são essenciais para descrever as necessidades nutricionais do rebanho (Galyean et al., 2016). Os requerimentos de EM em um sistema de cria de bovinos de corte podem ser divididos em componentes da vaca, animais de reposição, bezerros antes da desmama e touros (Ferrell & Jenkins, 1985). Os inputs de energia nas unidades de produção são necessários para manutenção, crescimento, assim como para as fases de gestação, lactação e reprodução. Portanto, uma quantidade adequada de EM é necessária para cada uma dessas funções a fim de garantir o nível desejado de output (Walmsley et al., 2016). Diante disso, como será a resposta da intensificação da cria através do incremento da produção de EM em horizonte de tempo que capture os efeitos de fenômenos climáticos sobre os níveis de produção de energia e seus impactos bioeconômicos?

Uma das formas de aumentar a produção de EM é mantendo mais estável a produção de forragens, favorecendo variedades de elevado potencial de crescimento (por exemplo as C4), sendo isto possível através do uso da irrigação de pastagens. Neste contexto, a irrigação de pastagens surge como uma tecnologia para otimizar o uso da área por meio do aumento da capacidade de suporte de animais (Azevedo & Saad, 2009). No entanto, o uso desse tipo de tecnologia pode ter algumas desvantagens, frequentemente associadas a um maior investimento em equipamentos ou maquinário, além dos custos de implantação da pastagem. Portanto, acima de um certo nível de intensificação, questiona-se o potencial de mitigação das mudanças climáticas no aumento da produtividade por unidade de área (Casey & Holden, 2006; Veysset et al., 2010; Gerber et al., 2011). Assim, a complexidade das relações existentes entre os fatores que compõem a intensificação de sistemas de cria de bovinos de corte tem dificultado a tomada de decisão e a avaliação do impacto de estratégias nos parâmetros bioeconômicos (Monjardino et al., 2015). Portanto, para compreender a complexidade do sistema, devem-se analisar os elementos, suas

inter-relações e a influência do ambiente (Moore et al., 2009). Devido a essa conjuntura, é necessário que os processos de intensificação integrem componentes biofísicos e econômicos dos sistemas de produção (Kragt et al., 2016), a fim de realizar adequadas avaliações dentro de um contexto bioeconômico (Flichman et al., 2011). Os modelos bioeconômicos na produção animal podem ajudar os tomadores de decisão e os pesquisadores a analisar os trade-offs entre as inúmeras possibilidades e direcionar a futura produção para uma maior sustentabilidade (Mosnier et al., 2017).

Alguns modelos bioeconômicos têm sido desenvolvidos para avaliar sistemas de cria de bovinos de corte (Mosnier et al., 2009; Villalba et al., 2010; Monjardino et al., 2015; Baber et al., 2016; Berger et al., 2017). No entanto, nenhum dos modelos disponíveis têm avaliado respostas bioeconômicas decorrentes do aumento de entrada de energia no sistema, considerando os impactos do El Niño Oscilação Sul (**ENOS**) em um horizonte de longo prazo. Assim, entende-se que os resultados gerados por este estudo, sobre a intensificação na cria de bovinos de corte, são relevantes e podem servir como suporte à tomada de decisão dos atores desta atividade e além disso pode servir como norteador de futuras pesquisas.

No capítulo um é apresentada uma vasta revisão de literatura sobre sistemas de produção da cria de bovinos de corte. Isto complementa os dois manuscritos propostos (capítulo dois, o modelo e a avaliação de parâmetros biofísicos; e 3, o modelo e a avaliação de parâmetros bioeconômicos), que é apresentado de uma forma lógica, levando às origens e ao desenvolvimento das ideias por trás deste projeto. O capítulo dois traz uma descrição geral do modelo, explica como foi desenvolvido, quais foram seus componentes, seus pressupostos, como ele funciona e sobre como foi realizada a etapa de validação/verificação. O modelo bioeconômico é proposto no capítulo três, o qual incorpora resultados de receita, custeio, indicadores risco, de sensibilidade e de otimização estocástica para avaliar os diferentes cenários de intensificação propostos. Por fim, o capítulo quatro traz as conclusões e considerações finais desta tese.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sistemas de produção na bovinocultura de corte

Na agricultura, a proliferação do pensamento sistêmico começou em meados dos anos 1960 e a partir daí seus conceitos foram aplicados em outras áreas (Dent, 1975). É importante mencionar que a teoria geral dos sistemas e a abordagem holística constituem um paradigma filosófico e não uma fórmula operacional (Van Dyne & Abramsky, 1975). A visão sistêmica oferece uma estrutura adequada para o estudo de sistemas com muitos componentes inter-relacionados, como é geralmente o caso na produção agropecuária (Walters et al., 2016).

O sistema de produção de bovinos de corte é constituído por um conjunto coordenado de etapas inter-relacionadas que tem como objetivo final a produção de carne, buscando benefícios econômicos (Herring, 2014). Um sistema de produção deve possuir na sua configuração, aspectos relacionados com o meio-ambiente, capital, recursos humanos, aspectos sociais da região, perfil do empresário, mercado, tecnologia de produção e a logística (Figura 1). Só a visão integrada de todos esses fatores permitirá a implantação e desenvolvimento de um sistema de produção de forma sustentável e lucrativa (Barcellos et al., 2002).

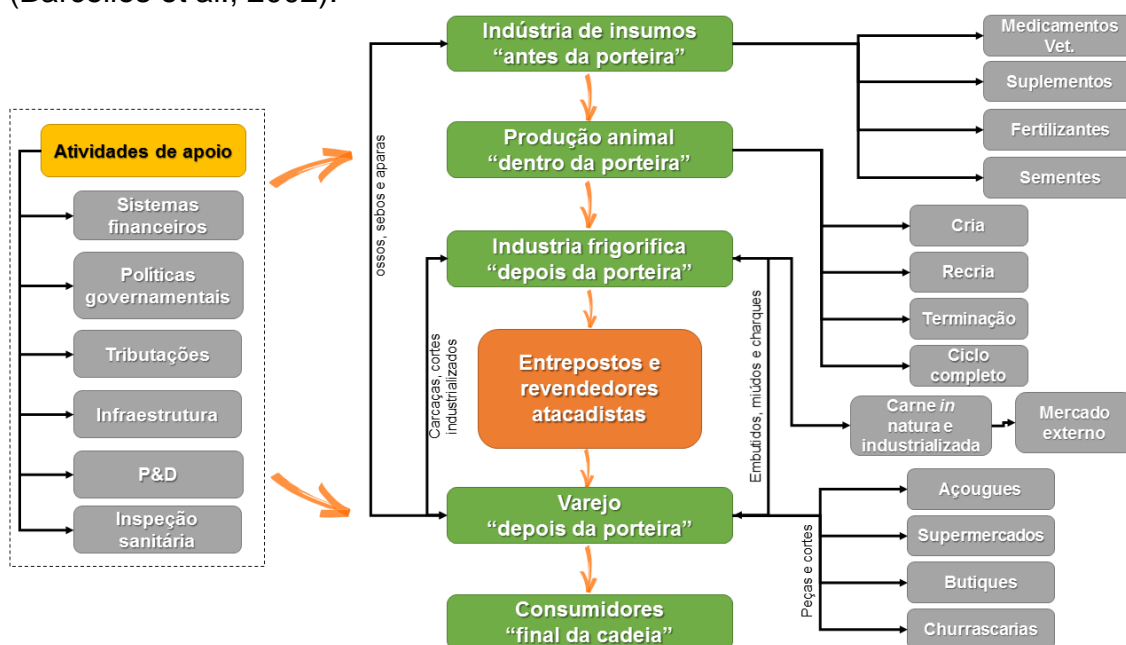


Figura 1. Representação da cadeia produtiva da carne bovina. Fonte: adaptado de Wiazowski, (2000).

Os sistemas de produção na pecuária de corte são divididos basicamente em três etapas distintas: cria, recría e terminação. Essas etapas estão inter-relacionadas, formando o que se denomina ciclo produtivo (Figura 2). Para que as duas últimas etapas (recría e terminação) possam ser conduzidas é necessária uma produção prévia de bezerras, ocorrida na cria. Caso contrário, não há matéria prima para alimentar o ciclo. Quando são realizadas as três etapas produtivas o sistema é caracterizado como sistema de ciclo completo

(Barcellos et al., 2009; Lampert et al., 2012). Entre as fases do sistema de produção de pecuária de corte, a cria é considerada a mais complexa e como aquela que dá o suporte para a atividade. Pois, essa dá início à cadeia produtiva da carne ao gerar e comercializar o bezerro para as demais etapas.

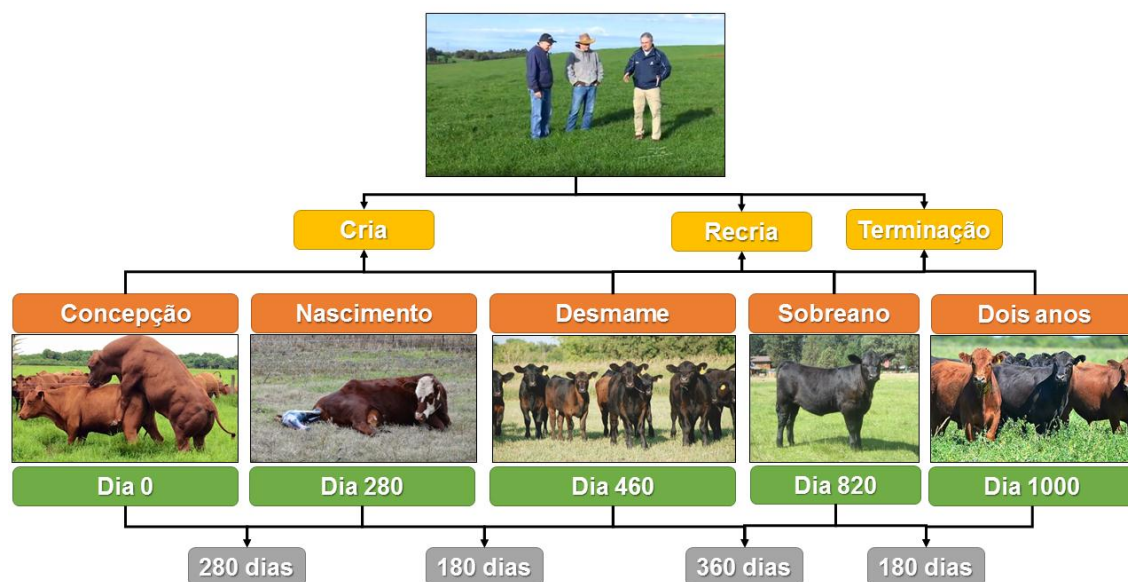


Figura 2. Esquema geral do ciclo produtivo da produção de bovinos de corte. Fonte: adaptado de Canellas, (2016).

Conforme o ANUALPEC (2015), entre o ano de 1996 e 2013 houve uma evolução dos indicadores de eficiência de cada fase no Brasil. Na cria houve um aumento de 17% na taxa de natalidade (de 60 para 70%) e de 22% na taxa de desmama (de 54 para 66%). Na recria a idade ao primeiro parto teve uma redução de 25% (de 4 para 3 anos) enquanto que na fase de terminação houve uma redução em 37% da idade ao abate (de 4,5 para 3,2 anos) e uma melhoria da taxa de abate em 30% (de 17 para 22,2%). Esses indicadores refletem a eficiência de cada fase e observa-se que a terminação foi a que alcançou maiores ganhos de produtividade enquanto a cria foi a que menos evoluiu, o que pode estar associado à baixa adoção de tecnologias (Dill et al., 2015).

No sul do Brasil, no estado do Rio Grande do Sul (**RS**), a produção de carne bovina ocorre principalmente em pastagens naturais no bioma pampa, um dos seis biomas brasileiros, que se estende para Argentina, Uruguai e Paraguai. O RS possui 13,5 milhões de cabeças de bovinos (INFORMATIVO NESPRO & EMBRAPA PECUÁRIA SUL, 2018) e os sistemas de produção são caracterizados por se basearem, em sua maioria, em condições de campo natural (Pereira et al., 2018), o qual é composto predominantemente por espécies de ciclo estival (Trindade et al., 2016). Nesta região, a agricultura compete por terra com a pecuária (Oliveira et al., 2017), ocasionando aumentos no preço das terras de pastagens (ANUALPEC, 2017). Isto é um fator que impõe aos pecuaristas a necessidade de serem cada vez mais produtivos, caso

contrário, a remuneração do patrimônio investido na terra ficará cada vez menos atraente em relação a outras oportunidades de investimento (Lampert et al., 2012).

Nesse cenário, as condições do ambiente de produção no RS determinam a estacionalidade da produção de forragem (Carvalho et al., 2006). A consequência é a baixa produção de forragem nos meses de inverno, com consequente perda de peso dos animais neste período já que a lotação é uma média de duas situações, I) abundância na primavera-verão e II) restrição no outono-inverno. Assim, observa-se um descompasso entre a produção de forragem e as necessidades dos animais (Carvalho et al., 1998), resultando em baixa produtividade na cria (Modernel et al., 2018), que corresponde a uma média de 66 kg de PV/ha/ano nestes sistemas (ANUALPEC, 2017). Dado essa conjuntura, faz-se necessária a busca por alternativas de intensificação sustentáveis que convirjam com a problemática suscitada.

2.1.1. Intensificação na cria de bovinos de corte

Atualmente, a pecuária de corte no Brasil passa por um processo nítido de incorporação tecnológica com reflexo sobre a produtividade, especialmente nas áreas mais tradicionais, em que a pressão em rentabilidade pelo custo de oportunidade da terra é maior (Gasques, 2008; Dias-Filho, 2010). Mais de 94% dos bovinos no Brasil são criados para a produção de carne e a intensificação tem como objetivo a redução no tempo de abate, da área de pastagem e das emissões de gases de efeito estufa por kg de produto (Berndt & Tomkins, 2013), sendo que 90% dos bovinos de corte são criados e terminados em pastagem (ANUALPEC, 2015; Pedreira et al., 2015).

A fase de cria compreende a reprodução, o crescimento do bezerro até a desmama, a recria da fêmea e o manejo da vaca de cria (Figura 3). Assim, as categorias que mais sofrem com a redução no suprimento de nutrientes são os bovinos em fase de crescimento, pelas maiores exigências nutricionais, e vacas paridas, pela maior demanda de nutrientes para a produção de leite (Lana & Gomes Jr., 2002).

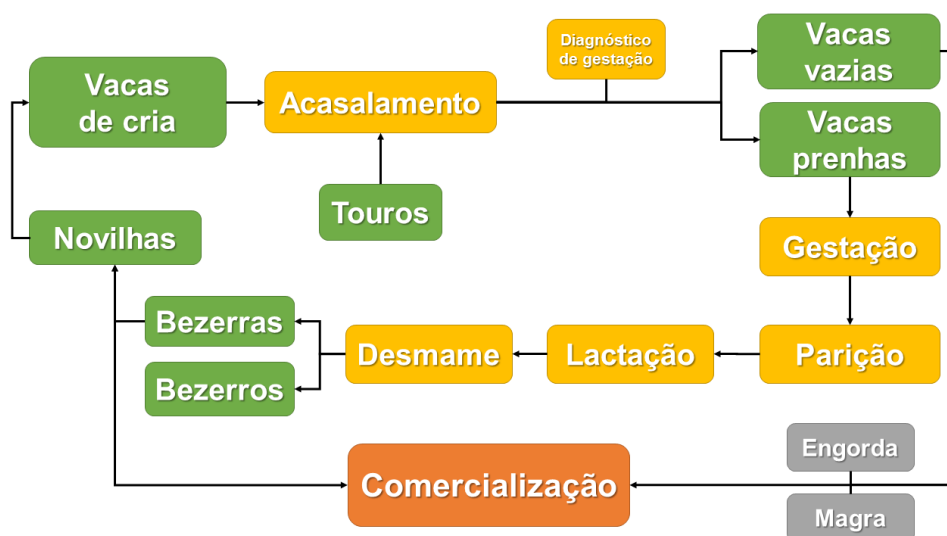


Figura 3. Fluxograma de processos de um sistema de cria de bovinos de corte. Fonte: adaptado de Oaigen et al. (2014).

Existem diversos tipos de sistemas de produção que divergem quanto ao uso de tecnologia, capital e escala produtiva (Barcellos et al., 2002). No sistema tradicional de cria, a taxa de natalidade situa-se próximo a 55%, o primeiro parto ocorre em torno de quatro anos de idade e o desfrute é de cerca de 17%, contrapondo-se aos sistemas tecnificados em que a taxa de natalidade é superior a 70-80%, a idade de abate situa-se entre 1,5 a 3 anos, o primeiro parto ocorre entre 2 e 3 anos e a taxa de desfrute situa-se entre 22 a 40% (Rovira, 1996; Fields et al., 2002).

À medida que se intensifica aumentam os custos, especialmente com a alimentação, que é a base dos sistemas de produção (Silva et al., 2010). Sistemas mais tecnificados, ainda que de forma isolados, são encontrados principalmente nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil. No sistema tradicional, predomina a pecuária extensiva, dependente basicamente do suprimento de nutrientes pelos pastos, semelhante ao modelo extrativista (Cachapuz, 1995). O contraste entre os dois sistemas resume-se em: suplementação alimentar, mineralização, categorização animal, definição de estação reprodutiva, manejo sanitário, melhoramento genético, integração agricultura-pecuária, planejamento, gestão e controle de custos (Gottschall, 2007) (Figura 4).

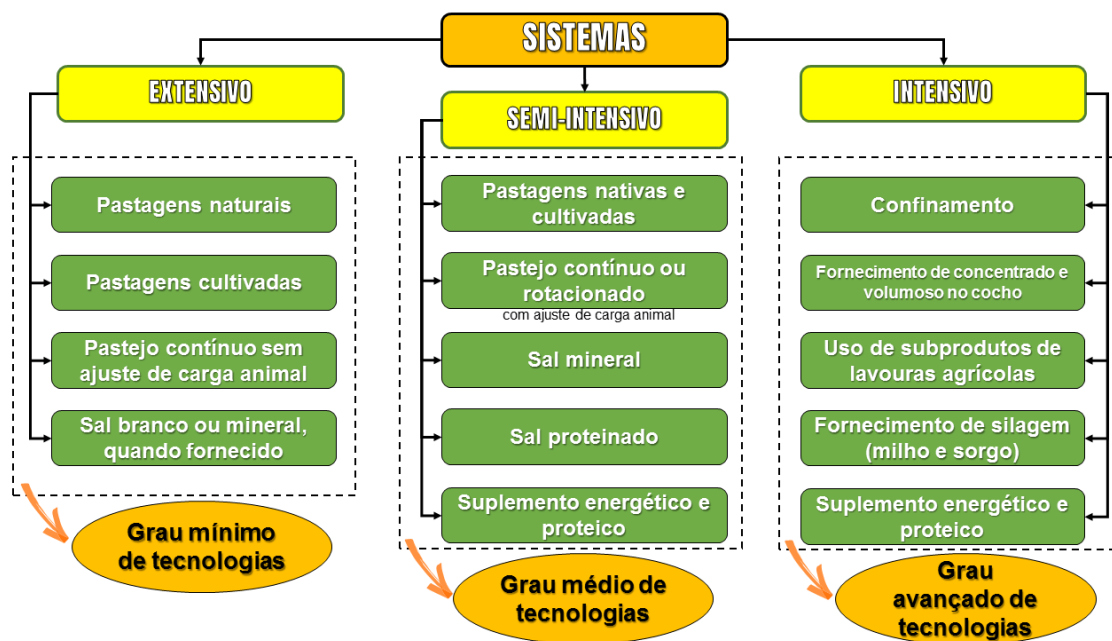


Figura 4. Sistemas de produção de bovinos de corte de acordo com o regime alimentar. Fonte: adaptado de Oaigen et al. (2014).

A eficiência reprodutiva, ou seja, a taxa de natalidade e desmame influencia diretamente a eficiência produtiva dos bovinos de corte. Segundo Holmes (1989) do ponto de vista econômico, o desempenho reprodutivo é cinco vezes mais importante que o crescimento e, pelo menos, 10 vezes mais importante que as características de carcaça.

O crescimento dos bezerros antes da desmama, normalmente, representa cerca de 25 a 35% do seu peso final de abate e ocorre

aproximadamente aos 7 meses de idade. Em sistemas tradicionais o animal necessitará de mais de 35 a 42 meses para completar o desenvolvimento. Em sistemas mais intensivos o bezerro poderá ser desmamado com cerca de 50% do peso final e aos 12 meses completar o seu desenvolvimento. Portanto, conforme o modelo produtivo na fase de cria haverá uma grande mobilização de estoques de terras e rebanhos, em relação ao seu produto final, o bezerro (Cachapuz, 1995). Neste contexto, o correto entendimento da complexa inter-relação entre os princípios biológicos, produtivos e econômicos junto a uma adequada incorporação de tecnologias poderá fazer com que os sistemas de produção de bovinos de corte tornem-se cada vez mais sustentáveis. Para tal fim, é imprescindível conhecer quais os fatores e componentes biológicos que impactam na produtividade e na eficiência na cria de bovinos de corte.

2.1.1.1. Fatores que influenciam os principais componentes biológicos da produtividade e da eficiência na cria de bovinos de corte

2.1.1.1.1. Produtividade

De forma geral, existem alguns indicadores para avaliar resultados dos sistemas de cria de bovinos de corte (Tabela 1) e uma das formas mais utilizadas para avaliar a produtividade está relacionada à área de ocupação. Para essa avaliação, é calculada a razão entre os quilogramas de peso dos animais produzidos e a área total utilizada para a produção (Monjardino et al., 2015; Nasca et al., 2015; Ruviano et al., 2016). A forma de mensuração da produtividade em sistemas de cria é muito variável, podendo ser através da soma dos quilogramas de bezerros desmamados e de vacas de descarte vendidas por hectare (Beretta et al., 2001; Nasca et al., 2015), apenas por quilogramas de bezerros desmamados por hectare ou ainda por quilograma de bezerro desmamado pelo número de vacas submetidas à reprodução (Baker & Carter, 1976).

Tabela 1. Indicadores de resultados da bovinocultura de corte brasileira.

Variável	Unidade	Tradicional	Competitivo
Taxa de natalidade	%	60-80	80-95
Taxa de mortalidade até 1 ano	%	4-10	2-4
Idade ao desmame	Meses	3-5	6-8
Peso ao desmame	kg	120-140	180-225
Idade ao 1º acasalamento	Meses	24-36	18-24
Peso ao 1º acasalamento	Meses	270-300	300-320
Intervalo de partos	Meses	16-20	14-16
Relação touro:vaca	-	1:25-30	1:20-25
Lotação	UA/ha	0.5-1.0	1.0-2.4

Fonte: Barcellos et al. (2013)

2.1.1.1.2. Eficiência

A eficiência da cria ou 'eficiência materna' está altamente correlacionada com a eficiência total do sistema de produção (por exemplo, a relação entre os resultados da produção e os insumos). Equilibrar as necessidades do rebanho de vacas com outros componentes da produção é um

desafio diário que os gestores enfrentam para maximizar o número de bezerros nascidos e criados até o desmame e, por sua vez, maximizar a eficiência materna (Walmsley et al., 2016). Sugeriu-se também que a eficiência é recíproca, ou seja, a eficiência total do sistema está altamente associada com a eficiência materna, já que ela inclui a produção do rebanho e a fase de crescimento do bezerro no período pré-desmama (Archer et al., 1999). A quantidade de peso vivo (**PV**) produzida por um determinado sistema depende do número de bezerros nascidos e criados por ciclo de reprodução e da capacidade de reprodução anual das vacas (Grossi et al. 2008). Assim, a eficiência materna é uma característica composta que é influenciada por componentes subjacentes, como fertilidade, sobrevivência e tamanho adulto (Mwansa et al., 2002).

Deland e Newman (1991) também argumentaram que a produtividade ao longo da vida da vaca é importante para a produção total de PV, devido aos custos de manutenção das matrizes por progênie produzida, diminuir com o aumento do número de progênies. Considerando esses argumentos, fica evidente que a produtividade e a eficiência da produção de PV são, em grande parte, devidas à produtividade e a eficiência das matrizes do rebanho. Uma forma de determinar a eficiência biológica individual de uma vaca de cria é através da divisão da produtividade total por 100 kg de vaca acasalada (Baker & Carter, 1976), devido à eficiência biológica estar diretamente relacionada com o tamanho adulto das matrizes (Robertson, 1973).

2.1.1.1.2.1. Componentes-chave da eficiência materna

A eficiência materna começa com o nascimento, por exemplo de uma bezerra, e continua até que ela se torne uma vaca adulta que, bem-sucedida, anualmente irá criar seus próprios bezerros até o desmame. Para alcançar este objetivo, é essencial o desenvolvimento adequado das novilhas para atingir a puberdade e conceber com tempo suficiente, para manter um intervalo entre partos de 365 dias nos anos subsequentes. A manutenção de um intervalo entre partos não superior a 365 dias é o principal objetivo relacionado ao manejo de vacas adultas, de modo a maximizar a eficiência materna (Bagley, 1993). A capacidade de uma vaca atingir esse objetivo é determinada pela disponibilidade de alimento e, portanto, está intimamente associada à adequação das necessidades alimentares do rebanho com a sazonalidade da oferta de pastagens, mas também é influenciada pela forma como os nutrientes são divididos entre as funções corporais concorrentes, como crescimento, lactação e futura reprodução (Ferrel & Jenkins, 1985) (Figura 5). O desempenho da progênie, conforme determinado pelo ambiente materno e pelo potencial genético, também desempenha um papel crítico na determinação da eficiência materna (Sacco et al., 1989). Consequentemente, a eficiência materna é caracterizada pelas interações de seus principais componentes (Figura 6).

2.1.1.1.2.2. Definições da eficiência materna

A definição mais básica e amplamente usada de eficiência é a eficiência bruta, que é a razão entre os outputs da produção (por exemplo, peso animal ou ganho de peso) e os inputs de alimento (Archer et al., 1999). A eficiência bruta é também a soma das eficiências de cada segmento do sistema de produção de bovinos de corte. A eficiência de cria tem sido sugerida como

sendo mais altamente correlacionada com a eficiência bruta, uma vez que inclui a recria das novilhas de reposição e o crescimento pré-desmame (Archer et al., 1999). Numerosas definições que incluem diferentes tipos e números de características de entrada e saída foram propostas para descrever a eficiência materna (Tabela 2 e 3).

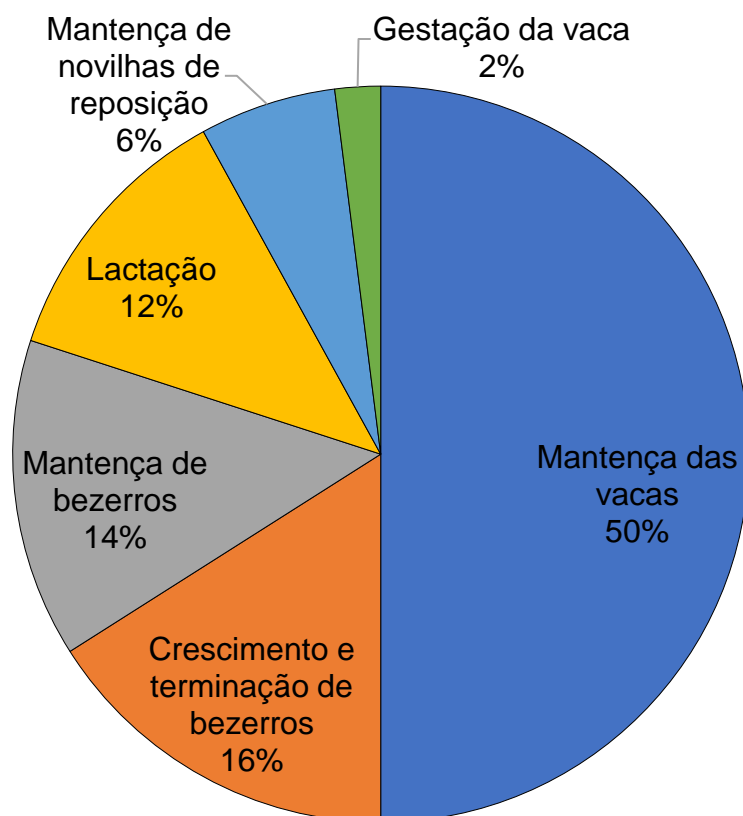


Figura 5. Representação da distribuição da energia exigida pelos diferentes processos fisiológicos na produção de bovinos de corte. Fonte: adaptado de Seidel & Whittier, (2015).

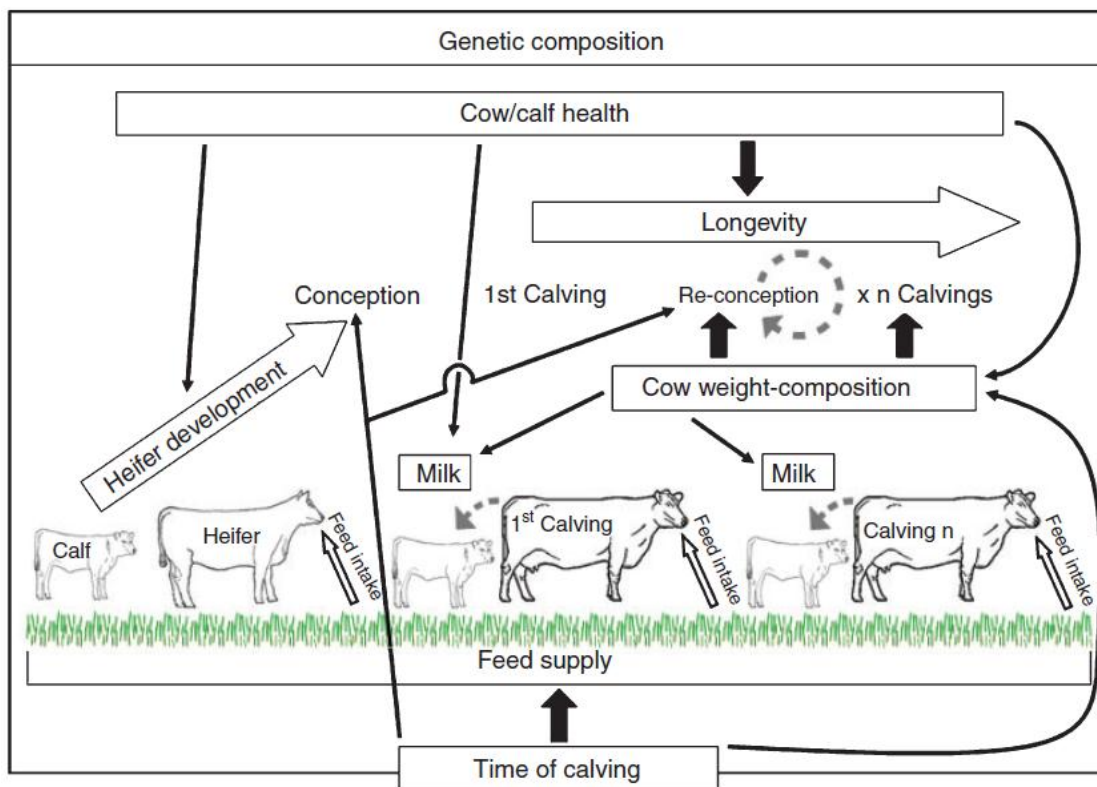


Figura 6. Diagrama simplificado apresentando os principais componentes da eficiência materna e suas interações. Fonte: Walmsley et al. (2016).

Tabela 2. Resumo das definições disponíveis para descrever a eficiência materna.

Código	Definição	Inputs	Outputs	Referência
A	Peso total de desmame de rebanho	-	Peso médio à desmama No. de bezerros desmamados	Bailey et al. 1990 Martinez et al. 2004a Martinez et al. 2004b
B	Peso à desmama por vaca acasalada	No. de vacas acasaladas	Peso total de desmame do rebanho	Rahnefeld et al. 1993 Arthur et al. 2005
C	Produtividade acumulada ((peso médio à desmama x Nº. de progênie) / idade da vaca)	Idade da vaca no último parto	Peso médio de desmama da progênie Nº. de progênie na vida útil	Grossi et al. 2008
D	Relação entre o peso à desmama e o peso do alimento consumido pelo par vaca- bezerro	Peso do alimento consumido pelo par vaca-bezerro	Peso do bezerro à desmama	Taylor & Young, 1966
E	Relação entre o peso à desmama e a MS consumida pelo par vaca-bezerro	MS consumida pelo par vaca- bezerro	Peso do bezerro à desmama	Jenkins & Ferrell, 1994
F	Relação entre o peso à desmama e a EM consumida pelo par vaca-bezerro	EM consumida pelo par vaca- bezerro	Peso do bezerro à desmama	Wagner et al. 1984
G	Relação entre o peso à desmama + o peso da vaca de descarte e a EM consumida pelo par vaca- bezerro	EM consumida pelo par vaca- bezerro	Peso do bezerro à desmama	Davis et al. 1983
H	Relação do peso de abate da progênie + o peso da vaca de descarte entre a EM consumida pelo par vaca- bezerro	EM consumida pelo par vaca- bezerro	Peso da vaca de descarte	Lamb et al. 1992a
		EM consumida pela progênie após o desmame	Peso de abate da progênie	Davis et al. 1984
		EM consumida pelo par vaca- bezerro	Peso da vaca de descarte	Lamb et al. 1992b
I	Relação do peso de carcaça + o peso da vaca de descarte entre a EM consumida pelo par vaca- bezerro	EM consumida pelo par vaca- bezerro	Peso da carcaça da progênie	Davis et al. 1984
		EM consumida pela progênie após o desmame	Peso da carcaça das vacas de descarte	

MS: matéria seca; EM: energia metabolizável. Fonte: Walmsley et al. (2016).

Tabela 3. Questões que determinam a aplicabilidade das definições que descrevem a eficiência materna.

Item	Definição								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Prático									
Simplicidade (simples = 1, complexo = 9)	1	2	4	5	5	5	6	7	9
Dificuldade para obter outputs	Fácil	Fácil	Moderado	Fácil	Fácil	Fácil	Moderado	Moderado	Difícil
Dificuldade para obter inputs	n.a.	Fácil	Fácil	Difícil	Difícil	Difícil	Difícil	Difícil	Difícil
Tempo para coletar os dados (anos)	1	1	VV	1-VV	1-VV	1-VV	1-VV	1-VV	1-VV
Teórico									
O peso da vaca é parte da definição?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim
O consumo de alimentos é parte da definição?	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
A energia pode ser usada para descrever o consumo alimentos?	n.a.	n.a.	n.a.	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
A definição pode ser comparada em vários ambientes?	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Representatividade da realidade (muito baixo = 1, muito alto = 9)	1	2	3	5	6	7	8	8	9

n.a = não aplicável; VV = vida útil da vaca. Fonte: Walmsley et al. (2016).

A definição de eficiência materna consideraria as características de entrada e saída tanto da mãe quanto da progênie, que incluem a capacidade da progênie de atender às especificações de mercado e a quantidade de recursos necessários para produzir essa progênie. No entanto, a natureza segmentada da produção de bovinos de corte em relação a outros sistemas produtores de carne, como suínos e aves, representa um impedimento adicional à aplicação bem-sucedida de tal definição. Uma definição focada nos resultados da unidade vaca-bezerro e insumos necessários para alcançar essa produção parece ser a mais adequada e oferece o maior potencial de aplicação. Tal definição não limitará a eficiência materna que está sendo explorada em segmentos maiores da cadeia, pois as entradas e saídas podem ser escalonadas até o ponto final de produção desejado. Dadas estas considerações, a definição de eficiência materna que é recomendada como ponto de partida para explorar e melhorar a eficiência da produção de carne bovina é a seguinte:

Eficiência materna = peso do bezerro desmamado e mudança de peso da vaca / EM consumida pela unidade vaca-bezerro (Davis et al. 1983 e Lamb et al. 1992a).

Essa definição considera o peso à desmama do bezerro e a mudança de peso da vaca que são produtos dos sistemas de cria. Também leva em consideração os recursos de alimentação necessários para produzir as mudanças de peso do bezerro e da vaca na forma de EM consumida. Isso permite que a definição seja aplicada em diferentes ambientes de produção. As entradas e saídas também são facilmente escalonadas para levar em consideração o crescimento da progênie até o abate, bem como os recursos adicionais necessários para alcançar tal produção. Essa definição também pode ser usada em um único ciclo de produção (ou seja, 365 dias) ou períodos de produção mais longos durante a vida produtiva de uma vaca. Embora essa definição seja considerada a melhor descrição de eficiência materna, a inclusão do consumo de alimento da vaca como insumo representa um grande desafio para sua implementação bem-sucedida nos sistemas. Os avanços tecnológicos permitiram o controle do consumo de alimento em confinamentos, sugerindo que avanços adicionais que permitam mensurar o consumo individual em condições de pastoreio, aumentariam a probabilidade de implementação bem-sucedida dessa definição nos sistemas de cria, levando a um maior entendimento dos principais vetores do rebanho de cria (Walmsley et al., 2016).

Como já foi mencionado, o rebanho é um dos componentes fundamentais da cria de bovinos de corte, já que ele é composto principalmente pelas matrizes de produção, assim sendo, a estrutura de rebanho e suas inter-relações biológicas representam um papel determinante no sistema.

2.1.2. Estrutura de rebanho

A estrutura do rebanho é o comportamento dinâmico/biológico da população de animais. Nos sistemas de cria, essa população é conformada pela quantidade de animais ou a participação de cada categoria animal, sendo que os principais fatores que a afetam são o tempo e os indicadores zootécnicos. Portanto, conhecer a evolução da estrutura de rebanho permitirá conhecer

também as entradas e saídas globais de animais do sistema. Isto por sua vez disponibiliza informações relevantes para realizar a gestão do sistema (Pang et al., 1999). Assim, com um rebanho estabilizado, através da avaliação da dinâmica da estrutura do rebanho será possível quantificar cada categoria animal e realizar projeções futuras. Estas informações tornam-se fundamentais quando pretende-se avaliar os impactos de um empreendimento de intensificação no sistema de produção.

Dentro da bovinocultura de corte existem alguns indicadores zootécnicos chaves que podem modificar a evolução da estrutura do rebanho (Tabela 1), especialmente a taxa de natalidade e a idade ao primeiro acasalamento.

2.1.2.1. Taxa de natalidade

A taxa de natalidade é um dos principais indicadores que quantifica a eficiência reprodutiva em bovinos de corte. No Brasil a taxa de natalidade encontra-se próxima a 60% (Oliveira et al., 2006). Entretanto, entre o nascimento e o desmame as perdas de bezerros são consideráveis podendo chegar a mais de 10% quando a meta é que seja menor a 3%. A oscilação da taxa de prenhez entre um ano e outro, ocorre frequentemente em rebanhos com déficit na nutrição (Randel & Welsh, 2013) e as principais causas de baixa taxa de natalidade são o peso e condição corporal inadequados, baixa fertilidade dos touros e problemas sanitários (Menegassi & Barcellos, 2015).

Em um estudo realizado por Gottschall, (2007) foi avaliada a natalidade entre os anos 1999 e 2005 com resultados oriundos de um sistema altamente tecnificado e com um manejo racional dos recursos disponíveis; entre outras práticas o sistema realiza categorização dos animais e formação de lotes conforme as necessidades nutricionais. Neste estudo foram obtidas taxas médias de natalidade de 74,7 e 79,3% na repetição de primíparas e vacas com cria ao pé, respectivamente. O mesmo estudo destaca que em sistemas de produção com índices elevados de natalidade, todas as vacas vazias podem ser descartadas, resultando em um aumento do desfrute, eficiência de utilização de estoque e da pressão de seleção. Assim sendo, fica evidente que a taxa de natalidade tem profundos efeitos sobre a estrutura e dinâmica do rebanho (Tabela 4; Beretta et al., 2001).

Tabela 4. Estrutura do rebanho proposta para um sistema de cria com idade ao primeiro parto aos três anos e diferentes taxas de natalidade do rebanho de cria adulto.

Categoria	Unidade	Taxa de natalidade (%)				
		50	60	70	80	90
Vacas de cria prenhas	%	39	45	52	64	72
Vacas de cria vazias	%	21	9	0	0	0
Novilhas de reposição	%	38	44	46	33	26
Touros	%	2	2	2	2	3

Fonte: adaptado de Beretta et al. (2001).

2.1.2.2. Idade ao primeiro acasalamento

A idade ao primeiro acasalamento indica com qual idade a novilha é posta em cobertura e é um evento importante que tem um impacto econômico na eficiência do sistema de produção (Kluyts *et al.* 2003; Hugh *et al.* 2011). A diminuição da idade ao primeiro acasalamento das fêmeas dos 36 meses para 24, 18 e 14 meses e a redução da idade de abate de machos dos 48-50 meses para 18-24, por exemplo, são fatores de significativo impacto em uma estrutura de rebanho. Em sistemas intensivos as novilhas podem ser acasaladas pela primeira vez com 14-15 meses de idade, parindo por volta dos 24 meses (Short *et al.*, 1994). Em sistemas tradicionais a idade ao primeiro acasalamento pode ocorrer por volta dos 36-39 meses e o primeiro parto cerca aos quatro anos de idade. Já em sistemas intermediários a idade ao primeiro acasalamento irá ocorrer por volta dos dois anos de idade (Gottschall, 2007). A idade das fêmeas à primeira concepção afeta os sistemas de produção, uma vez que a antecipação do nascimento do primeiro bezerro gera uma mudança na estrutura do rebanho, e, portanto, nas receitas e custos destes sistemas. Novilhas que concebem mais cedo gerarão um produto mais cedo, antecipando também a receita. Contudo, é necessário estabelecer o grau de intensificação que melhor gere benefício em relação aos custos (Beretta, 1998; Semmelmann, 2001; Rocha, 2002; Montanholi, 2004; Barcellos, 2006; Canellas, 2010).

Na cria, de 10% a 20% das vacas são substituídas anualmente por novilhas (Bolze & Corah, 1993), para assegurar alta produtividade e eficiência do sistema. As novilhas de reposição são necessárias para manter estável o tamanho do rebanho e permitir o melhoramento ou alteração da sua base genética (Hersom *et al.*, 2013). A idade ao primeiro acasalamento e o percentual de natalidade são determinantes da eficiência de utilização do estoque (Simeone & Lobato, 1996). Por meio da redução da idade ao primeiro acasalamento e aumento da taxa de natalidade se consegue uma redução significativa do número de matrizes para produzir 100 bezerras (Tabela 5), o que resulta em otimização dos recursos envolvidos com a produção. Entretanto, é necessário avaliar os custos do processo, aumentados especialmente pela necessidade de melhoria nutricional do rebanho (Barcellos *et al.*, 2003).

Tabela 5. Quantidade de animais necessários para produzir 100 terneiros em função da taxa de natalidade e idade ao primeiro acasalamento.

Taxa de natalidade (%)	Idade ao primeiro acasalamento (meses)		
	14 - 15	26 - 27	38 - 39
50	200	250	300
63	158	198	238
80	125	156	188
90	111	156	167

Fonte: adaptado de Rovira (1996).

A máxima eficiência biológica de um sistema de cria é alcançada quando as fêmeas são acasaladas entre 12 e 14 meses de idade (Short *et al.*, 1994). Neste sistema existe o mínimo de categorias de fêmeas improdutivas

(Nogueira, 2004). Entretanto, os custos associados a este sistema são os mais significativos, devido a sua alta tecnificação e, portanto, devem ser bem avaliados (Endecott et al. 2013; Santana et al. 2013).

O tipo de sistema de desenvolvimento de novilhas tem profundos efeitos sobre o crescimento e conseqüentemente na estrutura de rebanho, sendo que é indicado que novilhas de reposição devem atingir 60 a 65% do seu peso adulto esperado para serem acasaladas (Patterson et al., 1992). Gottschall & Canellas (2007) realizaram simulações do ganho médio diário necessário em diferentes pesos a desmama de acordo com a idade desejada ao primeiro acasalamento (Tabela 6). Para isto foi considerado um peso vivo da vaca adulta de 480 kg, isto significa um peso alvo ao início do acasalamento de 312 kg estabelecendo 65% do peso vivo da vaca adulta.

Tabela 6. Simulação de ganho médio diário de peso vivo (GMD) em função do peso ao desmame e idade desejadas para novilhas provenientes de rebanhos com vacas adultas com peso vivo médio de 480 kg.

Idade desejada (meses)	Peso ao nascimento (kg) em 01/09	Peso ao desmame (kg) 01/04	Peso alvo (kg) em 15/11	Ganho de peso do desmame ao acasalamento (kg)	Dias até o acasalamento	GMD do desmame ao acasalamento (kg/dia)
14-15	30	150	312	162	228	0.710
14-15	30	180	312	132	228	0.579
14-15	30	210	312	102	228	0.447
26-27	30	150	312	162	593	0.273
26-27	30	180	312	132	593	0.223
26-27	30	210	312	102	593	0.172
38-39	30	150	312	162	958	0.169
38-39	30	180	312	132	958	0.138
38-39	30	210	312	102	958	0.106

Fonte: Gottschall & Canellas (2007).

A idade à primeira cria também pode ter reflexos na taxa de desfrute. Em sistemas tradicionais a menor produtividade, expressa no desfrute do rebanho (Figura 7), entre outros fatores é consequência da tardia idade da novilha à primeira cria (quatro anos), baixo índice de natalidade (54%) e desmama (49%), e elevada mortalidade, principalmente de bezerros (10%) (Gottschall, 2007).

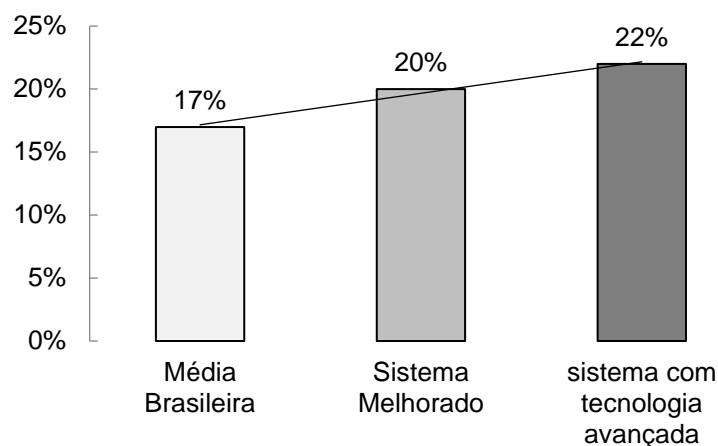


Figura 7. Taxa média de desfrute no Brasil e de sistemas mais evoluídos. Fonte: adaptado de Oliveira et al. (2006).

2.1.3. Fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS)

A eficiência da cria de bovinos de corte também é afetada por fenômenos climáticos, associados ao déficit hídrico. De fato, a seca é responsável pela maioria das perdas na produção agrícola (Vogeler et al., 2016) e em algumas regiões está associado ao fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS). ENOS é um fenômeno de grande escala que se caracteriza pela variação das condições normais de temperatura da superfície do mar (TSM) e de pressão atmosférica no Oceano Pacífico Equatorial. Na fase quente, denominada El Niño, ocorre o aquecimento das águas (anomalias positivas de TSM) e, na fase fria, denominada La Niña, as anomalias de TSM são negativas. No RS, os principais efeitos associados a eventos ENOS ocorrem sobre a precipitação pluvial e a temperatura do ar (Berlato & Fontana, 2003). Em anos de El Niño, a precipitação pluvial é superior à média climatológica e, em anos de La Niña, abaixo da média, especialmente na primavera e início do verão (Berlato & Fontana, 2003; Puchalsky, 2000). Em relação às temperaturas do ar, o efeito dos eventos ENOS é maior sobre as temperaturas mínimas: em anos de ocorrência de La Niña, as temperaturas mínimas mensais são inferiores às registradas em anos neutros ou de El Niño, especialmente em outubro e novembro (Berlato & Fontana, 2003; Cordeiro & Berlato, 2009).

Os efeitos da ocorrência de eventos ENOS sobre a precipitação pluvial e a temperatura do ar podem ser associados à variabilidade interanual dos rendimentos das principais culturas agrícolas estabelecidas no Estado do RS. De modo geral, as culturas não-irrigadas de primavera-verão (por exemplo, milho e soja) têm seu ciclo favorecido em anos de El Niño, dada menor probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica (Berlato et al., 2005; Alberto et al., 2006).

Para os cereais de estação fria (por exemplo, trigo e cevada), por sua vez, os maiores volumes de chuva registrados no início da primavera em anos de El Niño são desfavoráveis às culturas, dada diminuição do rendimento de grãos associada ao excesso de precipitação pluvial no florescimento, maturação fisiológica e colheita (Cunha et al., 1999; Alberto et al., 2006).

Além das culturas agrícolas, o RS destaca-se na produção pecuária, especialmente de bovinos e ovinos de corte, cuja base alimentar são as pastagens naturais do bioma pampa. Anos de La Niña seriam desfavoráveis ao crescimento e acúmulo de biomassa em pastagens, compostas, em maior proporção, por espécies forrageiras subtropicais de ciclo estival (Cruz et al., 2010). Jacobsen et al. (2003), ao analisarem as alterações na vegetação do RS, apontaram que, especialmente nas macrorregiões ocupadas por campos, houve redução da disponibilidade de biomassa das pastagens nos meses de dezembro e janeiro, possivelmente devido à restrição ao crescimento das plantas em função da precipitação pluvial não suprir a demanda evaporativa da atmosfera no período. No verão, ocorre a maior variabilidade interanual na disponibilidade de biomassa verde nas pastagens, o que pode ser associado à variabilidade da precipitação pluvial e da disponibilidade hídrica dessa estação no RS (Junges et al., 2015). Wagner et al. (2013), avaliando 13 regiões, distintas em termos de composição botânica e solos do Bioma Pampa, verificaram que janeiro é o mês de maior variabilidade interanual de disponibilidade de biomassa. Tais achados sugerem que tecnologias como a irrigação de pastagens poderia ser uma alternativa para melhorar a eficiência produtiva em sistemas de cria de bovinos de corte.

2.1.3.1. A irrigação de pastagens como minimizadora do risco

As pastagens apresentam uma característica marcante que é a sazonalidade de produção (Pinheiro, 2002). Fatores climáticos ocorrem conjuntamente influenciando o crescimento das plantas e contribuindo para a sazonalidade forrageira (Moore et al., 2009). Construir a capacidade de incluir a variabilidade inter-anual na tomada de decisões para maximizar o resultado e minimizar os riscos é um desafio constante para os gestores rurais. Estudos mostraram que o gerenciamento de riscos é um fator importante nos processos de tomada de decisão (Makehamand Malcolm, 1993), com muitos produtores adotando a minimização de riscos ao considerar opções para mudanças nas práticas de manejo (Chapman et al., 2008). Assim, uma das alternativas para aumentar a eficiência de utilização de pastagem e diminuir o risco tem sido a irrigação (Drumond & Aguiar, 2005). Esta tecnologia visa eliminar o efeito do estresse hídrico sofrido pela cultura durante a época de seca e manter ou aumentar a taxa de lotação do sistema (Azevedo & Saad, 2009).

Nos sistemas pastoris, a produtividade animal (kg/ha) é definida pelo desempenho animal (variação de peso) e pela taxa de lotação. O desempenho animal é determinado pela quantidade e qualidade da forragem consumida e pelas características genéticas do animal sob influência do ambiente. A taxa de lotação, comumente expressa em unidade animal ou número de animais por hectare, não indica por si nenhum atributo da pastagem. No entanto, quando associada a uma oferta de forragem pré-estabelecida, é um indicativo do potencial de produção. Desse modo, a pastagem consiste no componente da produção animal mais passível de ampliação, uma vez que grande parte das fontes de variação na produtividade das pastagens, como genótipo da forrageira, fertilidade e umidade do solo, podem ser manipuladas por meio de práticas de manejo adequadas (Roberts, 1980).

Com o uso da irrigação, o fator água passa a não ser mais limitante para o crescimento das forrageiras, de modo que a sazonalidade de produção passa a ser em função apenas da temperatura e, principalmente da radiação solar (Azevedo & Saad, 2009). Estudos mostraram que a irrigação pode dobrar o rendimento da pastagem comparado com pastagens não irrigadas (por exemplo, Thorrold et al., 2004), permitindo a intensificação dos sistemas agrícolas ou a mudança do uso da terra para valores mais altos. A irrigação em ambientes de estiagem durante o verão aumenta o crescimento das pastagens, levando à redução da variabilidade interanual e ao risco da variação climática (Vogeler et al., 2016). Soares et al., (2015) na fronteira oeste do estado do Rio Grande do Sul, Brasil, realizaram uma avaliação econômica da terminação de bovinos de utilizando pastagens de inverno irrigadas. Os autores obtiveram uma produtividade de 772 (kg/ha), uma carga animal média de 934,1 (kg/ha/mês) e um ganho médio diário de 0,831 (kg/animal/dia). Este resultado de produtividade apresentou um lucro total por hectare de R\$ 291,61 com um capital de investimento por hectare de R\$ 21.838,77.

Gallagher et al. (2005), concluíram que a irrigação de pastagens é mais lucrativa do que a maioria das opções de alimentação para o gado de corte no semiárido australiano. Para os autores, o principal resultado econômico é decorrente do aumento da taxa de lotação. Ribeiro et al. (2008), trabalhando com forrageiras tropicais, concluíram que a irrigação teve maior efeito na taxa de lotação do que sobre o desempenho animal. A intensificação fazendo uso da irrigação permite alocar um maior número de animais por área e isto conseqüentemente terá efeitos em toda a dinâmica da estrutura do rebanho do sistema.

Portanto, a irrigação surge como alternativa, para os aumentos da produção de forragem, aumento da capacidade de suporte por área e conseqüentemente afetando a estrutura do rebanho mediante a liberação de áreas de pasto e podendo refletir no incremento no número de matrizes no sistema de cria, por exemplo. Embora melhorias biofísicas já foram comprovadas pelo uso da irrigação, é fundamental realizar uma adequada análise financeira para avaliar a viabilidade econômica deste tipo de tecnologias.

2.1.4. Os custos de produção

Na teoria econômica, o cálculo do custo de produção é a ferramenta de controle e gerenciamento das atividades produtivas, gerando informações importantes para subsidiar as tomadas de decisões (Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB, 2010). Os custos podem variar por diversos motivos: uso intensivo ou não da tecnologia; uso dos fatores de produção com maior ou menor eficiência, intensidade ou produtividade; volume produzido; e preço dos fatores de produção (Rámiz, 1988).

Existem vários métodos de custeio utilizados. O custeio por absorção; o custeio variável; o baseado em atividades (ABC); o padrão; e o meta (Carareto et al., 2006). Todos eles podem se adequar ao conceito da teoria econômica, apresentando vantagens e desvantagens. O método de custeio variável apresenta alguns benefícios por fundamentar-se em custos variáveis e fixos. Os custos variáveis são conceituados como aqueles cujas quantidades utilizadas variam com o volume de produção. Já os custos fixos são aqueles em que as

quantidades não mudam quando o volume de produção variar, isto é, no curto prazo (Young, 1958; Passos & Nogami, 2008). Portanto, no curto prazo há pelo menos um fator de produção que se mantém fixo na função de produção, diferente do longo prazo, no qual – por definição – todos os fatores são considerados variáveis, podendo alterar o tamanho ou a escala de produção (Passos & Nogami, 2008). O método de custeio variável também possibilita a identificação de produtos mais rentáveis e, portanto, a direção de esforços para aumentar a rentabilidade. Além de definir quais são os preços e volumes mínimos necessários para cobrirem os custos de produção (Carareto et al., 2006).

Pelo método de custeio variável a relação entre os custos poderia ser representada pela seguinte equação:

$$CT = CV + CF$$

Em que CT é o custo total; CV são os custos variáveis; e CF os custos fixos.

A CONAB (2010) em sua metodologia de custo de produção agrícola divide os custos em fixos e variáveis, e subdivide-os, alocando em item separado a remuneração dos fatores de produção. No entanto, essa metodologia é para uso específico para as produções agrícolas. Portanto, foi desenvolvido um método de custeio que classificaram os custos como “operacionais”. A proposta foi justamente adequar os termos à linguagem, a fim de que os pesquisadores e os técnicos da pecuária assimilassem mais facilmente os resultados (Tabela 7).

Em um estudo realizado por Oaigen et al. (2009), foi avaliada a sensibilidade da metodologia centros de custos mediante a introdução de tecnologias em sistemas de produção de cria de bovinos de corte (Tabela 8).

Tabela 7. Descrição dos itens de custo de produção para a pecuária.

A. CUSTOS VARIÁVEIS (CV)

1. Aquisição de animais
2. Alimentação
3. Controle sanitário
4. Mão de obra e assistência técnica
5. Outras despesas
6. Oportunidade do capital investido

B. CUSTOS FIXOS (CF)

7. Depreciação de bens
8. Oportunidade do capital imobilizado
9. Oportunidade da terra, caso seja própria

C. CUSTO OPERACIONAL EFETIVO (COE) (A - 6)

D. CUSTO OPERACIONAL TOTAL (COT) (C + 7)

E. CUSTO TOTAL (CT) (A + B)

Fonte: adaptado de Silva et al., (2014).

Tabela 8. Custos de produção e indicadores econômicos de sistemas de cria de bovinos de corte.

Custos de produção	Unidade	Tradicional	Desmame precoce	Campo melhorado	Suplementação proteica
Fixos					
Mão-de-obra	%	19.60	18.80	18.80	19.30
Depreciação	%	6.80	6.50	6.00	6.60
Impostos	%	4.80	4.50	4.20	4.60
Seguros	%	2.30	2.20	2.10	2.30
Subtotal	%	33.50	32.10	31.10	32.80
Variáveis					
Suplementação animal	%	15.50	18.40	13.80	17.60
Reprodução	%	17.10	16.30	15.20	16.60
Combustíveis	%	9.30	8.90	8.70	9.10
Pastagens	%	7.00	6.70	15.50	6.80
Sanidade	%	5.10	5.70	4.60	5.00
Manutenção	%	3.90	3.70	3.50	3.80
Outros	%	3.90	3.70	3.50	3.80
Arrendamentos	%	2.30	2.20	2.10	2.30
Administração	%	2.30	2.20	2.10	2.30
Subtotal	%	66.50	67.90	68.90	67.20
Custo desembolsado ^a	%	93.20	93.50	94.00	93.40
Custo operacional ^b	%	100.00	100.00	100.00	100.00
Custo unitário por bezerro ^c	R\$	493.38	463.23	489.69	494.41
Custo por quilo de bezerro desmamado ^c	R\$	3.28	3.08	3.26	3.30
Custo anual por vaca ^c	R\$	345.37	361.31	388.34	355.13
Ponto de equilíbrio ^c	R\$/ha	114.20	99.29	110.97	116.47
Margem operacional ^c	R\$/ha	59.91	78.51	69.33	61.11

^aCusto desembolsado = custos fixos (sem depreciação) + custos variáveis; ^bCusto operacional = custos fixos (com depreciação) + custos variáveis (adaptado de Oaigen et al., 2009).

^cValores corrigidos a 31 de julho de 2018 pelo índice geral de preços, disponibilidade interna, da Fundação Getúlio Vargas (IGP-DI/FGV).

Esta metodologia possibilitou detectar variações nos custos diretos e nos indicadores econômicos. Assim, a avaliação dos custos de produção por meio de métodos eficientes é importante devido a permitir realizar comparações entre resultados obtidos, possibilitando estimar os benefícios da introdução de novas tecnologias, por meio de indicadores técnicos e econômicos, além de fornecer informações que podem auxiliar nas decisões do gestor rural.

2.2. Modelagem e simulação no contexto da produção de alimentos

2.2.1. Um breve contexto histórico

O mundo se tornou mais complexo nos últimos anos devido a muitos fatores, incluindo a crescente população e suas demandas por mais alimentos, água e energia, escassez de terra arável para expandir a produção de alimentos e aumentar as pressões sobre os recursos naturais (Jones et al., 2016). Esses fatores são ainda mais agravados pelas mudanças climáticas que levarão a muitas transformações do mundo que hoje é conhecido (Wheeler & von Braun, 2013). A modelagem, uma ferramenta essencial na ciência dos sistemas agrícolas, foi realizada por cientistas de uma ampla gama de disciplinas, que contribuíram com conceitos e ferramentas ao longo de mais de seis décadas. Devido aos cientistas agora considerarem os modelos, dados e produtos de conhecimento da “próxima geração” necessários para atender aos problemas cada vez mais complexos enfrentados pela sociedade, é importante fazer um

balanço dessa história e de suas lições para evitar a reinvenção e realizar um esforço para considerar todas as dimensões dos desafios associados (Figura 8).

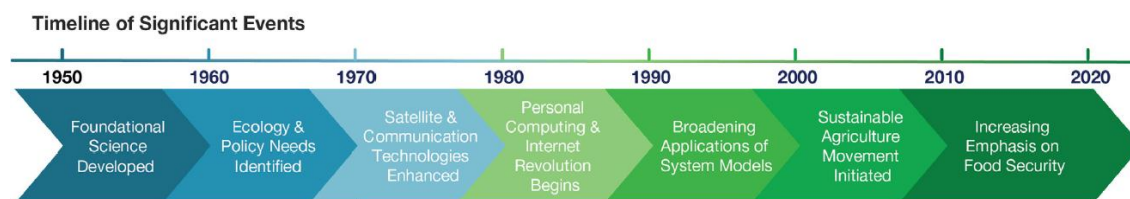


Figura 8. Linha do tempo resumindo os principais eventos que influenciaram o desenvolvimento de modelos de sistemas agrícolas. Fonte: adaptado de Jones et al. (2016).

2.2.2. Classificação dos modelos de simulação

A classificação dos modelos auxilia no destaque das suas características, particularmente se dita classificação é realizada em função das propriedades das variáveis ou estrutura do modelo. Desse modo, algumas classificações dicotômicas têm sugerido a classificação dos modelos em físico e conceitual, estático e dinâmico, determinístico e estocástico, e empírico e mecanístico. Cabe salientar que os modelos físicos e conceituais não são considerados modelos de simulação, estando dentro da classificação de modelos descritivos. Contudo, estes modelos, principalmente o conceitual auxilia na etapa de análise do sistema a ser representado. As demais classificações estão dentro de uma grande classificação denominada de modelos preditivos e são propriamente ditos modelos de simulação (Figura 9).

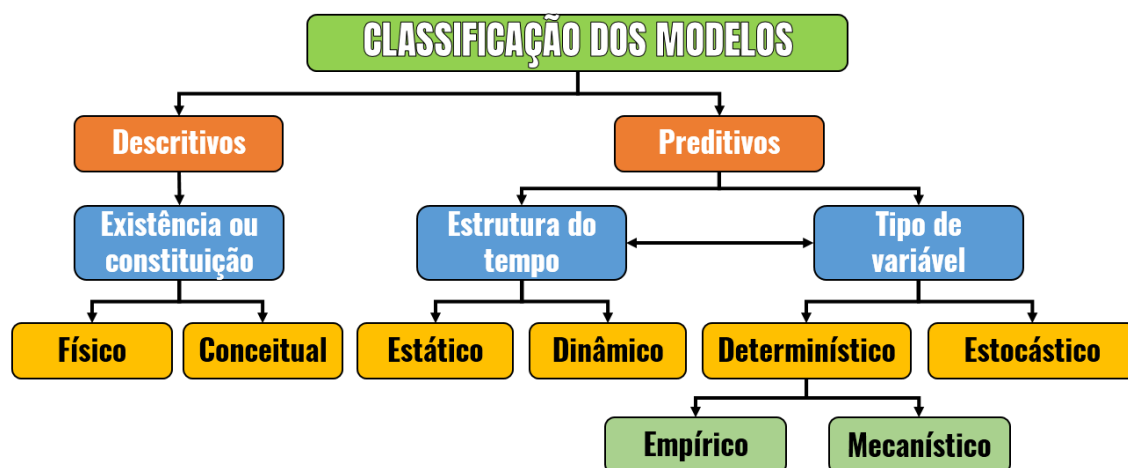


Figura 9. Esquema geral da classificação dos modelos. Fonte: adaptado de Jorgensen & Fath, 2011 e Aguilar et al. (2003).

Um modelo é dinâmico se os valores de suas variáveis mudam com o tempo. Assim, os modelos dinâmicos têm incorporado o tempo em sua estrutura. Isto pressupõem que o tempo deve estar relacionado com outras variáveis e conseqüentemente, estas variam em função dele (Newman et al., 2014). Entretanto, um modelo será estático se os valores das suas variáveis não

mudam com o tempo. Quando se diferencia modelos estocásticos (probabilísticos) e determinísticos, faz-se referência ao tipo de variável do modelo. Desse modo, se uma das variáveis do modelo é aleatória, o modelo é classificado como estocástico (Méndez et al., 2014). Contudo, se as variáveis matemáticas do modelo, cujos valores se determinam com certeza absoluta (não aleatórios), são suficientes para representar o funcionamento do sistema, trata-se de um modelo determinístico.

Existem outras duas abordagens diferentes para o uso de modelos em pesquisa, sendo que cada uma delas é escolhida em função do que se espera que o modelo seja, mecanístico ou empírico. Ao tentar construir um modelo mecanístico, é necessário construir algumas hipóteses sobre quais devem ser os componentes que são importantes no sistema, quais delas devem ser ignoradas e como elas devem se comportar. Este tipo de modelo pode ser construído pela visão da estrutura do sistema, dividindo-se o sistema em vários componentes e tentando entender o comportamento do todo o sistema através de cada parte e por meio das interações que ocorrem com as partes (Geris & Gomez-Cabrero, 2016). É possível e as vezes valioso tentar obter e entender a resposta de um sistema sem passar pelos estágios de sua estruturação, fazendo hipóteses sobre os componentes do sistema e então tentando trabalhar sem usar as consequências matemáticas daquelas hipóteses. É nesta direção que funcionam os modelos empíricos. Em síntese, o método empírico consiste em analisar os dados experimentais, tentando fazer alguma suposição inteligente na forma de conjunto de equações ou mesmo através de explicações intuitivas, que poderão ser usadas como um modelo matemático (Flichman, 2011).

Existe outra abordagem que classifica os modelos em discretos e contínuos. Esta classificação, refere-se ao tipo de variável que se usa no modelo. Uma variável contínua é aquela que pode assumir como valor qualquer número real. Por outro lado, uma variável discreta é aquela que está limitada só alguns valores especificados. Não obstante, esta dicotomia está reservada para as variáveis do modelo em relação ao tempo. Portanto, se as alterações nos valores das funções ocorrem de forma contínua, a uma taxa constante, a medida que o tempo varia, classifica-se o modelo como contínuo (Kvamsdal et al., 2017). No entanto, se as mudanças ocorrem em pontos discretos do tempo, o modelo é classificado como discreto.

Embora a classificação teórica dos modelos de simulação pareça estrita, é importante destacar que os modelos também podem ser híbridos, devido à necessidade de adaptação de modelos com diferentes características, visando resolver problemas de forma mais realística.

2.2.3. Etapas da elaboração de um modelo de simulação

O foco inicial de uma pesquisa é a definição do problema. Portanto, a primeira etapa da modelagem é, portanto, a definição do problema. Isso precisará estar associado aos limites de espaço, tempo e subsistemas. A delimitação do problema no espaço e no tempo é geralmente fácil e, conseqüentemente, mais explícita do que a identificação dos subsistemas a serem incorporados no modelo. O pensamento sistêmico é importante nessa fase para tentar entender o contexto geral (Serman, 2000). O comportamento do sistema focal deve ser interpretado como um produto de processos

dinâmicos, preferencialmente descritos por relações causais (Jorgensen & Fath, 2011) (Figura 10).

Um dos principais desafios na utilização de modelos de simulação, para suporte à tomada de decisão, é a confusão sobre a etapa de validação do modelo (Rykiel, 1984). Os tomadores de decisão precisam saber se um modelo é uma representação suficientemente boa de sua contraparte real e quais critérios podem ser usados para responder a essa questão. A falta de clareza na terminologia é um dos principais obstáculos para uma adequada compreensão do que é a validação do modelo, como isto funciona e o que pode oferecer. Na tentativa de resolver este impasse, Augusiak et al. (2014), sugeriram que o termo "validação" é muito abrangente e, portanto, inútil para qualquer finalidade prática. Esses pesquisadores introduziram o termo 'evaluation' (em inglês), uma fusão de "avaliação" e "validação", para descrever todo o processo de estimação da qualidade e confiabilidade de um modelo. Assim, considerando a natureza iterativa do desenvolvimento de modelos e o ciclo da modelagem, foram identificados seis elementos essenciais de avaliação, a seguir: 1. *Data evaluation*, 2. *Conceptual model evaluation*, 3. *Implementation verification*, 4. *Model output verification*, 5. *Model analysis* e 6. *Model output corroboration* (Figura 11).

A evaluation consiste em vários elementos que correspondem às diferentes etapas do desenvolvimento do modelo iterativo, formando o "ciclo de modelagem" (Grimm & Railsback, 2005). Eles, portanto, servem como os principais elementos estruturantes do sistema terminológico sugerido. O ciclo de modelagem consiste nos seguintes elementos: formulação das questões a serem abordadas; montagem de hipóteses que constituem nosso modelo conceitual do sistema em questão; escolha da estrutura do modelo, ou seja, escolha e representação de entidades, variáveis de estado e processos, implementação do modelo através de equações e/ou um programa de computador; análise de modelo; e comunicação de resultados do modelo (Augusiak et al., 2014).

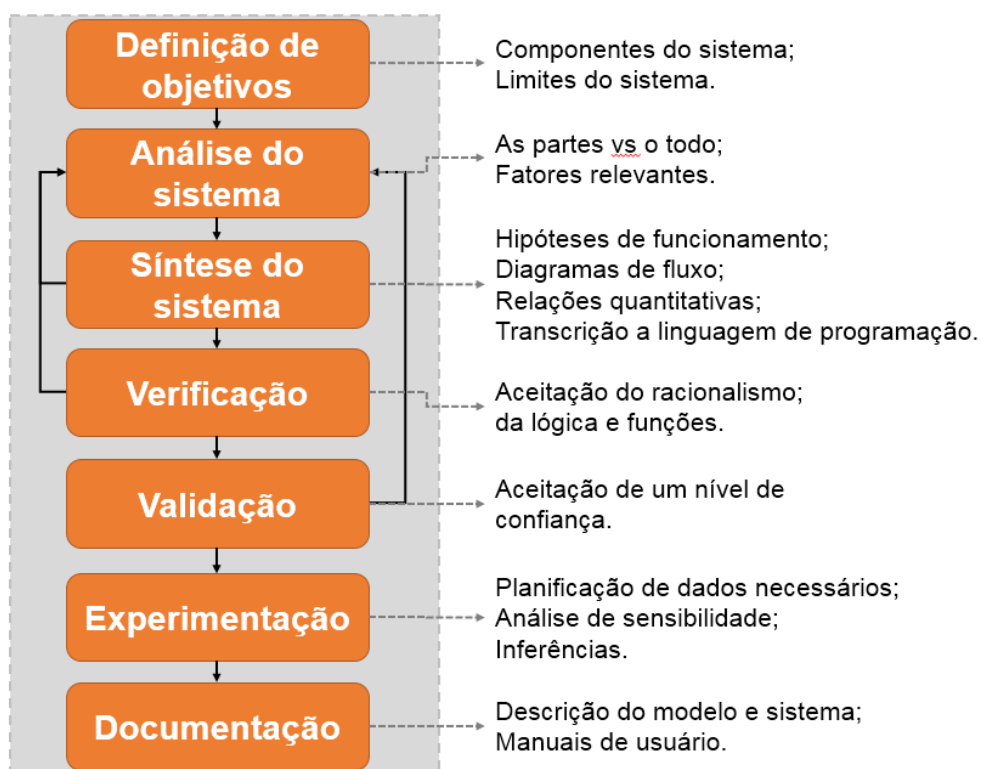


Figura 10. Esquema geral das etapas de elaboração de um modelo de simulação. Fonte: adaptado de Aumann, 2007 e Walters et al. (2016).

A *evaluation* consiste em vários elementos que correspondem às diferentes etapas do desenvolvimento do modelo iterativo, formando o "ciclo de modelagem" (Grimm & Railsback, 2005). Eles, portanto, servem como os principais elementos estruturantes do sistema terminológico sugerido. O ciclo de modelagem consiste nos seguintes elementos: formulação das questões a serem abordadas; montagem de hipóteses que constituem nosso modelo conceitual do sistema em questão; escolha da estrutura do modelo, ou seja, escolha e representação de entidades, variáveis de estado e processos, implementação do modelo através de equações e/ou um programa de computador; análise de modelo; e comunicação de resultados do modelo (Augusiak et al., 2014).

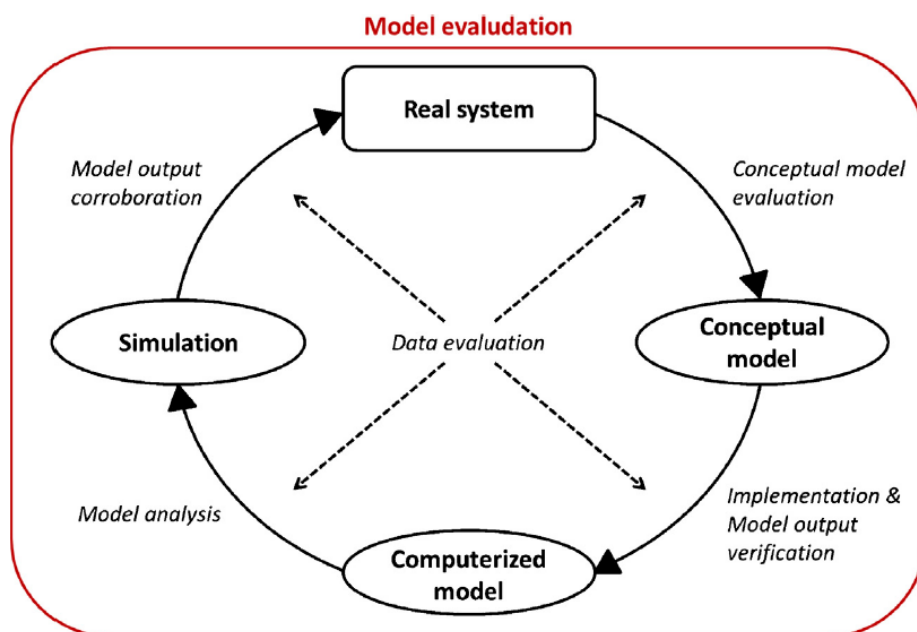


Figura 11. Representação simplificada do ciclo de modelagem, consistindo nos quatro principais passos do desenvolvimento do modelo e seus correspondentes elementos de avaliação. Os termos em *itálico* compreendem a terminologia sugerida para organizar e comunicar a avaliação do modelo. Os quatro elementos de desenvolvimento do modelo foram, no contexto da garantia de qualidade do modelo, sugeridos por Refsgaard e Henriksen (2004) e Schlesinger (1979). A garantia de qualidade corresponde ao que aqui é referido como 'evaluation' e o que até agora na modelagem ecológica tem sido implicitamente referido como avaliação e/ou validação. Fonte: Augusiak et al. (2014).

2.2.4. Modelos agropecuários

Os modelos de sistemas agrícolas são ferramentas relevantes para avaliar diferentes opções de políticas nas chamadas avaliações de impacto (Reidsma et al., 2018). Desse modo, a modelagem e a simulação de sistemas têm sido propostos como instrumentos da pesquisa que permitem realizar este tipo de estudo, minimizando custos, reduzindo o tempo de avaliação e servindo como ferramenta de apoio à tomada de decisão (Naazie et al., 1999).

A maioria dos estudos nesta área foi realizada em países da Europa ocidental, com poucos estudos em países nórdicos e orientais. Em muitos países existem instituições em destaque, como a Universidade de Tuscia e Bolonha na Itália, o Instituto Nacional da Pesquisa Agrônômica na França, a Universidade Politécnica de Madri na Espanha, a Universidade de Wageningen e a própria pesquisa na Holanda, o Instituto Leibniz de Desenvolvimento Agrícola na Europa central e oriental, a Universidade de Hohenheim, na Alemanha, e a Universidade Aristóteles de Tessalônica, na Grécia (Figura 12).

Em um estudo realizado por Reidsma et al. (2018) foi constatado que em todos os setores agropecuários pesquisados, os modelos de simulação foram utilizados para avaliar as políticas na União Europeia (Figura 12 e 13). A agricultura foi o destaque com o maior número de artigos (e.g. Mouratiadou et al., 2010), seguido por laticínios (e.g. van de Ven e van Keulen, 2007), carne

bovina (e.g. Vosough Ahmadi et al., 2015), cultivos perenes (e.g. Lescot et al., 2014), cultivos mistos (e. g. Solazzo et al., 2014), ovinos/caprinos (e. g. Benoit e Laignel, 2014), suínos (e. g. Wagner et al., 2015), aves (e. g. Gocht et al., 2013) e agrofloresta (e.g. Borges et al., 2010). Mais da metade dos estudos (51%) avaliaram múltiplos setores. Os estudos de suínos e aves sempre foram avaliados em combinação com outros setores. De todos os 184 estudos avaliados pelos autores, 73% consideraram a diversidade de produção, avaliando os impactos das políticas em vários tipos sistemas de produção. Isto demonstra a importância dos modelos de simulação para direcionar a criação de políticas que contribuam com o desenvolvimento sustentável dos sistemas agropecuários ao redor do mundo.

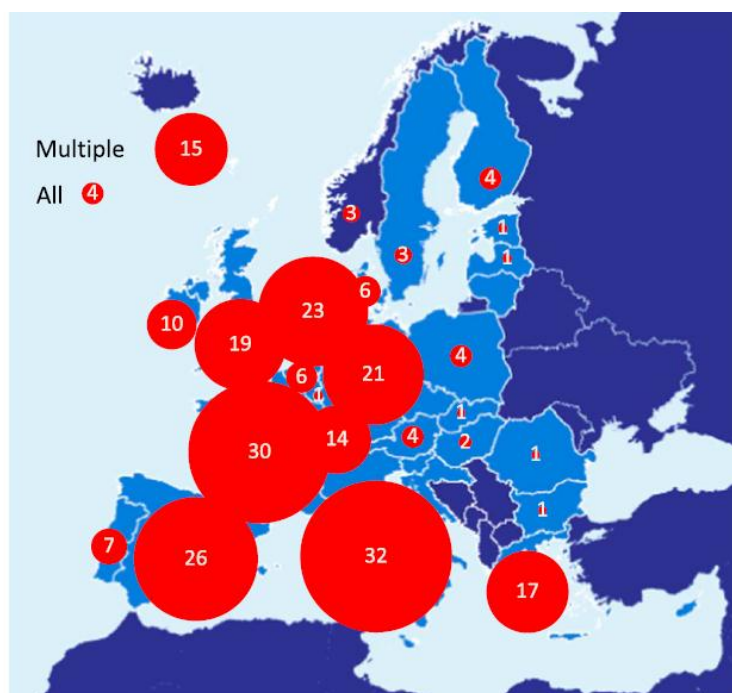


Figura 12. Número de modelos agropecuários que foram aplicados para o desenvolvimento de políticas em diferentes regiões da União Europeia. Fonte: Reidsma et al. (2018).

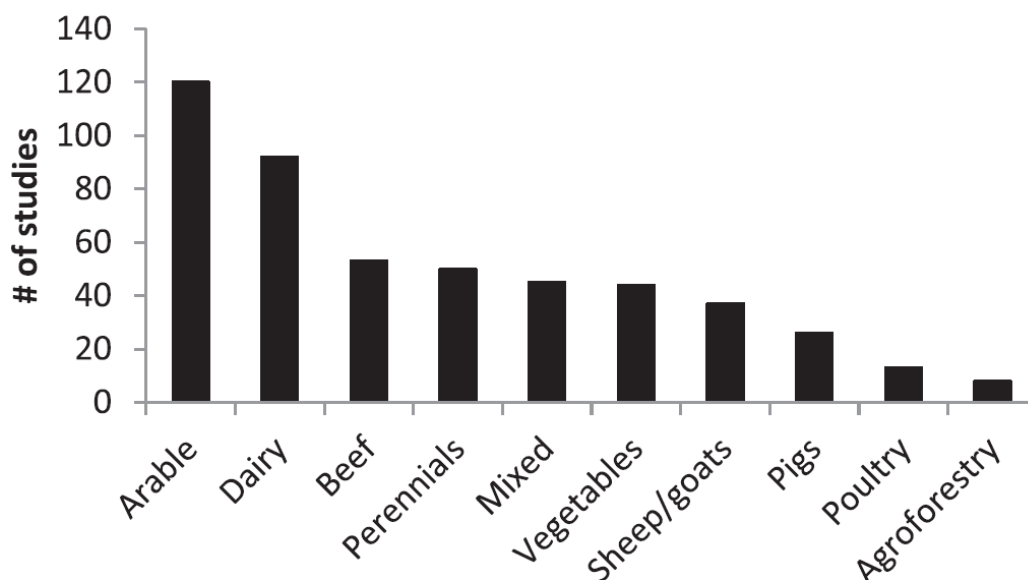


Figura 13. Setores para os quais as políticas foram avaliadas com modelos de simulação. Fonte: Reidsma et al. (2018).

2.2.4.1. Modelos na cria de bovinos de corte

Dada a complexidade dos sistemas de cria de bovinos de corte, cientistas estão fazendo uso de modelos de simulação como auxiliares de decisão (Diaz-Solis et al., 2006). Estes modelos incluem uma infinidade de variáveis importantes, incluindo clima, solo e vegetação, bem como o atual alcance da produtividade, taxa de lotação, as condições de mercado, os quais influenciam as decisões de gestão.

Alguns trabalhos usando modelos de simulação na cria de bovinos de corte têm sido desenvolvidos para avaliar impactos biofísicos, econômicos e ambientais ao redor do mundo (Tabela 9). Os diferentes fatores que compõem um sistema de cria interagem entre si, com um grau alto de complexidade, de forma que uma intervenção parcial afetando apenas uma categoria animal, por exemplo, poderá ter efeitos nas demais categorias do rebanho, dificultando a predição do impacto produtivo no conjunto do sistema. Assim, a avaliação da intervenção de uma nova tecnologia, seja ela de processos ou insumos, deverá ser realizada considerando seus impactos no sistema comum todo (Black et al., 1993) e uma ferramenta poderosa para isto são os modelos de simulação.

Tabela 9. Modelos bioeconômicos envolvendo sistemas de cria de bovinos de corte, suas principais intervenções e respostas avaliadas.

Local	Intervenção	Avaliou risco?	Considerou mudanças climáticas?	Principais respostas avaliadas	Integrou outras fases/atividades produtivas?	Referência
Argentina	Alimentação adicional	Sim	Sim	VEM da alimentação adicional	Não	Berger et al. 2017
França	Grupos genéticos e qualidade dos alimentos	Não	Não	Receita, Metano e CO ₂	Lavoura	Mosnier et al. 2017
Espanha	Intervalo de parto e idade à primeira parição	Não	Não	VEPZ	Recria e terminação	López-Paredes et al. 2017
Austrália	Irrigação de pastagens	Sim	Sim	Receita, ML e VPL	Recria	Monjardino et al. 2016
Nova Zelândia	Irrigação de pastagens	Não	Sim	RMSP e custos	Ovinos	Vogeler et al. 2016
Alemanha	Desempenho reprodutivo e estratégias de comercialização	Sim	Não	Receita, custos, PER	Não	Feldt et al. 2016
Brasil	Idade à desmama	Não	Não	Receita, custos, ML	Não	Vaz et al. 2014
Noruega	Grupos genéticos	Não	Não	Receita, custos e VEM de parâmetros de rebanho	Terminação	Åby et al. 2012
Espanha	Estratégias de manejo e comercialização	Sim	Não	Receita e custos	Terminação	Villalba et al. 2010
Brasil	Adesão da terminação e venda de reprodutores	Não	Não	Receita, custos, ML e VEPZ	Recria e terminação	Júnior et al. 2006

VEM = valor econômico marginal; VEPZ = valores econômicos de parâmetros zootécnicos; ML = Margem Líquida; VPL = valor presente líquido; RMSP = rendimento da matéria seca da pastagem; PER = parâmetros de estrutura de rebanho (Gonzalez, 2018).

3. HIPÓTESE E OBJETIVOS

3.1. Hipótese

A intensificação, por meio de pastagens cultivadas e a irrigação, melhora os indicadores biofísicos e econômicos do sistema de cria de bovinos de corte.

3.2. Objetivo geral

Avaliar o impacto bioeconômico da intensificação da cria de bovinos de corte, utilizando níveis de produção de energia por meio de pastagens cultivadas e a irrigação, sobre parâmetros bioeconômicos.

3.2.1. Objetivos específicos

Desenvolver um modelo da cria de bovinos de corte considerando os efeitos do El Niño Oscilação Sul em um horizonte de 10 anos.

Simular cenários de níveis de produção de energia e avaliar seus efeitos sobre parâmetros biofísicos e econômicos em um horizonte de 10 anos.

4. MÉTODO GERAL

De forma geral, a realização deste estudo pode-se resumir em seis etapas fundamentais. A primeira etapa consistiu na elaboração de uma robusta revisão de literatura que deu o suporte necessário às etapas subseqüentes. Na segunda etapa, foram identificados os componentes, variáveis e suas inter-relações da intensificação de sistemas de cria de bovinos de corte. Isto possibilitou a terceira etapa, que consistiu na construção do modelo conceitual, representando o funcionamento da cria de bovinos de corte no hemisfério sul. Seguidamente, na quarta etapa foi transcrito o modelo conceitual para uma linguagem lógica-matemática. Esta etapa permitiu a configuração de diferentes cenários para realizar experimentação por meio de simulações na quinta etapa. Por fim, a sexta etapa consistiu na documentação do estudo, que deu origem a esta tese.

4.1 Visão geral do modelo

O modelo desenvolvido é representativo dos sistemas de produção de cria de bovinos de corte da região sul do Brasil. A unidade básica de medida do tempo foi configurada para um dia em razão das exigências diárias de energia metabolizável dos animais e ao crescimento diário das pastagens. O modelo está constituído por quatro submodelos: estrutura de rebanho, exigência de energia dos animais, produção de energia do sistema e submodelo econômico. Esses submodelos estão relacionados por meio de fluxos de informações, estoques, conversores e conectores.

O sistema base de produção (BS) foi definido com a utilização de 100% de campo natural. A partir deste, o modelo permite avaliar a intensificação por meio do uso de áreas com ou sem irrigação do capim sudão (*Sorghum bicolor* (L.) Moench x *Sorghum sudanense* (Piper) Stapf) durante o verão,

associado à utilização de azevém (*Lolium multiflorum* Lam) em consórcio com aveia (*Avena strigosa* Schreb) durante o inverno, sem irrigação. Além disso, o modelo avalia o efeito do nível de intensificação em uma linha temporal, aqui denominada de horizonte de 10 anos. Neste período foi possível capturar os efeitos de diversos ciclos produtivos considerando os impactos do ENSO, sendo que em anos de El Niño a precipitação pluvial foi definida como acima da média climatológica, em La Niña abaixo da média e em Neutro como a média.

4.2 Nível de intensificação

A área total do sistema de produção foi definida em 1000 hectares (ha) como representativa dos sistemas de cria na região do estudo. Para avaliar os efeitos da intensificação foram simulados diferentes cenários, os quais representam níveis de intensificação determinados pela proporção de área utilizada durante o verão e inverno com pastagens cultivadas e pela utilização ou não da irrigação apenas no período de verão. A proporção de área intensificada foi modelada para ser igual tanto no verão, quanto no inverno em cada nível de intensificação.

4.3 Submodelo estrutura de rebanho

A estrutura de rebanho foi modelada para funcionar baseada em indicadores reprodutivos e de sobrevivência, associados aos manejos usualmente praticados nos sistemas de cria no sul do Brasil. Os valores destes parâmetros foram mantidos constantes entre os níveis de intensificação e os fenômenos ENSO, ou seja, o submodelo estrutura de rebanho foi definido para não ocorrerem mudanças no desempenho individual dos animais entre os cenários. Assim, o que varia entre cada nível de intensificação é a capacidade de suporte do rebanho devido às alterações na quantidade de energia metabolizável produzida em cada nível de intensificação.

4.4 Submodelo exigência de energia

Este submodelo permitiu calcular a quantidade de ME (Mcal/dia) que seria requerida por um tipo específico de animal com uma dieta específica, a fim de atingir um alvo específico de crescimento, gestação, lactação, ou o conjunto destas etapas fisiológicas acontecendo de forma paralela.

4.5 Submodelo produção de energia

A produção de ME foi a variável finalística para calcular a capacidade de suporte do rebanho em cada nível de intensificação. Essa produção se dá pela relação das variáveis, nutrientes digestíveis totais (TDN), a massa de forragem e a taxa diária de acúmulo de matéria seca. No entanto, variáveis como o tipo de pastagem, o mês do ano e o evento climático, que pode ser El Niño, Neutro ou La Niña, também são determinantes para prever a produção de ME. Assim, o modelo simula de forma realística a variabilidade mensal da produção de ME, contabilizando anualmente a produção e as exigências de ME pelos animais. Desse modo, o modelo realiza um ajuste, otimizando o tamanho do rebanho sob o pressuposto que nos meses em que há excedente de alimento, este será armazenado para ser oferecido na forma de feno nos meses deficitários.

4.6 Submodelo econômico

Este submodelo visa resolver uma matriz de custo para cada nível de intensificação no horizonte de 10 anos. Um dos objetivos do submodelo econômico é resolver o custo operacional efetivo (COE), o custo operacional total (COT) e o custo total (CT). O COE refere-se aos custos que são desembolsos efetivos para a produção ao longo de um ano e que serão consumidos neste mesmo intervalo de tempo, como: estabelecimento de pastagens, reprodução, suplementação mineral, manutenção da pastagem natural, sanidade, combustíveis, energia elétrica e telefonia, energia elétrica para irrigação, sede, contabilidade e mão de obra. Em relação ao COT, adiciona-se ao COE o valor das depreciações de benfeitorias, máquinas e implementos. É contabilizado também o imposto territorial rural, os custos de manutenções e seguros. Por fim, o CT adiciona ao COT os valores referentes ao custo de oportunidade da remuneração da terra, 40 kg de boi/ha/ano como representativo da região do estudo, e o custo da remuneração do capital investido, que neste caso, seriam os itens do custo variável (estabelecimento de pastagens, reprodução, suplementação mineral, manutenção da pastagem natural e sanidade).

4.7 Saídas do modelo

Os resultados do modelo incluem parâmetros físicos e econômicos como a produtividade, a receita, o COE, as diferentes margens econômicas, a eficiência econômica, o risco econômico associado à sensibilidade na margem operacional efetiva em decorrência da variação dos preços de mercado. Além disso, os resultados incluem uma análise de otimização estocástica do ponto de equilíbrio físico e econômico associado à incerteza dos preços do mercado, em um horizonte de 10 anos.

CAPÍTULO II ¹

¹ Manuscrito submetido na revista Agricultural Systems em 13 de setembro de 2018.

5. Intensification of cow-calf production: How does the system respond biologically to energy inputs in a long-term horizon?

Fredy Andrey L. Gonzalez^{a,*}, Rodrigo Ignacio V. Allende^b, Juan Manuel L. Soares de Lima^c, Maria Eugênia A. Canozzi^d, Amir G. Sessim^a, Júlio Otávio J. Barcellos^a

^a *Department of Animal Science, Federal University of Rio Grande do Sul, 7.712 Bento Gonçalves Ave., Porto Alegre, Rio Grande do Sul 91540-000, Brazil*

^b *Department of Animal Science, Faculty of Veterinary Sciences, University of Concepción, Chillán, Chile*

^c *Programa Nacional de Carne y Lana, Unidad de Economía Aplicada, Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.*

^d *Programa Producción de Carne y Lana, Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Estación Experimental INIA La Estanzuela, Ruta 50 km 11, 39173, Colonia, Uruguay.*

ABSTRACT

In southern Brazil, beef cattle production systems generally rely on grazing on natural pastures. However, their forage production, and consequently metabolizable energy (ME) production, is seasonal and influenced by climatic events. Thus, there is a scientific and commercial interest in evaluating and understanding the biological impacts of intensification using pasture irrigation and the effects of El Niño-Southern Oscillation (ENSO) phenomena on the long term on the productivity of cow-calf systems. Therefore, our objective was to develop a simulation model to evaluate the effects of intensification levels, using cultivated pastures and irrigation, on the productivity and on the efficiency metabolizable energy utilization of beef cow-calf systems in a 10-year horizon. This period allows capturing the effects of several production cycles as influenced by ENSO events. The model includes three submodels: herd structure, herd ME requirements, and forage ME production. The results of the present study demonstrate that the proposed model is able to evaluate the influence of intensification of grazing systems on metabolizable energy production, carrying capacity, productivity and biological efficiency of beef cow-calf systems over a long-term horizon. Productivity was increased in 66.2% when 20% of the grazing area was intensified and irrigated compared with the modeled non-intensified system, independently of climatic events. The main productive response was the increase in the number of dams in the herd, especially as a result of the use of irrigation. This study proposes different alternatives for increasing the productivity of beef cow-calf systems in southern Brazil.

Keywords: biological efficiency; El Niño-Southern Oscillation (ENSO); herd structure; Irrigation; modeling.

INTRODUCTION

The cow-calf phase is the foundation of the entire beef cattle production cycle. However, it is the phase with the lowest biological efficiency (Nasca et al., 2015) due to the presence of few animal classes and its high energy maintenance cost (National Academies of Sciences and Medicine, 2016). It strongly depends on process technologies, because inputs have limited impact on its overall productivity. Nevertheless, the increasing competition for land use (Oliveira et al., 2017) with more profitable activities, such as cash crops, in many regions of the world, have forced cow-calf producers to intensify their production processes.

Energy intake is one of the main factors that influence the productivity of animal production systems, and estimates of energy availability in feedstuffs are essential to describe the nutritional requirements of beef cattle (Galyean et al., 2016). The overall energy requirements of a cow-calf herd include the requirements of cows, replacement heifers, calves before weaning and bulls (Ferrell and Jenkins, 1985). Adequate energy supply is required for maintenance, growth, gestation and lactation in order to ensure the desired output levels (Walmsley et al., 2016). In beef cow-calf systems, approximately 70 to 75% of the total annual metabolizable energy (ME) is used for maintenance functions (Ferrell and Jenkins, 1985).

In southern Brazil, beef cattle production systems generally rely on grazing on natural pastures. However, their forage production, and consequently ME production, is seasonal (Carvalho et al., 2006) and influenced by climatic events. This seasonality is characterized by forage abundance during spring and summer, and forage limitation during autumn and winter, resulting in a mismatch between forage production and animal requirements (Carvalho et al., 1998). As consequence of the insufficient forage production during the winter, cattle lose weight, which explains the low productivity of cow-calf systems in that region (Modernel et al., 2018). In order to maintain the stability forage ME production throughout the year in this region, planting forage varieties with high growth potential, such as sudangrass (*Sorghum bicolor* (L.) Moench x *Sorghum sudanense* (Piper) Stapf) and pasture irrigation have been proposed (Cosentino et al., 2012; Cotton et al., 2013; Jahanzad et al., 2013). Irrigation may also aid mitigate the effects of climate phenomena, such as El Niño-Southern Oscillation (**ENSO**), on pasture production. However, experiments to evaluate the use of irrigation in cow-calf systems are expensive, long, and very complex (Diaz-Solis et al., 2006), and therefore, the use of simulation models has shown to be effective for the analysis of the many factors that influence cow-calf systems and their interactions (Jones et al., 2016).

There is a scientific and commercial interest in evaluating and understanding the biological impacts of intensification (Ash et al., 2015) using pasture irrigation and the effects of ENSO phenomena on the long term on the productivity of cow-calf systems. However, in Brazil, especially in the South, there is limited information on this subject. Therefore, our objective was to develop a simulation model to evaluate the effects of intensification, using cultivated pastures and irrigation, on the productivity and on the efficiency metabolizable energy utilization of beef cow-calf systems in a 10-year horizon.

MATERIALS AND METHODS

Model Overview

The model developed is representative of cow-calf production systems of southern Brazil (**Fig. 1 and 2**). In this region, the beef herd mainly consists of British breeds (Hereford and Angus) and their crosses with *Bos indicus* (Braford and Brangus). The climate of this region is humid subtropical (Alvares et al., 2013), with an average annual rainfall of 1440 mm. However, rainfall is not evenly distributed throughout the year. During the summer, evapotranspiration is high and often greater than precipitation, resulting in negative water balance and consequently affecting forage production (Berlato and Fontana, 2003; Gelcer et al., 2013).

The time step unit of measure used in this study was 1 day¹. The model includes three submodels: herd structure, herd ME requirements, and forage ME production (**Fig. 3**). These submodels are linked by information flows, inventories, converters, and connectors. The model may arbitrate initial integer and non-integer values. The non-integer output values are solved by truncation, generating integer values, such as in the case of the number of animals in herd class.

The baseline production system was defined as 100% natural pastures. The model evaluated the intensification of the baseline system by increasing areas of sudangrass (*Sorghum bicolor* (L.) Moench x *Sorghum sudanense* (Piper) Stapf) irrigated or not in summer and planted with ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam) and oat (*Avena strigosa* Schreb) in the winter and not irrigated. The model evaluates the effect of intensification level over a 10-year period, herein referred as a 10-year horizon. This period allows capturing the effects of several production cycles as influenced by ENSO events. In the model, rainfall was considered higher, lower, or equal to the climatological average during El Niño, La Niña and Neutral years, respectively (Gelcer et al., 2013).

Intensification level

The total area of the production system was set as 1000 hectares (ha) because it is representative of cow-calf systems in the studied region. In order to evaluate the effects of intensification, different scenarios representing intensification levels were simulated. Intensification level was defined as the proportion of the total area that were planted with cultivated pastures during summer and the winter, and to the use of irrigation (only during the summer). The model defined the proportions of the intensified area both during the summer and the winter at each intensification level as equal. Therefore, intensification levels were defined as 0, 5, 10, 15 and 20%, which corresponded to 1000 ha of natural pastures with no intensification (**0% intensified**), 950 ha of natural pastures and 50 ha intensified (**5% intensified**), 900 ha of natural pastures and 100 ha intensified (**10% intensified**), 850 ha of natural pastures and 150 ha intensified (**15% intensified**), and 800 ha of natural pastures and 200 ha intensified (**20% intensified**), respectively (**Fig. 3A**).

¹ The use of 1 day as unit was due to the metabolizable energy requirements and pasture growth were calculated on a daily basis.

Herd structure submodel

The herd structure was modeled based on reproductive and survival parameters that are associated with the management practices commonly applied in cow-calf systems in southern Brazil (Table 1). The values of these parameters were kept constant among intensification levels and ENSO events, i.e., the herd structure submodel did not consider any individual performance changes among the evaluated scenarios. Therefore, the variation among intensification levels is determined by pasture carrying capacity allowed by the amount of ME produced at each intensification level (Ruviaro et al., 2015). This assumption is accepted when ME offer allows reaching the desired productive, reproductive, and survival performance parameter values.

This submodel includes all animal classes of the herd (**Fig. 3C**). Some assumptions were defined for the submodel evolution, and included average heifer age at first mating as 27 months and average cow stayability of 8 years. In addition, breeding by natural mating was established to occur in December, calving in mid-October and pregnancy diagnosis and weaning in April, on average. The model was set to account for cow surplus in April, at the time of pregnancy diagnosis and weaning. Heifer surplus was accounted for in December, when replacement heifers were selected for breeding, and in April, at the time of pregnancy diagnosis.

The herd structure model was based on animal classes according to number of cows each intensification level is able to carry, associated to the herd parameters (**Table 1**). Carrying capacities of 231, 278 and 327 dams were calculated for the no-intervention scenario (**0% intensified**) during La Niña, Neutral and El Niño years, respectively. Based on these scenarios, interventions in energy output were modeled, determining the carrying capacity as a function of intensification level and herd ME requirements.

Energy requirements submodel

This submodel was adapted from Freer et al. (2012), and allows calculating the amount of ME (Mcal/day) required by a specific animal class fed a specific diet to achieve specific growth, gestation, and lactation targets, or all of these physiological steps together, according to physiological status (**Fig. 4**), as recommended by the CSIRO (2007).

Heifer growth and cow body weight evolution during their productive lives were modeled as recommended by Rovira (1996), aiming to achieve adequate reproductive indicators (**Table 1**) according to the dynamic parameters of the physiological status of each animal class (**Table 2**). These input parameters, together with weanling body weight, body weight of surplus cows and heifers, and forage ME content, allow the determination of the energy requirements of each animal at any time point of its productive life. This was the main adaptation of this submodel, which made it more dynamic and functional for the proposed evaluation. The parameter values of the energy requirements submodel (Table 2) were defined as constant among intensification levels and ENSO events.

Energy production submodel

The finalistic variable ME production was used to calculate the carrying capacity of each intensification level. ME production is given by the relation among the variables total digestible nutrients (TDN), forage mass and daily dry matter accumulation rate (**Fig. 3B**). However, variables such as pasture type, month of the year and climatic event, which may be El Niño, Neutral or La Niña, are also determinant to predict ME production. Thus, the model realistically simulates the monthly variability of ME production, accounting for annual ME production and animal ME requirements. Therefore, the model was fit to optimize herd size under the assumption that, during the months when there is feed surplus, this surplus would be stored to be offered as hay during the months of feed deficit.

All the scenarios were arbitrated to quantify total ME production, and did not consider the allocation of specific animal classes in the intensified areas. The values used to parameterize this submodel were retrieved from a database of natural pastures representative of the studied region (Carvalho et al., 2017), using only forage mass and daily dry matter accumulation within the interval of two standard deviations of the mean.

The identification of the ENSO events was based on the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) classification, which considers the deviation of $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ in mean sea surface temperature for the identification of the season trimesters (NOAA, 2014; Pereira et al., 2018). Average total digestible nutrients were modeled considering pasture quality variability during the year. However, for the purposes of this model, these values were set as fixed among intensification levels and ENSO events (UI-Allah et al., 2014). Forage mass and daily dry matter accumulation rate were set considering their variability throughout the year according to pasture type, irrigation effect and ENSO event (**Table 3**).

Forage allowed was defined as 12% (12 kg DM/100 kg BW; Trindade et al., 2016) for all pastures. In grazing systems with the proposed forage allowance, the forage is not entirely harvested by the cattle, and some residue is left. In order to represent this situation, which occurs in biological systems, a utilization factor was defined for each pasture type (**Table 4**).

This submodel predicts the amount of ME monthly available according to the following equation:

$$\text{MEA} = [\text{FM} + (\text{DAR} \times 30.40)] \times \text{TDN} \times 4.40 \times 0.82 \times \text{EFH} \quad (1; \text{adapted from the NRC, 1996})$$

Where MEA represents the metabolizable energy available (Mcal/ha/month); FM, forage mass (kg DM/ha); DAR, daily dry-matter accumulation rate (kg DM/ha/day); TDN, total digestible nutrients (%), and EFH, efficiency of forage harvest (%). The energy concentration (ECF) of each forage type, which is used as an input variable throughout the year in the energy requirements submodel, was obtained by the equation:

$$\text{ECF} = \text{TDN} \times 4.40 \times 0.82 \quad (2; \text{NRC, 1996})$$

Where ECF represents the metabolizable energy content of the forage (Mcal/kg DM); and TDN, total digestible nutrients (%).

This submodel is related with the intensification level by capturing the size of the intensified area and dynamically solving ME production throughout the year for each forage type, using the settings in **Table 3**. The resulting total MEA value is used as a key input variable in the herd structure submodel to predict the size of the herd that each intensification level is able to carry. Therefore, this submodel is directly related to the other submodels, because the generated information supports the other submodels.

Model Outcomes

The model outcomes include ME production by the system, herd ME requirements, forage carrying capacity, and productivity and biological efficiency of the production system. Herd structure is given by the number of animals in each class throughout the year.

ME requirements and production are expressed in Tera calories (Tcal) and are the results of the sum of herd ME requirements and of pasture ME production, respectively throughout the year. Productivity was obtained using the equation:

$$\text{Productivity} = \sum \text{CW} + \sum \text{CS} + \sum \text{HS} \quad (3; \text{Adapted from Davis et al., 1983 and Lamb et al., 1992})$$

Where productivity is kilograms of live weight produced (kg LW/ha/year); CW is kilograms of weaned calves (kg LW/ha/year); CS is kilograms cow surplus (kg LW/ha/year) and HS is kilograms of heifer surplus (kg LW/ha/year).

The biological efficiency, defined as productivity per unit of ME produced annually by the system and simulated for a 10-year horizon, was obtained by the equation:

$$\text{Efficiency} = \text{Productivity}/\text{ME}_t \quad (4; \text{Adapted from Walmsley et al., 2016})$$

Where Efficiency is the biological performance (g LW/Mcal ME); Productivity is the total live weight produced (kg LW/ha/year) and ME_t is the total amount of ME produced by the system available to the herd (Total Mcal ME/herd/year).

The conceptual model is a proposal of intensification of cow-calf systems, and not specific to a given production system or data set. In general, models of such systems cannot be submitted traditional validation procedures (Walters et al., 2016). For this reason, in our simulation the validation is operational, allowing to compare the results of the model with published research data and also to detect differences among the evaluated scenarios.

RESULTS

Operational Validation

Model efficacy was evaluated based on the conceptual model and on the equation flow to determine if the model operated as expected. Therefore, we tested several intervals of the model parameters to determine if it responded to the changes as expected.

The herd structure submodel was sensitive to the changes at each simulation performed because its dynamics is consistent with the number of dams, pregnancy risk and survival probability, resulting in adequate and realistic proportions of the number of calves born and weaned in each intensification scenario. In addition, dam proportion was consistent and according to the age and number of calves produced, with a higher proportion of younger dams than of older dams in the herd structure (**Fig. 5**). This is due to likelihood of a dam staying in the system from one year to the next if it became pregnant in the previous mating season and survived (Pang et al., 1999). Thus, in a stabilized herd, there is a higher proportion of young dams than older dams, and this biological phenomenon was adequately and consistently represented by the proposed submodel.

The simulated parameters included pregnancy risk of heifers (80 to 100%), second-calf cows (66 to 86%), and multiparous cows (70 to 90%); probability of calf survival from birth to weaning (94 to 100%); annual probability of survival of second-calf, multiparous and last-calf cows (96 to 100%); number of cows (50 to 5000); and bull to cow ratio (1.5 to 3%).

The energy requirements submodel is an adaptation of the model proposed and validated by Freer et al. (2012) for the prediction of ME requirements and ME utilization for maintenance and production, according to the recommendations of the CSIRO (2007). No quantitative individual weight gain variations were tested because the assumed output of the proposed intensification levels was pasture carrying capacity.

The energy production submodel includes the variations in forage mass, daily dry matter accumulation rate, and total digestible nutrients in order to provide adequate estimates of ME production. Therefore, increasing values of those parameters result in greater ME production (**Fig. 6**). This submodel also consistently estimates ME availability to the animals, capturing changes in pasture utilization efficiency. Consequently, under the same qualitative basis, pastures with greater utilization efficiency increase the amount of ME available to the system.

Comparison of Model Results with Published Literature

The carrying capacity estimated by the model for the 0% intensification level during Neutral climatic event was 278 cows (**Fig. 7**). This result is in agreement with the findings of Santos et al. (2017), who determined a carrying capacity of 270 cows under similar conditions as the 0% intensification scenario in the present study. The magnitude of the intensification had variable impacts on ME production (**Fig. 6**), on pasture carrying capacity (**Fig. 5** and **7**) and on system productivity (**Fig. 8**). These results are consistent with studies reporting that increasing intensification levels have a positive impact on the productivity of

cow-calf systems (Potter et al., 1998; Beretta et al., 2002; Dill et al., 2015; Mazzetto et al., 2015; Ruviaro et al., 2015; Li et al., 2017; Pereira et al., 2018).

The model also showed that pasture irrigation maximizes biomass production by the system (Zamfir et al., 2001; Cosentino et al., 2012; Rocard et al., 2012; Schittenhelm and Schroetter, 2014), which may increase ME in 1 to 14%, as a function of climatic event and intensification level (**Fig. 7**). Li et al. (2017), evaluating the effect of irrigation on cow-calf systems, determined a 17% increase in forage biomass.

Considering the 10-year horizon, our results demonstrate average productivity values of 57.3 to 95.3 kg LW/ha/year, as a function of intensification level and the use or not of irrigation (**Fig. 9**). These findings corroborate with those described by Potter et al. (1998), Beretta et al. (2002), Kopp et al. (2004) and Nasca et al. (2015). Potter et al. (1998), evaluating age at mating of heifer under different feeding management practices, obtained productivity values of 60 to 116 kg LW/ha/year in a cow-calf herd. On the other hand, Beretta et al. (2002) obtained productivity values of 38 to 81 kg LW/ha/year, depending on the age at first calving of heifers grazing on natural pastures or natural pastures improved with winter species. Kopp et al. (2004) evaluated the effects of pasture fertilization, incorporation of legumes, and the use of additives and obtained productivity values of 15 to 158 kg LW/ha/year. Nasca et al. (2015), evaluating different herd frame scores in systems based on tropical pastures, found productivity values of 50 to 85 kg LW/ha/year.

In the present study, the model estimated an average biological efficiency 5.44 g LW/Mcal total ME (**Fig. 8 and 9**). This finding is according with the results of Zilverberg et al. (2011), who evaluated the effect of different management practices and environmental factors on the energy utilization in cow-calf systems and obtained efficiency values of 5 to 17 g LW/Mcal total energy. On the other hand, Calegare et al. (2009), analyzing proportion of *Bos taurus* in a cross-breeding system, obtained efficiency values of 35 to 45 g of product/Mcal of total ME. Although these values are higher than those obtained in our study, the results are equivalent, because we considered the ME intake of all animal classes in the herd, while Calegare et al. (2009) assumed the ME intake of only the cow-calf pair. Therefore, based on literature findings and on the production results obtained in the present study, the efficacy of proposed model for the estimation of the effects of intensification of beef cow-calf systems in the Brazilian pampa biome is demonstrated.

Herd structure

Higher intensification levels allowed to allocate a larger number of cows in the 1000-ha area (**Fig. 5 and 7**). Moreover, irrigation increased pasture carrying capacity compared with the baseline system (0% intensification) and non-irrigated intensified systems (**Fig. 5 and 7**). Herds with higher numbers of heads required higher ME amounts both annually and in 10 years (**Fig. 5, 6 and 10**). Annually, the carrying capacity of the 0% intensified system was 327, 278 and 231 cows during El Niño, Neutral and La Niña years, respectively. In the 20% intensified system with irrigation, cow carrying capacity increased in 48.6, 72.0 and 81.4% during El Niño, Neutral and La Niña years, respectively, compared with the 0% intensified system (**Fig. 7**).

In the 10-year horizon, the non-intensified system (0% intensification level) presented a total carrying capacity of 2833 cows. When intensification was simulated by the use of sudangrass in the summer, with no irrigation, and ryegrass associated with oat in the winter, carrying capacity increased in 13.8, 27.5, 41.3 and 55.2% for the 5, 10, 15 and 20% intensification levels, respectively. Moreover, the use of irrigation enhanced the effects of intensification levels on carrying capacity, which was 16.4, 32.8, 49.0 and 65.4% higher for the 5, 10, 15 and 20 % intensification levels, respectively, relative to 0% intensification level (**Fig. 5 and 11**).

System intensification with or with no irrigation resulted in higher productivity compared with the baseline scenario (**0% intensification**). All intensification levels resulted in higher numbers of calves and of surplus cows and heifers compared with the baseline scenario. Increases of 55.1, 55.5 and 56.3% in the number of calves, and of surplus cows and heifers were obtained for the 20% intensified system with no irrigation, and of 65.6, 66.5 and 66.7% for the same level of intensification with irrigation, respectively. Increases of 41.0, 49.9 and 42.6% in the number of calves, and of surplus cows and heifers were obtained for the 15% intensified system with no irrigation, and of 49.0, 50.2 and 49.9% in the same level of intensification with irrigation, respectively. Increases of 27.3, 27.8 and 28.4% in the number of calves, and of surplus cows and heifers were obtained in the 10% intensified system with no irrigation, and of 32.6, 33.1 and 33.3% in the same level of intensification with irrigation, respectively. Increases of 13.9, 14.1 and 14.2% in the number of calves and of surplus cows and heifers were obtained for the 5% intensified system with no irrigation, and of 16.2, 16.4 and 16.5% for the same level of intensification with irrigation, respectively (**Fig. 5 and 11**).

Production of metabolizable energy

Annual ME production of 12.2, 10.4 and 8.6 Tcal were calculated for the 0% intensified system in El Niño, Neutral and La Niña years, respectively. In the 20% intensified system with irrigation, ME production increased in 48.3% in El Niño, 71.1% in Neutral and 81.4% in La Niña years relative to the 0% intensified system (**Fig. 6**). Considering the 10-year horizon, ME production in the 20% intensified system increased in 65.3% when irrigation was applied (**Fig. 10**). Therefore, irrigation alone accounted for 10.2% of increase in ME production.

Productivity and biological efficiency

The association of intensification level with climatic event influenced annual productivity. The non-intensified system produced 66.3, 56.2 and 46.6 kg LW/ha/year, in El Niño, Neutral and La Niña years, respectively. When the system was 20% intensified with no irrigation, productivity increased in 44.6%, 62.0% and 59.5% in El Niño, Neutral, and La Niña years, respectively, while irrigation promoted further increases of 48.7, 73.1 and 82.7% in the same years compared with the 0% intensification level (**Fig. 8**).

In the 10-year horizon, the average productivity obtained for the non-intensified system was 57.3 kg LW/ha/year. Whereas 14.1% and 55.6% increases in productivity were calculated for the 5% and 20% levels with no

irrigation, respectively. With further improvement of 16.3 and 66.2% in these systems when irrigation was applied (**Fig. 9**).

Irrigation had no influence on the biological efficiency of intensified systems calculated for the 10-year horizon, which average value was calculated as 5.44 g LW/ Mcal of total ME (**Fig. 9**).

DISCUSSION

The results of the present study demonstrate that the proposed model is able to evaluate the influence of intensification of grazing systems on metabolizable energy production, carrying capacity, productivity and biological efficiency of beef cow-calf systems over a long-term horizon. Productivity was increased in 66.2% when 20% of the grazing area was intensified and irrigated compared with the modeled non-intensified system, independently of climatic events. Although other studies evaluating the intensification of beef cow-calf systems have been carried out (Ash et al., 2015; Monjardino et al., 2015), to the best of our knowledge, the present study is the first to propose a model to evaluate the biological impacts of the intensification such systems using the irrigation of sudangrass (C4 tropical species) in the summer and ryegrass associated with oat in the winter, taking into account the effects of ENSO phenomena during a 10-horizon.

The aim of the model was to evaluate how the influence of system intensification on herd productivity by changing herd size according to the number of dams per unit of area. In addition, this dynamic model allows modeling system intensification under different biological animal constraints, such as productive, reproductive and survival parameters, and management (e.g., times of management practices) over long-term horizons. The model represents a 1000-ha grazing system with different intensification scenarios and fits herd size allocation as a function of forage ME production at each intensification level and herd energy requirements.

Higher intensification levels resulted in higher annual forage biomass production, increasing pasture carrying capacity, as the intensification level is associated with the size of the intensified area, which increase the amount of ME produced by the system, and consequently, its carrying capacity. As a consequence of the higher number of dams allocated, the number of calves and of surplus cows and heifers is increased, determining higher productivity.

Our results show that beef cow-calf systems in the Brazilian pampa biome may generate an average productivity of 57.3 kg LW/ha/year over a 10-year horizon, considering ENSO events. However, the adoption of intensification processes, such as the irrigation of annual summer pastures and the establishment of winter pastures (with no irrigation), allows increasing herd productivity in 16.3, 33.0, 49.7 and 66.2% when 5, 10, 15 and 20% intensification levels are applied compared with a non-intensified system. The differences between the baseline (0% intensified) and the intensified scenarios with no irrigation are explained by the higher biomass production of sudangrass between January and April, and of ryegrass associated with oat between June and November. However, the irrigated intensification levels systems presented

higher carrying capacity. These results are explained by the fact that irrigation ensures higher ME production levels, which may be used to face critical feed allowance gaps (Heard et al., 2012; Schittenhelm and Schroetter 2014). Pasture irrigation prevents hydric stress effects on plants and minimizes production seasonality during the year (Jensen et al., 2010), resulting in stable ME production, and consequently, higher productivity (Monjardino et al., 2015). The model also demonstrated that productivity is determined by carrying capacity per area, and not by individual animal performance, because herd ME requirements remained constant among the different intensification scenarios. On the other hand, ME production is dynamic as it is influenced by climate, forage species, month of the year and proportion of area used for each type of pasture.

Our results showed that El Niño, Neutral and La Niña events resulted in higher, intermediate and lower biomass production and consequently ME production, respectively, regardless of irrigation. This may be explained by the fact that, during El Niño years, rainfall is higher than the climatological average and, in La Niña years, below the average, especially during the spring and early summer (Gelcer et al., 2013), which may affect interannual variability of pasture biomass production (Jacobbsen et al., 2003). Independently of climatic event, irrigation promoted higher ME production at all intensification levels; however, these differences were more pronounced in La Niña years and less marked in El Niño years. Therefore, La Niña has stronger influence on the system carrying capacity because periods of drought are more frequent during this climatic event. On the other hand, during El Niño years, this effect is attenuated due to the higher incidence of rainfall. In the 10-year horizon evaluated, the effect of irrigation on ME production was remained constant, with 6.6% higher ME production in the 20% intensification level with irrigation (174.6 Tcal) than with no irrigation (163.8 Tcal). Although irrigation may have a stronger effect on biomass production over the long-term horizon, these results are explained by the probability of occurrence of ENSO events in the studied region, of 50, 30 and 20% for Neutral, El Niño and La Niña events, respectively (Matzenauer et al., 2008; Gelcer et al. 2013).

Despite the lower probability of occurrence of La Niña event and the fact that irrigation was used only during one-third of the year, the effect of irrigation on ME production was still observed in the 10-year horizon. In the systems with 5, 10, 15 and 20% intensification levels, irrigation increased ME production in 0.9, 1.7, 2.4 and 2.9% in El Niño and 2.3, 4.0, 5.4 and 6.5% in Neutral years, respectively. However, the most pronounced differences were determined in La Niña years, of 4.8, 8.6, 11.4 and 14.0%, due to the occurrence of droughts and possibly contributed to the higher biomass production of irrigated intensified systems determined in the 10-year horizon (Ropelewski and Halpert, 1987; Cunha, 1999; Grimm et al., 2000; Haylock et al., 2006).

Montaño-Bermudez and Nielsen (1990) and Beretta et al. (2002) obtained biological efficiencies of 28.3 and 24.0 g LW/Mcal of ME, which are 81 and 77% higher than that obtained in the present study, which efficiency calculation was on the ME requirements of the entire herd. On the other hand, Montaño-Bermudez and Nielsen (1990) only considered ME maintenance requirements, whereas Beretta et al. (2002) evaluated the efficiency of a

breeding-to-finishing system. Studies have demonstrated that the biological efficiency of cow-calf systems is lower than that of breeding-to-finishing systems, which, in turn, is lower than that of finishing systems (Nasca et al., 2015). Therefore, our results may reflect what is expected to occur in cow-calf systems, and are in agreement with the efficiency values obtained by Calegare et al. (2009) and Zilverberg et al. (2011) mentioned in the section *Comparison of Model Results with Published Literature*.

According to SEAPI (2013), in the state of Rio Grande do Sul, irrigation may potentially be extended to beef cattle production areas. However, there are few studies on the influence of irrigation on the energy production, carrying capacity, productivity and biological efficiency of beef cattle production systems.

The results of the present study do not allow us to recommend the use of pasture irrigation to enhance the productivity of cow-calf systems. However, the evaluated model evidenced that the productivity of cow-calf systems is directly proportional to the number of dams the system is capable of carrying, when productive, reproductive and survival parameter values are maintained constant. Moreover, carrying capacity is directly proportional to the amount of energy produced by the system. Therefore, the proposed model may be used as a tool to understand the influence of intensification and climatic events on the energy production of cow-calf systems in order to apply intensification practices to enhance the carrying capacity and consequently, the productivity of such systems.

A possible limitation of the proposed model is its deterministic nature, because forage mass and daily accumulation rate per month of the year, within each pasture type and within climatic event, are modeled to be constant within each level of intensification. However, in biological terms, it would be more appropriate to assume biomass growth as a function of a probability based on the environmental conditions of a specific system. However, this limitation does not diminish the importance of our results, since the model represents the complexity that characterizes beef cow-calf systems and reflects what is expected to occur in biological systems.

CONCLUSIONS

The developed model allows to understand the productive response to different intensification levels of beef cow-calf systems. The main productive response was the increase in the number of dams in the herd, especially as a result of the use of irrigation. This study proposes different alternatives for increasing the productivity of beef cow-calf systems in southern Brazil. However, an economic analysis, considering the cycle of beef cattle prices, is required when evaluating the adoption of the proposed intensification processes.

Acknowledgements

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

LITERATURE CITED

- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., de Moraes, G., Leonardo, J., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22, 711-728.
- ANUALPEC/FNP, 2008. Anuário da Pecuária Brasileira (Yearbook of Brazilian Livestock). Instituto FNP, AGRA FNP Pesquisas Ltda, São Paulo, Brazil.
- Ash, A., Hunt, L., McDonald, C., Scanlan, J., Bell, L., Cowley, R., Watson, I., McIvor, J., MacLeod, N., 2015. Boosting the productivity and profitability of northern Australian beef enterprises: Exploring innovation options using simulation modelling and systems analysis. *Agricultural Systems* 139, 50-65.
- Beretta, V., Lobato, J.F.P., Mielitz Netto, C.G., 2002. Produtividade e eficiência biológica de sistemas de produção de gado de corte de ciclo completo no Rio Grande de Sul. *Revista Brasileira de Zootecnia* 31, 991-1001.
- Berlato, M.A., Fontana, D.C., 2003. El Niño e La Niña: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul: aplicações de previsões climáticas na agricultura. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul.
- Bertazzo, R.P., Freitas, R.T.F.d., Gonçalves, T.d.M., Pereira, I.G., Eler, J.P., Ferraz, J.B.S., Oliveira, A.I.G.d., Andrade, I.F.d., 2004. Parâmetros genéticos de longevidade e produtividade de fêmeas da raça Nelore. *Revista Brasileira de Zootecnia* 33, 1118-1127.
- Calegare, L., Alencar, M.M., Packer, I.U., Ferrell, C.L., Lanna, D.P.D., 2009. Cow/calf preweaning efficiency of Nelore and *Bos taurus* × *Bos indicus* crosses¹. *Journal of Animal Science* 87, 740-747.
- Cardoso, A.S., Berndt, A., Leytem, A., Alves, B.J.R., de Carvalho, I.d.N.O., de Barros Soares, L.H., Urquiaga, S., Boddey, R.M., 2016. Impact of the intensification of beef production in Brazil on greenhouse gas emissions and land use. *Agricultural Systems* 143, 86-96.
- Carvalho, P.C.F., Fischer, V., Santos, D.T., Ribeiro, A.M.L., Quadros, F.L.F., Castilhos, Z.M.S., Poli, C.H.E.C., Monteiro, A.L.G., Nabinger, C., Genro, T.C.M., 2006. Produção animal no bioma campos sulinos. *Braz. J. Anim. Sci.* 35, 156–202.
- Carvalho, P.C.F.; Maraschin, G.E.; Nabinger, C., 1998. Potencial produtivo do campo nativo do rio grande do sul. In: patiño, h.o. (ed.). *Suplementação de ruminantes em pastejo*, 1, anais, Porto Alegre-RS.
- Carvalho P.C.F., Wallau M.O., Bremm C., Bonnet O., Trindade J.K., da Rosa F.Q., de Freitas T.S., Moojen F.G., 2017. *Nativão: 30 anos de pesquisa em campo nativo*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia. Porto Alegre, Rio Grande do Sul.
- Ciccioli, N.H., Wettemann, R.P., Spicer, L.J., Lents, C.A., White, F.J., Keisler, D.H., 2003. Influence of body condition at calving and postpartum nutrition on endocrine function and reproductive performance of primiparous beef cows^{1,2}. *Journal of Animal Science* 81, 3107-3120.

- Cosentino, S.L., Mantineo, M., Testa, G., 2012. Water and nitrogen balance of sweet sorghum (*Sorghum bicolor moench* (L.)) cv. Keller under semi-arid conditions. *Industrial Crops and Products* 36, 329-342.
- Cotton, J., Burow, G., Acosta-Martinez, V., Moore-Kucera, J., 2013. Biomass and cellulosic ethanol production of forage sorghum under limited water conditions. *BioEnergy Research* 6, 711-718.
- CSIRO, 2007. Nutrient Requirements of Domesticated Ruminants. Primary Industries Standing Committee on Agriculture. CSIRO Publishing, Melbourne.
- Cunha, G., 1999. El Niño–Southern oscillation and climatic perspectives applied to crop management in the south of Brazil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 7, 277-284.
- Davis, M.E., Rutledge, J.J., Cundiff, L.V., Hauser, E.R., 1983. Life Cycle Efficiency of Beef Production: I. Cow Efficiency Ratios for Progeny Weaned3. *Journal of Animal Science* 57, 832-851.
- de Freitas, E.A.G., 1975. Produtividade de matéria seca, proteína digestível e nutrientes digestíveis totais em pastagem nativa do Rio Grande do Sul. Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia. Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Porto Alegre, Rio Grande do Sul.
- Diaz-Solis, H., Kothmann, M.M., Grant, W.E., De Luna-Villarreal, R., 2006. Use of irrigated pastures in semi-arid grazinglands: A dynamic model for stocking rate decisions. *Agricultural Systems* 88, 316-331.
- Dill, M.D., Pereira, G.R., Costa, J.B.G., Canellas, L.C., Peripolli, V., Neto, J.B., Sant'Anna, D.M., McManus, C., Barcellos, J.O.J., 2015. Technologies that affect the weaning rate in beef cattle production systems. *Tropical animal health and production* 47, 1255-1260.
- Ferrell, C.L., Jenkins, T.G., 1985. Cow Type and the Nutritional Environment: Nutritional Aspects. *Journal of Animal Science* 61, 725-741.
- Filho, S.D.C.V., Machado, P.A.S., Chizzotti, M.L., Amaral, H.F., Magalhães K.A., Júnior, V.R.R., Capelle, E.R., 2010. Tabelas brasileiras de composição de alimentos para bovinos, third ed. Viçosa, Minas Gerais.
- Freer, M., Moore, A.D., Donnelly, J.R., 2012. The GRAZPLAN animal biology model for sheep and cattle and the GrazFeed decision support tool¹. CSIRO Plant Industry Technical Paper. <http://www.grazplan.csiro.au/files/TechPaperMay12.pdf>
- Frizzo, A., Rocha, M.d., Restle, J., Freitas, M.R., Biscaíno, G., Pilau, A., 2003. Produção de forragem e retorno econômico da pastagem de aveia e azevém sob pastejo com bezerras de corte submetidas a níveis de suplementação energética. *Revista Brasileira de Zootecnia* 32, 632-642.
- Galyean, M.L., Cole, N.A., Tedeschi, L.O., Branine, M.E., 2016. BOARD-INVITED REVIEW: Efficiency of converting digestible energy to metabolizable energy and reevaluation of the California Net Energy System maintenance requirements and equations for predicting dietary net energy values for beef cattle¹. *Journal of Animal Science* 94, 1329-1341.
- Gelcer, E., Fraise, C., Dzotsi, K., Hu, Z., Mendes, R., Zotarelli, L., 2013. Effects of El Niño Southern Oscillation on the space–time variability of Agricultural

- Reference Index for Drought in midlatitudes. *Agricultural and Forest Meteorology* 174-175, 110-128.
- Grimm, A.M., Barros, V.R., Doyle, M.E., 2000. Climate Variability in Southern South America Associated with El Niño and La Niña Events. *Journal of Climate* 13, 35-58.
- Haylock, M.R., Peterson, T.C., Alves, L.M., Ambrizzi, T., Anunciação, Y.M.T., Baez, J., Barros, V.R., Berlato, M.A., Bidegain, M., Coronel, G., Corradi, V., Garcia, V.J., Grimm, A.M., Karoly, D., Marengo, J.A., Marino, M.B., Moncunill, D.F., Nechet, D., Quintana, J., Rebello, E., Rusticucci, M., Santos, J.L., Trebejo, I., Vincent, L.A., 2006. Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature. *Journal of Climate* 19, 1490-1512.
- Heard, J.W., Porker, M.J., Armstrong, D.P., Finger, L., Ho, C.K.M., Wales, W.J., Malcolm, B., 2012. The economics of subsurface drip irrigation on perennial pastures and fodder production in Australia. *Agricultural Water Management* 111, 68-78.
- Jacóbsen, L.O., Fontana, D.C., Shimabukuro, Y.E., 2003. Alterações na vegetação em macrozonas do Rio Grande do Sul associados a eventos El Niño e La Niña, usando imagens NOAA. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 11.
- Jahanzad, E., Jorat, M., Moghadam, H., Sadeghpour, A., Chaichi, M.R., Dashtaki, M., 2013. Response of a new and a commonly grown forage sorghum cultivar to limited irrigation and planting density. *Agricultural Water Management* 117, 62-69.
- Jensen, K.B., Waldron, B.L., Peel, M.D., Robins, J.G., 2010. Nutritive value of herbage of five semi-irrigated pasture species across an irrigation gradient. *Grass and Forage Science* 65, 92-101.
- Jones, J.W., Antle, J.M., Basso, B., Boote, K.J., Conant, R.T., Foster, I., Godfray, H.C.J., Herrero, M., Howitt, R.E., Janssen, S., Keating, B.A., Munoz-Carpena, R., Porter, C.H., Rosenzweig, C., Wheeler, T.R., 2017. Brief history of agricultural systems modeling. *Agricultural Systems* 155, 240-254.
- Kopp, J.C., Wittenberg, K.M., McCaughey, W.P., 2004. Management strategies to improve cow-calf productivity on meadow brome grass pastures. *Canadian Journal of Animal Science* 84, 529-535.
- Lamb, M.A., Tess, M.W., Robison, O.W., 1992. Evaluation of mating systems involving five breeds for integrated beef production systems: I. Cow-calf segment. *Journal of Animal Science* 70, 689-699.
- Li, Q.F., Rowntree, J.E., Utsumi, S.A., Xu, S., Carmichael, D.E., 2017. Case Study: Irrigation and stocking rate influences on northern Michigan beef cow-calf and forage production. *The Professional Animal Scientist* 33, 276-284.
- Macari, S., Rocha, M.G.d., Restle, J., Pilau, A., Freitas, F.K.d., Neves, F.P., 2006. Avaliação da mistura de cultivares de aveia preta (*Avena strigosa* Schreb) com azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) sob pastejo. *Ciência Rural* 36, 910-915.
- Matzenauer, R., Berlato, M., Sampaio, M.d.R., da Trindade, J., 2008. Effects of enos phenomenon over reference evapotranspiration in region of Planalto

- Médio of Rio Grande do Sul state, Brazil. *Pesquisa Agropecuaria Gaucha* 14, 67-70.
- Mazzetto, A.M., Feigl, B.J., Schils, R.L.M., Cerri, C.E.P., Cerri, C.C., 2015. Improved pasture and herd management to reduce greenhouse gas emissions from a Brazilian beef production system. *Livestock Science* 175, 101-112.
- Menegassi, S.R.O., Barcellos, J.O.J., Lampert, V.d.N., Borges, J.B.S., Peripolli, V., 2011. Bioeconomic impact of bull breeding soundness examination in cow-calf systems. *Revista Brasileira de Zootecnia* 40, 441-447.
- Modernel, P., Dogliotti, S., Alvarez, S., Corbeels, M., Picasso, V., Tiftonell, P., Rossing, W. A. H., 2018. Identification of beef production farms in the Pampas and Campos area that stand out in economic and environmental performance. *Ecological Indicators*, 89, 755-770.
- Monjardino, M., MacLeod, N., McKellar, L., Prestwidge, D., 2015. Economic evaluation of irrigated forage production in a beef cattle operation in the semi-arid tropics of northern Australia. *Agricultural Systems* 139, 122-143.
- Montaño-Bermudez, M., Nielsen, M.K., 1990. Biological efficiency to weaning and to slaughter of crossbred beef cattle with different genetic potential for milk. *Journal of Animal Science* 68, 2297-2309.
- Nasca, J.A., Feldkamp, C.R., Arroquy, J.I., Colombatto, D., 2015. Efficiency and stability in subtropical beef cattle grazing systems in the northwest of Argentina. *Agricultural Systems* 133, 85-96.
- National academies of sciences and medicine., 2016. Nutrient requirements of beef cattle, eighth revised edition. The national academies press, Washington, DC.
- NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration, 2014. Cold and warm episodes by seasons. http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml (accessed 21 July 2017).
- NRC - National Research Council., 1996. Nutrient requirements of beef cattle, seventh revised edition. Update 2000. The national academic press, Washington, DC.
- Oaigen, R.P., Barcellos, J.O.J., Christofari, L.F., Braccini Neto, J., Oliveira, T.E.d., Prates, Ê.R., 2008. Melhoria organizacional na produção de bezerros de corte a partir dos centros de custos. *Revista Brasileira de Zootecnia* 37, 580-587.
- Oaigen, R.P., Barcellos, J.O.J., Christofari, L.F., Braccini Neto, J., Oliveira, T.E.d., Prates, Ê.R., 2009. Análise da sensibilidade da metodologia dos centros de custos mediante a introdução de tecnologias em um sistema de produção de cria. *Revista Brasileira de Zootecnia* 38, 1155-1162.
- Oliveira, T.E.d., Freitas, D.S.d., Gianezini, M., Ruviaro, C.F., Zago, D., Mércio, T.Z., Dias, E.A., Lampert, V.d.N., Barcellos, J.O.J., 2017. Agricultural land use change in the Brazilian Pampa Biome: The reduction of natural grasslands. *Land Use Policy* 63, 394-400.
- Pang, H., Makarechian, M., Basarab, J.A., Berg, R.T., 1999. Structure of a dynamic simulation model for beef cattle production systems. *Canadian Journal of Animal Science* 79, 409-417.

- Pereira, C.H., Patino, H.O., Hoshide, A.K., Abreu, D.C., Alan Rotz, C., Nabinger, C., 2018. Grazing supplementation and crop diversification benefits for southern Brazil beef: A case study. *Agricultural Systems* 162, 1-9.
- Pereira, P.R.R.X., Hasenack, H., Pereira, G.R., Dewes, H., Canellas, L.C., Oliveira, T.E., Barcellos, J.O.J., 2018. Climate change and beef supply chain in Southern Brazil. *The Journal of Agricultural Science*, 1-8.
- Piazzetta, R.G., Dittrich, J.R., Alves, S.J., Moraes, A.d., Lustosa, S.B.C., Gazda, T.L., Melo, H.A., Monteiro, A.L.G., 2009. Características qualitativas da pastagem de aveia preta e azevém manejada sob diferentes alturas, obtida por simulação de pastejo. *Archives of Veterinary Science* 14, 43-48.
- Portugal, T.B. 2016. Estratégias de manejo de híbrido de sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor* (L.) Moench x *Sorghum sudanense* (Piper) Stapf) em pastoreio rotativo. Universidade Federal do Paraná. Dissertação de Mestrado em Ciências. Curitiba, Paraná.
- Pötter, L., Lobato, J.F.P., Mielitz Netto, C.G.A., 1998. Produtividade de um modelo de produção para novilhas de corte primíparas aos dois, três e quatro anos de idade. *Revista Brasileira de Zootecnia* 27, 613-619.
- Restle, J., Roso, C., Soares, A.B., 1999. Produção animal e retorno econômico em misturas de gramíneas anuais de estação fria. *Revista Brasileira de Zootecnia* 28, 235-243.
- Rocateli, A.C., Raper, R.L., Balkcom, K.S., Arriaga, F.J., Bransby, D.I., 2012. Biomass sorghum production and components under different irrigation/tillage systems for the southeastern U.S. *Industrial Crops and Products* 36, 589-598.
- Ropelewski, C.F., Halpert, M.S., 1987. Global and Regional Scale Precipitation Patterns Associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review* 115, 1606-1626.
- Roso, C., Restle, J., Soares, A.B., Alves Filho, D., Brondani, I.L., 1999. Produção e qualidade de forragem da mistura de gramíneas anuais de estação fria sob pastejo contínuo. *Revista Brasileira de Zootecnia* 28, 459-467.
- Rovira J., 1996. Manejo nutritivo de los rodeos de cría em pastoreo. In: Sur Hemisferio, editor. Montevideo.
- Ruviaro, C.F., de Léis, C.M., Lampert, V.d.N., Barcellos, J.O.J., Dewes, H., 2015. Carbon footprint in different beef production systems on a southern Brazilian farm: a case study. *Journal of Cleaner Production* 96, 435-443.
- Santos, D.T.d., Rocha, M.G.d., Genro, T.C.M., Quadros, F.L.F.d., Freitas, F.K.d., Roman, J., Neves, F.P., 2004. Suplementos energéticos para recria de novilhas de corte em pastagens anuais: análise econômica. *Revista Brasileira de Zootecnia* 33, 2359-2368.
- Santos, D.T., Neto, A.B., Moojen, F.G., Carvalho, P.C. F., 2017. Planejamento produtivo, Seção VI, in: Carvalho P.C.F., Wallau M.O., Bremm C., Bonnet O., Trindade J.K., da Rosa F.Q., de Freitas T.S., Moojen F.G. (Eds.). *Nativão: 30 anos de pesquisa em campo nativo*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, pp. 80-86.

- Schittenhelm, S., Schroetter, S., 2014. Comparison of Drought Tolerance of Maize, Sweet Sorghum and Sorghum-Sudangrass Hybrids. *Journal of Agronomy and Crop Science* 200, 46-53.
- SEAPI - Secretaria de Agricultura, Pecuária e Irrigação, 2013. Programa Estadual de Expansão da Agropecuária Irrigada "Mais água Mais Renda". Lei N° 14.244 de 27 de maio de 2013. <http://www.agricultura.rs.gov.br/mais-agua-mais-renda> (accessed 15 February 2018).
- Silveira, E.O., 2001. Produção e comportamento ingestivo de cordeiros em pastagem de azevém anual (*Lolium multiflorum* Lam.) manejada em diferentes alturas. Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado em Zootecnia. Porto Alegre, Rio Grande do Sul.
- Soares, A.B., Restle, J., Roso, C., Lupatini, G.C., Alves Filho, D.C., 2001. Dinâmica, qualidade, produção e custo de produção de forragem da mistura aveia preta e azevém anual adubada com diferentes fontes de nitrogênio. *Ciência Rural* 31, 117-122.
- Trindade, J.K., 2011. Comportamento e consumo de forragem de bovinos de corte em pastagem natural complexa. Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado em Agronomia. Porto Alegre, Rio Grande do Sul.
- Trindade, J.K.d., Neves, F.P., Pinto, C.E., Bremm, C., Mezzalira, J.C., Nadin, L.B., Genro, T.C., Gonda, H.L., Carvalho, P.C., 2016. Daily forage intake by cattle on natural grassland: Response to forage allowance and sward structure. *Rangeland ecology & management* 69, 59-67.
- Ul-Allah, S., Khan, A.A., Fricke, T., Buerkert, A., Wachendorf, M., 2014. Fertilizer and irrigation effects on forage protein and energy production under semi-arid conditions of Pakistan. *Field Crops Research* 159, 62-69.
- Vieira, A., Lobato, J.F.P., Corrêa, E.S., Torres Júnior, R.A.d.A., Costa, F.P., 2006. Desenvolvimento e desempenho reprodutivo de novilhas Nelore criadas a pasto nos cerrados do Centro-Oeste brasileiro. *Revista Brasileira de Zootecnia* 35, 186-192.
- Walmsley, B.J., Lee, S.J., Parnell, P.F., Pitchford, W.S., 2016. A review of factors influencing key biological components of maternal productivity in temperate beef cattle. *Animal Production Science* 58, 1-19.
- Walters, J.P., Archer, D.W., Sassenrath, G.F., Hendrickson, J.R., Hanson, J.D., Halloran, J.M., Vadas, P., Alarcon, V.J., 2016. Exploring agricultural production systems and their fundamental components with system dynamics modelling. *Ecological Modelling* 333, 51-65.
- Zamfir, M.C., Schitea, M., Zamfir, I., 2001. The variability study of some quantitative traits in sudan grass [*Sorghum sudanense* Piper (Staph.)]. *Romanian Agricultural Research* 1, 23-30.
- Zilverberg, C.J., Johnson, P., Weinheimer, J., Allen, V.G., 2011. Energy and carbon costs of selected cow-calf systems. *Rangeland ecology & management* 64, 573-584.

Figure 1. Geographic location of the Brazilian pampa biome.

Figure 2. Timeline of the main processes of the production cycle of beef cow-calf systems in the Southern Hemisphere.

Figure 3. Simplified general diagram of the proposed conceptual model for the intensification of beef cow-calf systems. Where *A* is the setting of intensification levels (intervention), *B* shows the relations among the energy production submodel variables and *C* the relations among the herd structure submodel variables.

Figure 4. Simplified diagram of the relations among the energy requirements submodel variables.

Figure 5. Effect of intensification level on carrying capacity in a 10-year horizon.

Figure 6. Annual metabolizable energy production and requirements as a function of intensification level and ENSO event.

Figure 7. Carrying capacity (number of dams) and number of heads produced annually, as a function of intensification level and ENSO event.

Figure 8. Annual productivity and biological efficiency according to intensification level and ENSO event.

Figure 9. Productivity and annual biological efficiency as a function of intensification level in a 10-year horizon.

Figure 10. Metabolizable energy production and requirements, as a function of intensification level in a 10-year horizon.

Figure 11. Carrying capacity (number of dams) and number of heads produced annually, as a function of intensification level calculated for a 10-year horizon.

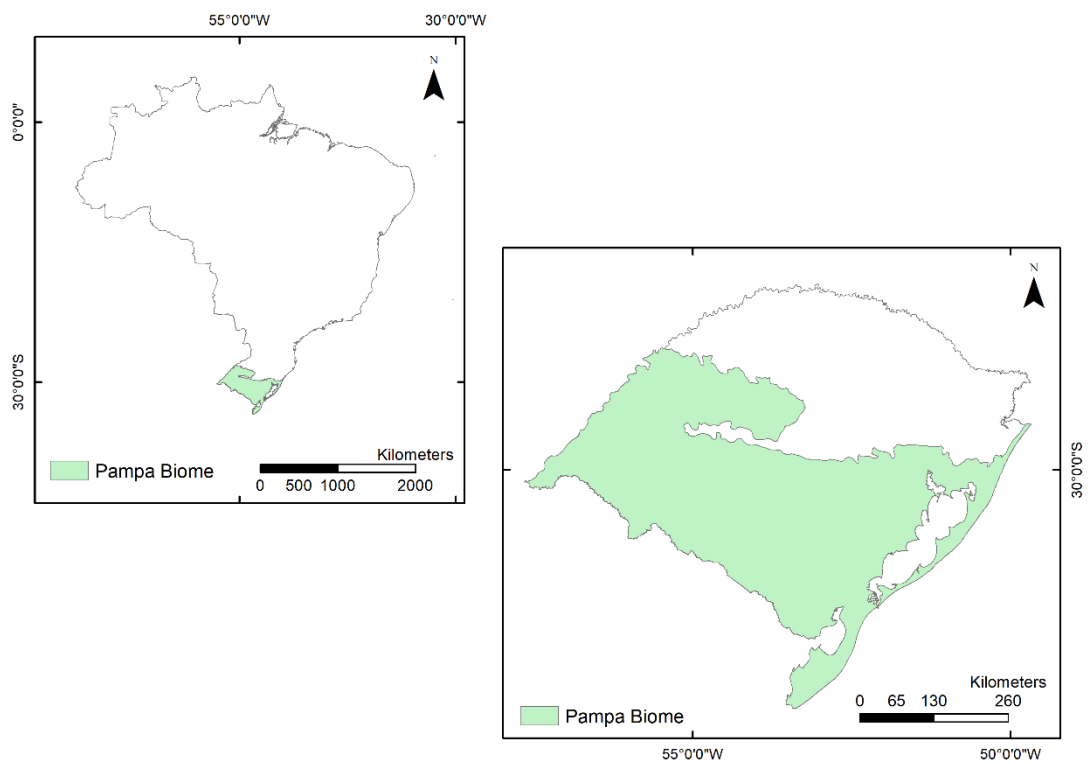


Figure 1. Geographic location of the Brazilian pampa biome.

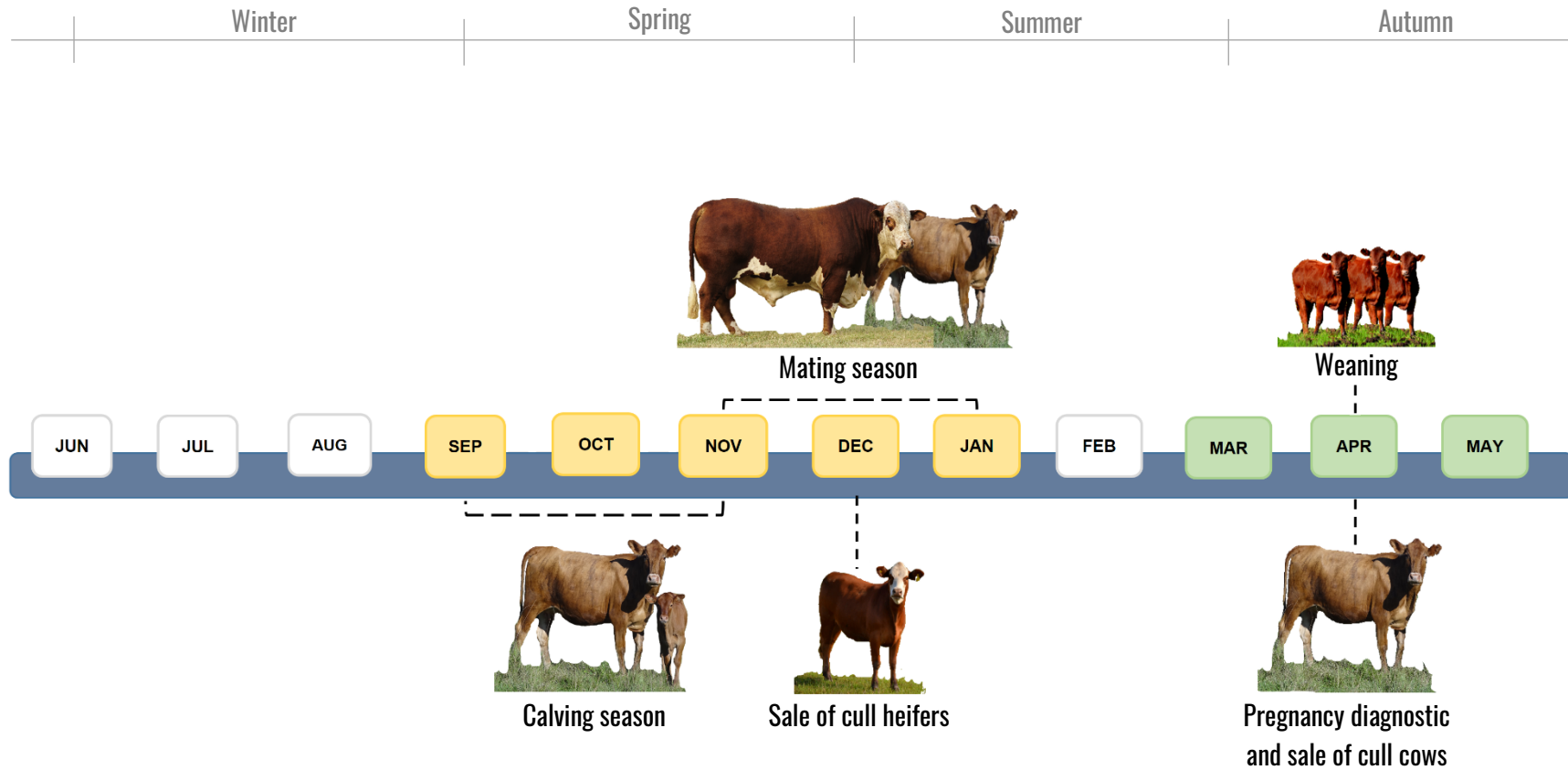


Figure 2. Timeline of the main processes of the production cycle of beef cow-calf systems in the Southern Hemisphere.

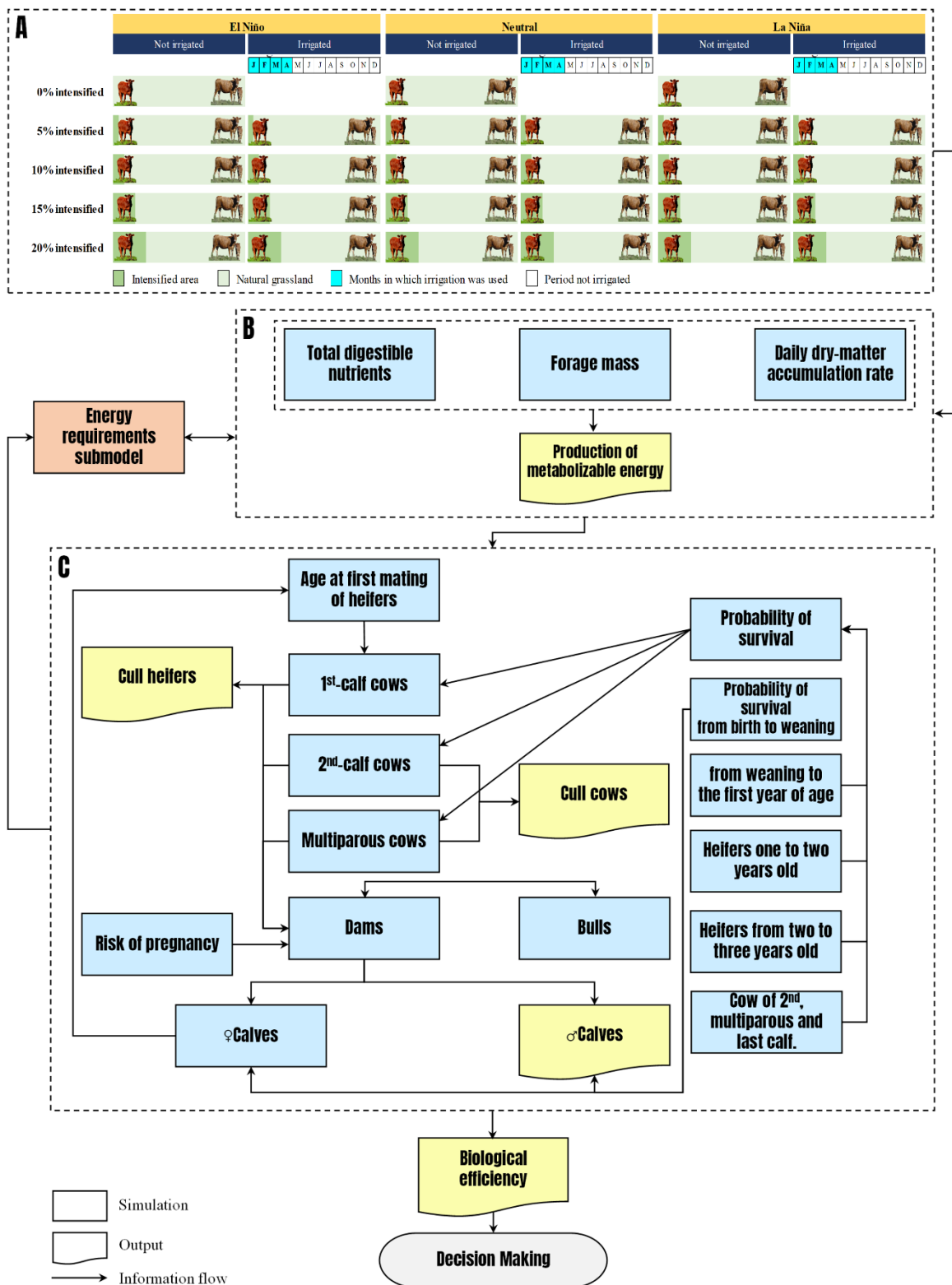


Figure 3. Simplified general diagram of the proposed conceptual model for the intensification of beef cow-calf systems. Where *A* is the setting of intensification levels (intervention), *B* shows the relations among the energy production submodel variables and *C* the relations among the herd structure submodel variables.

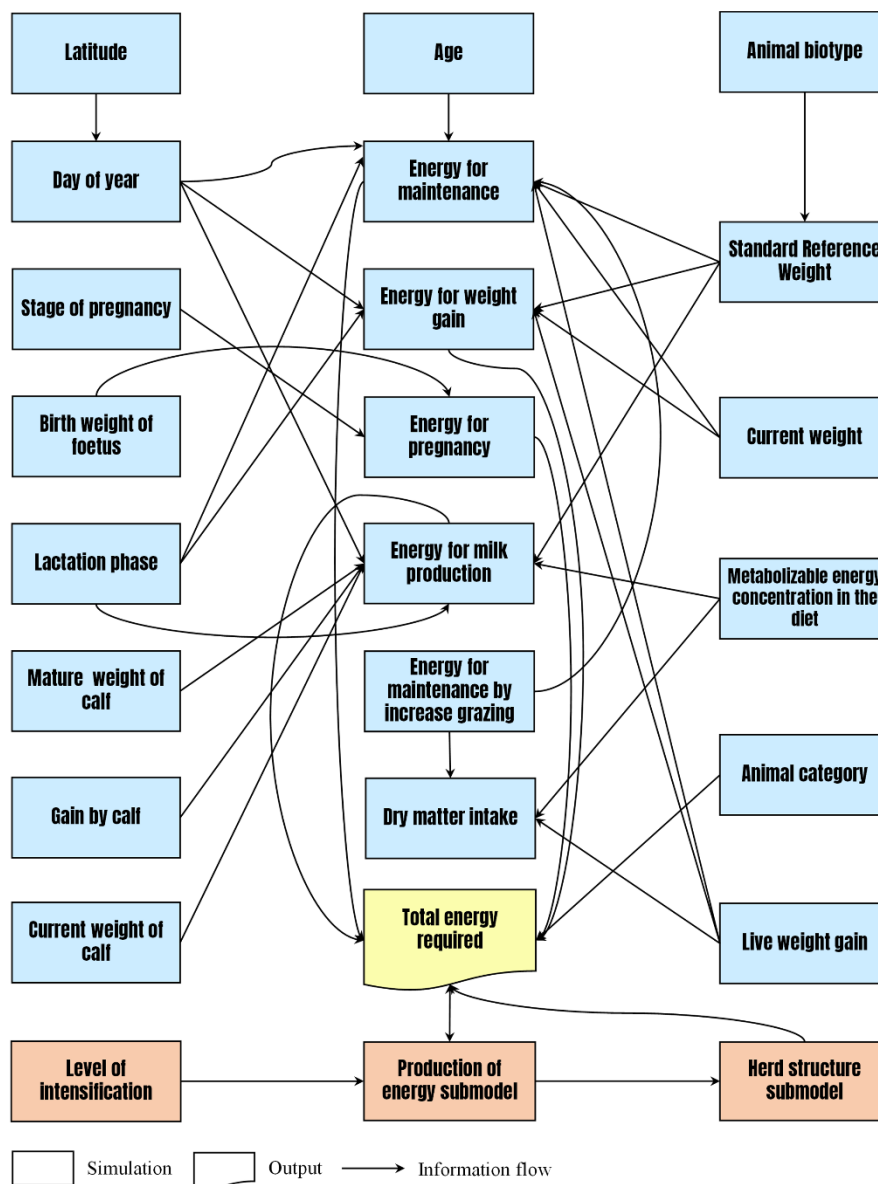
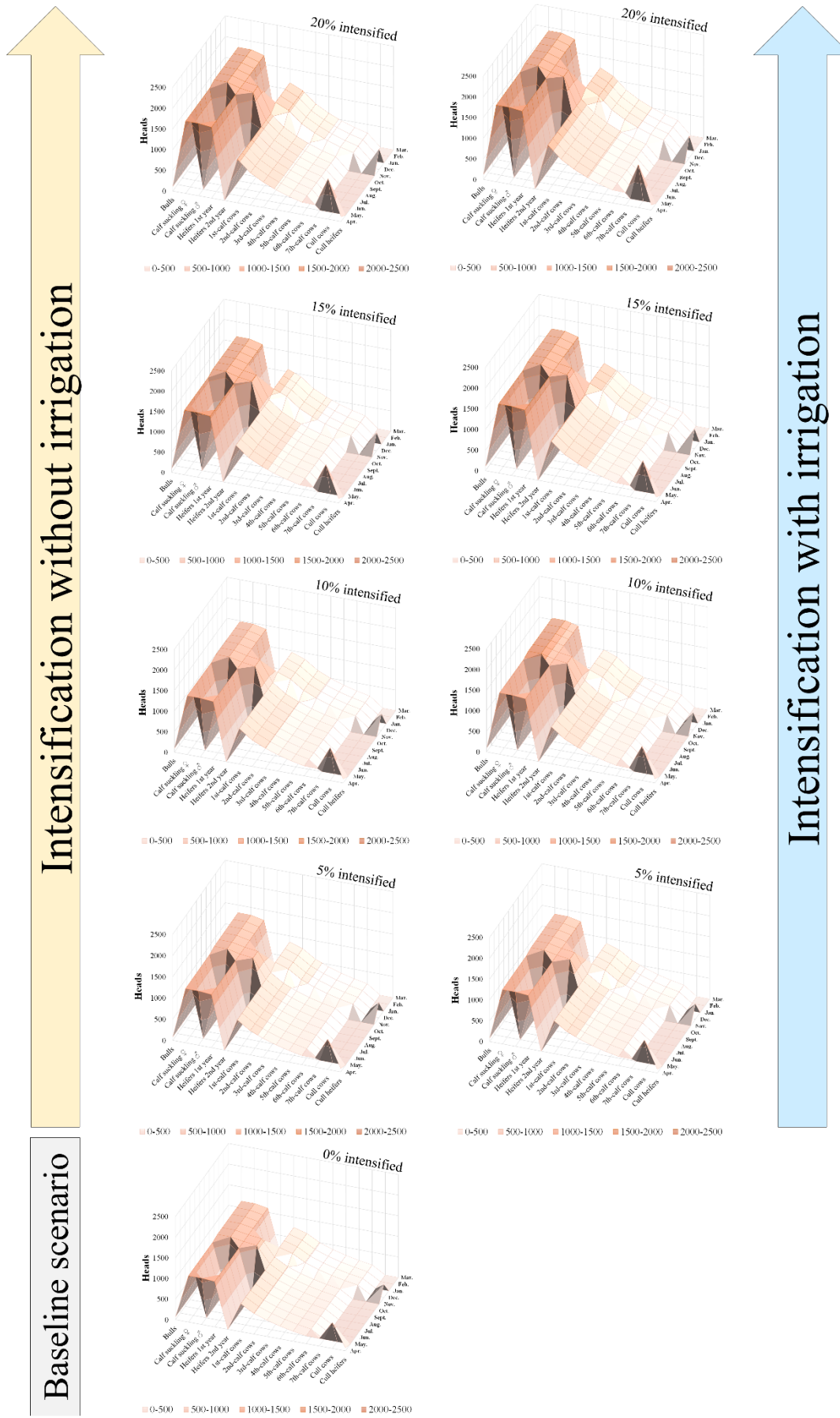


Figure 4. Simplified diagram of the relations among the energy requirements submodel variables.



Intensification without irrigation

Baseline scenario

Intensification with irrigation

Figure 5. Effect of intensification level on carrying capacity in a 10-year horizon.

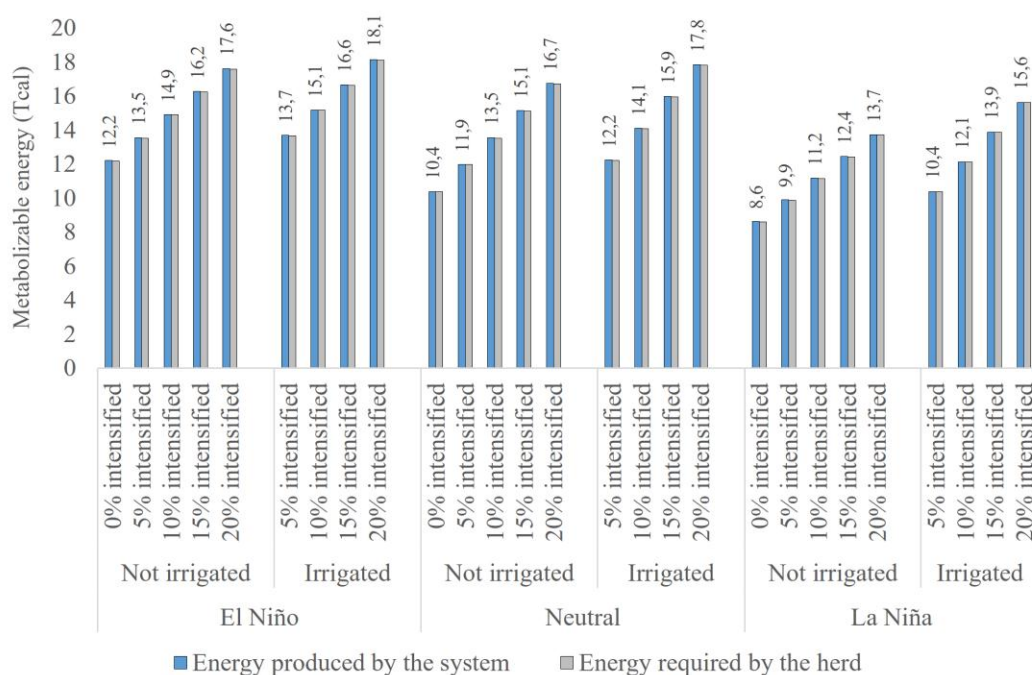


Figure 6. Annual metabolizable energy production and requirements as a function of intensification level and ENSO event.

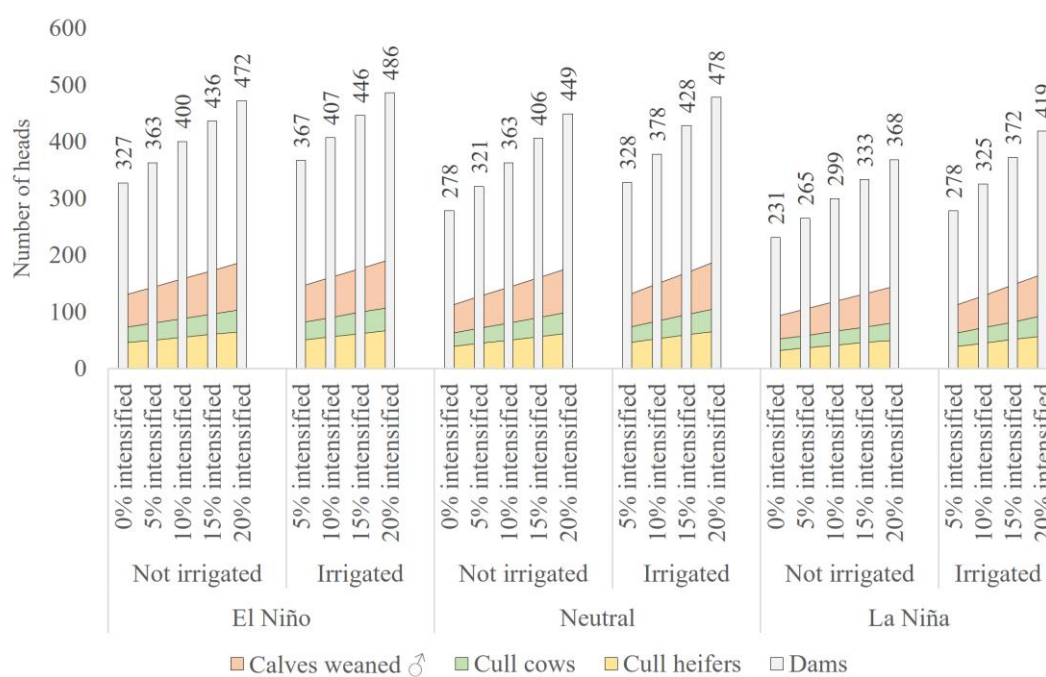


Figure 7. Carrying capacity (number of dams) and number of heads produced annually, as a function of intensification level and ENSO event.

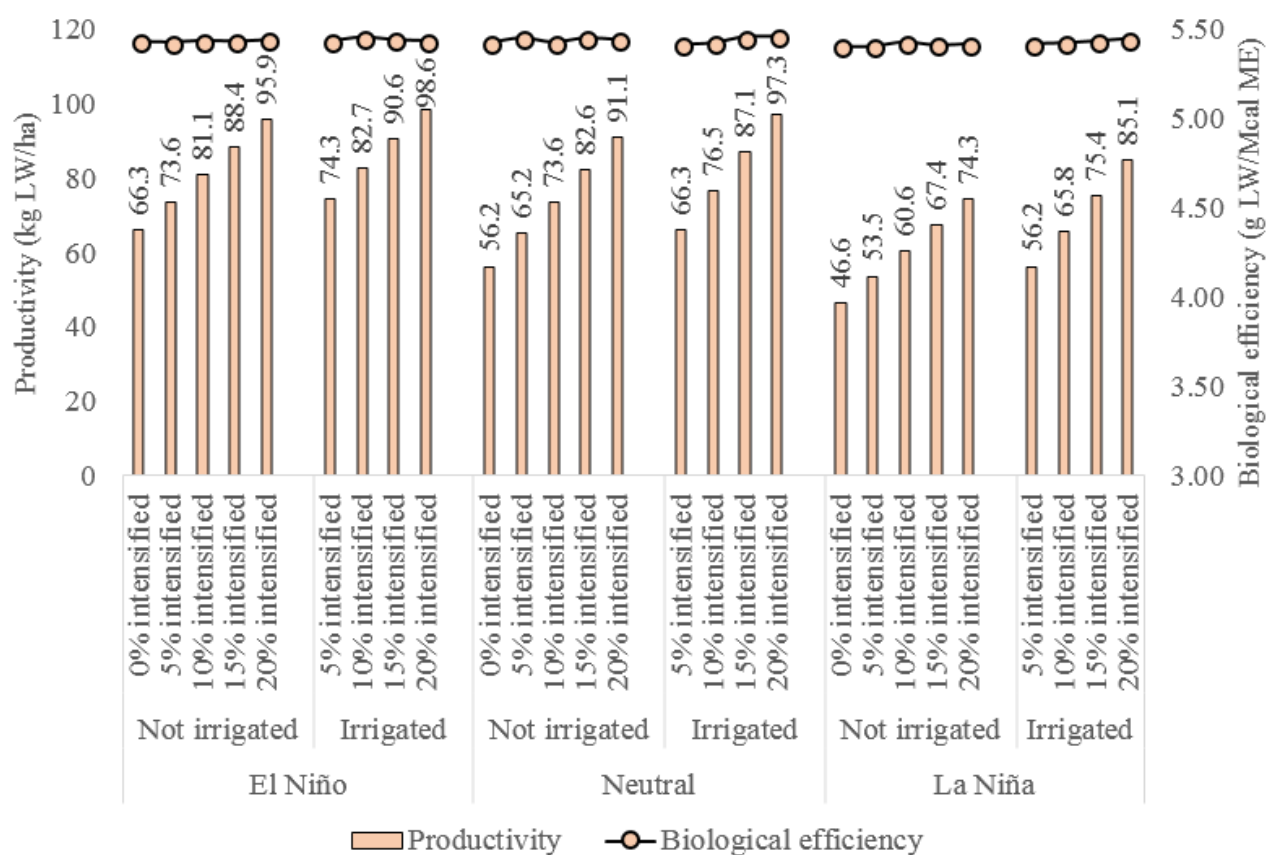


Figure 8. Annual productivity and biological efficiency as a function of intensification level and ENSO event.

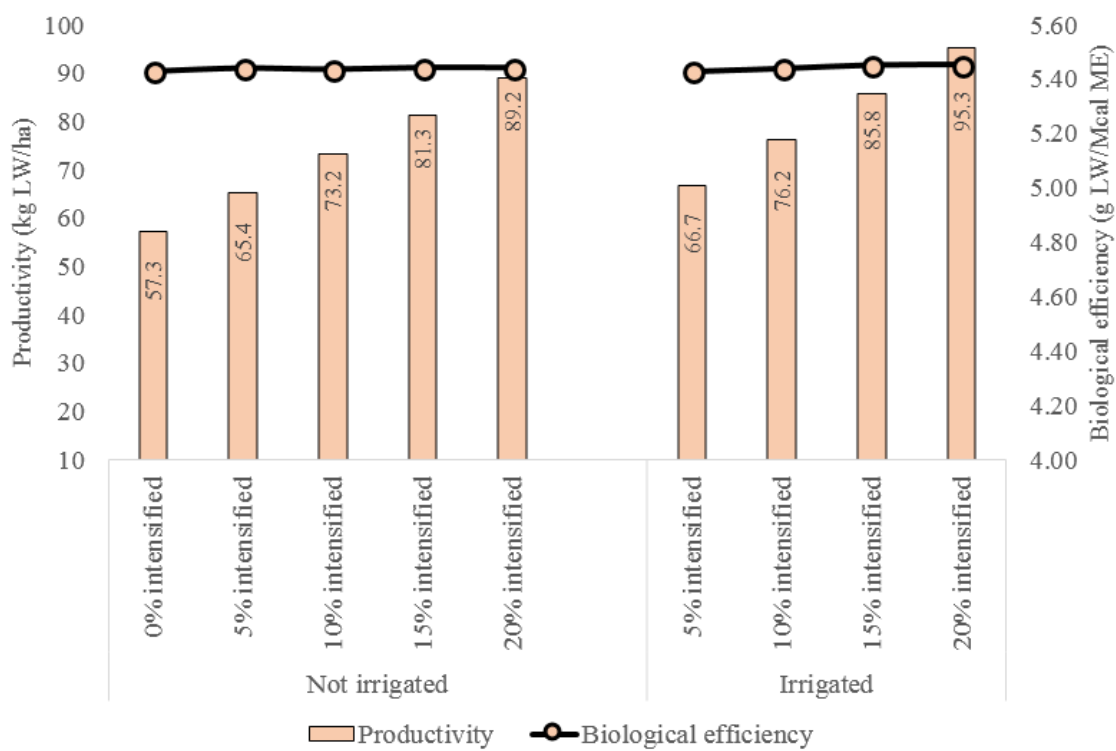


Figure 9. Productivity and annual biological efficiency as a function of intensification level in a 10-year horizon.

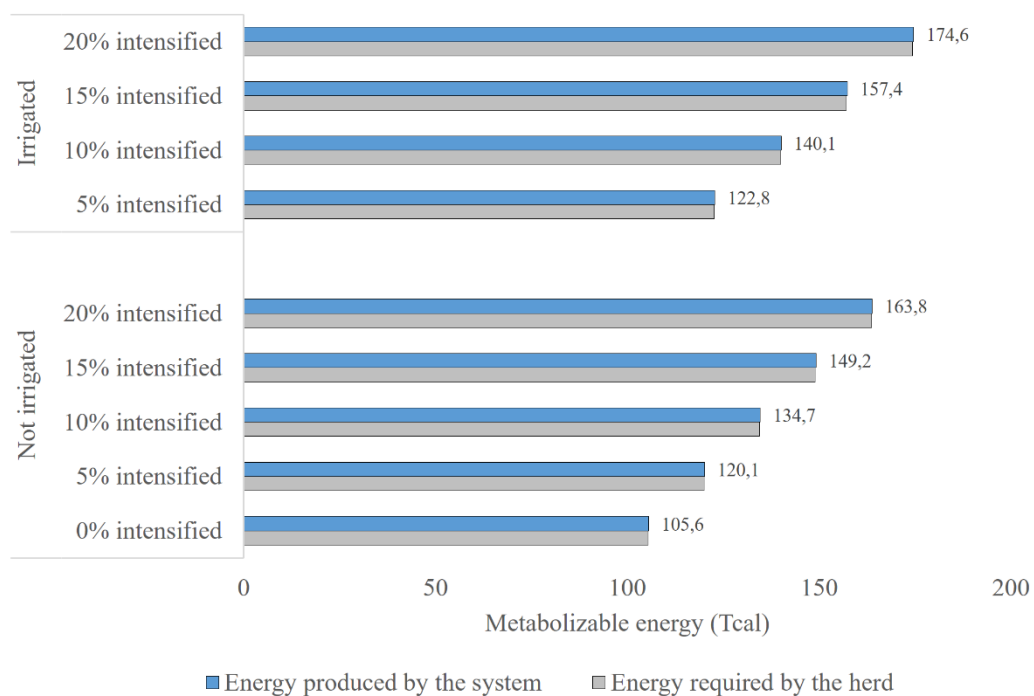


Figure 10. Metabolizable energy production and requirements, as a function of intensification level in a 10-year horizon.

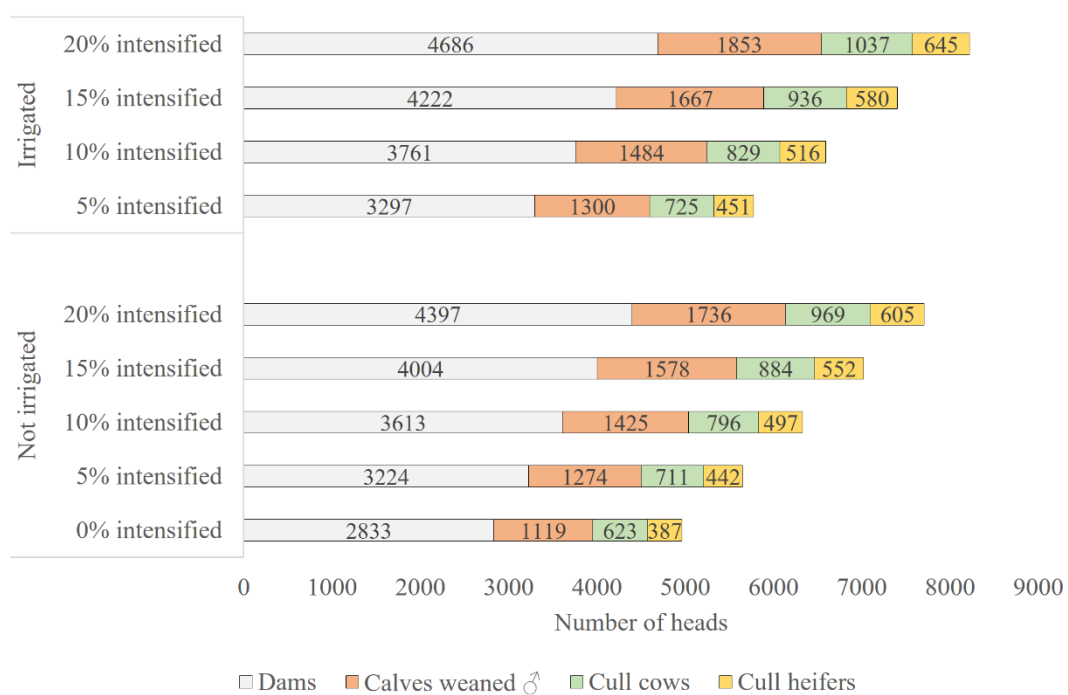


Figure 11. Carrying capacity (number of dams) and number of heads produced annually, as a function of intensification level calculated for a 10-year horizon.

Table 1. Parameters of the herd structure submodel

Parameter	Value/description	Unit	Reference
Stayability	8	Years	Bertazzo et al. (2004)
Age at first mating of heifers	27	Months	Dill et al. (2015)
Pregnancy risk of nulliparous dams (heifers)	90	%	Vieira et al. (2006)
Pregnancy risk of primiparous dams (1 st -calf cows)	76	%	Ciccioli et al. (2003)
Pregnancy risk of multiparous dams	80	%	Santos, (2004)
Probability of survival from birth to weaning	97	%	Dill et al. (2015)
Probability of survival from weaning to one year of age	98	%	Mazzetto et al. (2015)
Probability of survival of 1-yr-old heifers	97	%	Potter et al. (1998)
Probability of survival of primiparous cows	98	%	Mazzetto et al. (2015)
Annual probability of survival of 2 nd -calf, multiparous, and last-calf cows	98	%	Mazzetto et al. (2015)
Sire to cow ratio	2.5	%	Menegassi et al. (2011)
Calf weaning live weight	173	kg	Dill et al. (2015)
Culled cow body weight	405	kg	Potter et al. (1998)
Body weight of heifers culled in December ¹	305	kg	Cardoso et al. (2016)
Body weight of heifers culled in April ²	334	kg	Freer et al. (2012)
Average mating season	December		Oaigen et al. (2009)
Pregnancy diagnosis and calf weaning	April		Oaigen et al. (2008)
Average calving season	October		Oaigen et al. (2008)

¹ Month when heifer surplus after dam replacement in the herd is determined.

² Month when heifer surplus after pregnancy diagnosis is determined.

Table 2. Parameters of the energy requirements submodel

Parameter	Value/description	Unit	Reference
Cattle	<i>Bos taurus</i> , <i>Bos indicus</i> , and their crosses		
Animal classes	Weaning heifers, pregnant and lactating cows, suckling calves, mature dry cows and bulls		
Dietary metabolizable energy content		Mcal/kg DM	
Day of year	0 to 365	days	
Latitude	-35	° (- in S)	
Standard reference live weight	450	kg	ANUALPEC/FNP (2008)
Calf current live weight		kg	
Live weight gain		g/d	
Age		days	
Lactation phase		days	
Stage of pregnancy		days	
Calf birth weight	30	kg	ANUALPEC/FNP (2008)
Calf mature body weight	450	kg	ANUALPEC/FNP (2008)
Calf weight gain	725	g/d	Cardoso et al. (2016)
Calf current body weight		kg	
Proportion of calf ME requirements supplied by the dam's milk	100	%	Freer et al. (2012)
Increased cow ME maintenance requirements energy for grazing	15	%	Freer et al. (2012)

Energy requirements submodel adapted from Freer et al. (2012).

Table 3. Values of the parameters of the energy production submodel.

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Units	Reference
Natural Grassland														
El Niño														
Daily dry-matter accumulation rate	18.2	22.5	18.3	8.4	12.9	8.3	9.3	7.5	11.9	23	19.4	21	kg DM/ha/d	[1]
Forage mass	1413.5	1456.1	1657.6	1657	1565.9	1463.2	1412	1319.9	1376.8	1471.3	1588.4	1551.1	kg DM/ha	[1]
Total digestible nutrients	53.5	53.5	53.5	53.5	56.5	56.5	56.5	56.5	56.5	54.1	54.1	54.1	%	[2]
Neutral														
Daily dry-matter accumulation rate	9.9	12.3	15.2	16	9.7	12.8	12.4	7.2	7.1	14.3	14.3	13.1	kg DM/ha/d	[1]
Forage mass	1094.1	1189.7	1365.5	1271	1438.7	1294.5	1268.5	1204.6	1279.8	1303.2	1340.3	1438.9	kg DM/ha	[1]
Total digestible nutrients	53.5	53.5	53.5	53.5	56.5	56.5	56.5	56.5	56.5	54.1	54.1	54.1	%	[2]
La Niña														
Daily dry-matter accumulation rate	5.9	10.3	11.4	10.1	5.2	6.5	10	7.2	6.7	8	7.7	9.2	kg DM/ha/d	[1]
Forage mass	928.6	1030.3	1034.9	1151.8	1192.5	1239.8	1220.3	1165	1198	1178.3	1127.8	1050.8	kg DM/ha	[1]
Total digestible nutrients	53.5	53.5	53.5	53.5	56.5	56.5	56.5	56.5	56.5	54.1	54.1	54.1	%	[2]
Sorghum-sudangrass hybrids														
Irrigated														
Daily dry-matter accumulation rate	243.9	208.1	98.8	44.6									kg DM/ha/d	[3]
Total digestible nutrients	59.5	57.6	58.8	57.9									%	[4]
El Niño														
Daily dry-matter accumulation rate	217	185.2	87.9	39.7									kg DM/ha/d	[5]
Total digestible nutrients	59.5	57.6	58.8	57.9									%	[4]
Neutral														
Daily dry-matter accumulation rate	220.8	143.6	57.6	33.3									kg DM/ha/d	[3;5]
Total digestible nutrients	59.5	57.6	58.8	57.9									%	[4]
La Niña														
Daily dry-matter accumulation rate	154.7	124.1	54.8	17.8									kg DM/ha/d	[3;5]
Total digestible nutrients	59.5	57.6	58.8	57.9									%	[4]
Ryegrass sowed with oat														
El Niño														
Daily dry-matter accumulation rate						40.1	30.2	44.4	40	41	42.3		kg DM/ha/d	[6;7]
Forage mass						1000.2	1042.8	1068.8	1150.7	1233.8	1224.6		kg DM/ha	[6;7]
Total digestible nutrients						60.7	60.2	60.5	58.6	55.7	44.8		%	[8;9]
Neutral														
Daily dry-matter accumulation rate						48.2	50.4	52.8	45.8	50.7	52.4		kg DM/ha/d	[8;10]
Forage mass						1132.1	1455.5	1345.7	1693	1816.4	1803		kg DM/ha	[8;10]
Total digestible nutrients						60.7	60.2	60.5	58.6	55.7	44.8		%	[8;9]
La Niña														
Daily dry-matter accumulation rate						22.9	56.8	45.5	49.9	53.8	55.5		kg DM/ha/d	[11]
Forage mass						1000.2	1042.8	1068.8	1150.7	1233.8	1224.6		kg DM/ha	[11]
Total digestible nutrients						60.7	60.2	60.5	58.6	55.7	44.8		%	[8;9]

[1] = Carvalho et al. (2017); [2] = de Freitas (1975); [3] = Schittenhelm and Schroetter (2014); [4] = Filho et al. (2010); [5] = Zamfir et al. (2001); [6] = Soares et al. (2001); [7] = Macari et al. (2006); [8] = Roso et al. (1999); [9] = Piazzetta et al. (2009); [10] = Restle et al. (1999); [11] = Frizzo et al. (2003).

Table 4. Parameters of the pasture energy production submodel

Parameter	Value/description	Unit	Reference
Climatic event	El Niño, Neutral, La Niña		
Pasture type	Natural pasture, ryegrass with oat, sudangrass		
Time of the year	Month		
Daily dry-matter accumulation rate		kg DM/ha/d	
Forage mass		kg DM/haa	
Total digestible nutrients		%	
Natural pasture utilization factor	26	%	Trindade, (2011)
Ryegrass with oat utilization factor	65	%	Silveira, (2001)
Sudangrass utilization factor	61	%	Portugal, (2016)
Actual forage allowance	12	% LW	Trindade et al. (2016)

CAPÍTULO III ¹

¹ Este manuscrito será submetido na revista Agricultural Systems.

6. Intensificação da cria de bovinos de corte: Quais são as respostas bioeconômicas em um contexto de mudança climática e incerteza do preço de mercado?

Fredy Andrey L. Gonzalez^{a,*}, Amir G. Sessim^a, Júlio Otávio J. Barcellos^a

^a Departamento de Zootecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS 91540-000, Brazil

RESUMO

o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da intensificação em um sistema de cria, utilizando níveis de produção de energia, sobre parâmetros bioeconômico. Isto associado aos impactos do El Niño Oscilação Sul (ENSO) e à incerteza dos preços do mercado, em um horizonte de 10 anos. A avaliação foi realizada por meio do desenvolvimento de um modelo de simulação constituído por quatro submodelos: estrutura de rebanho, exigência de energia dos animais, produção de energia do sistema e submodelo econômico. No horizonte de 10 anos a produtividade média dos cenários intensificados com irrigação (81 kg PV/ha/ano) foi 41 e 5% superior ao cenário base (BS) e aos cenários intensificados sem irrigação, respectivamente. Estas mesmas diferenças percentuais foram observadas também na receita. No entanto, o custo operacional efetivo (COE) médio dos cenários intensificados com e sem irrigação foi superior comparado ao BS (US\$ 38/ha/ano). Isto resultou em uma eficiência econômica média 51 e 53% inferior nos cenários intensificados com e sem irrigação, respectivamente, em relação ao BS (151 kg PV/US\$ 100/ha/ano). Consequentemente a margem operacional efetiva (MOE) foi negativa para os cenários intensificados com (US\$ -7/ha/ano) e sem irrigação (US\$ -11/ha/ano), enquanto que o BS gerou um saldo positivo na sua MOE (US\$ 41/ha/ano). O modelo desenvolvido permitiu entender o processo de como ocorre a resposta bioeconômica decorrente dos níveis de intensificação nos sistemas de cria de bovinos de corte. A intensificação na cria tem consideráveis impactos biofísicos, especialmente na produtividade. Não obstante, com os valores dos parâmetros usados nesta análise, esses impactos não conseguem amortecer o custo total de produção, mostrando ineficiência econômica nos cenários avaliados. Apesar disso, a tecnologia de irrigação se mostra como minimizadora do risco econômico frente às mudanças climáticas, ainda que não seja capaz de neutralizar o prejuízo.

Palavras chave: custo operacional efetivo; eficiência econômica; El Niño Oscilação Sul; produtividade; risco.

INTRODUÇÃO

Dentro do ciclo produtivo da bovinocultura de corte, a cria é fase de menor eficiência biológica (Nasca et al., 2015). Isto está fundamentado em que do total de energia metabolizável (**ME**) requerida anualmente, aproximadamente 70 a 75% é usada para atender as necessidades das funções de manutenção da vaca (Ferrell and Jenkins, 1985). Apesar disso, existe uma crescente necessidade de aumentar produtividade dos sistemas de cria de bovinos de corte dada à crescente demanda mundial por carne (De Oliveira Silva et al. 2016), associada à concorrência das lavouras pelo uso da terra (Oliveira et al., 2017) e à necessidade de melhorar o resultado econômico do pecuarista (Ash et al., 2015).

O aumento da produtividade pode acontecer por duas vias de intensificação, pelo incremento da produtividade por animal ou por unidade de área (Mott, 1960; Monjardino et al., 2015). Nesta última, uma das formas é mantendo mais estável a produção de forragens, favorecendo variedades de elevado potencial de crescimento (e.g., capim sudão; *Sorghum bicolor* (L.) Moench x *Sorghum sudanense* (Piper) Stapf), sendo isto possível através do uso da irrigação de pastagens (Cosentino et al., 2012; Cotton et al., 2013 e Jahanzad et al., 2013). A irrigação também é uma estratégia que pode ajudar a mitigar os efeitos dos fenômenos climáticos como *El Niño-Southern oscillation* (**ENSO**). No entanto, a intensificação pode ter algumas desvantagens, frequentemente associadas a um maior consumo de insumos, como fertilizantes, ração concentrada, combustível e investimento em equipamentos ou maquinário. Portanto, acima de um certo nível de intensificação, questiona-se o potencial de mitigação das mudanças climáticas de aumento de produtividade por animal ou por unidade de área (Casey and Holden, 2006; Veysset et al., 2010; Gerber et al., 2011).

Devido a essa conjuntura, é necessário que os processos de intensificação integrem componentes biológicos e econômicos dos sistemas de produção (Kragt et al., 2016), a fim de realizar adequadas avaliações dentro de um contexto bioeconômico (Flichman et al., 2011). Os modelos bioeconômicos na produção animal podem ajudar aos tomadores de decisão e os pesquisadores a analisarem os trade-offs entre as inúmeras possibilidades e direcionar a futura produção para uma maior sustentabilidade (Mosnier et al., 2017). Contudo, a maioria das avaliações bioeconômicas não consideram a variabilidade dos preços do mercado em relação ao produto que gera o sistema, o que não permitiria predizer o futuro, embora as probabilidades de eventos futuros deveriam estar incorporadas no processo de decisão (Behrendt et al., 2013). Combinando níveis de intensificação da produção de ME, associado a eventos climáticos, com uma avaliação de risco sobre uma esperada variabilidade nos preços do produto gerado, pode produzir informações valiosas para a tomada de decisão nos sistemas de cria de bovinos de corte.

Alguns modelos bioeconômicos têm sido desenvolvidos para avaliar sistemas de cria de bovinos de corte (Berger et al., 2017; Baber et al., 2016; Monjardino et al., 2015; Villalba et al., 2010; Mosnier et al., 2009). No entanto, nenhum dos modelos disponíveis tem avaliado respostas bioeconômicas

decorrentes do aumento da entrada de energia no sistema, considerando os impactos do ENSO em um horizonte de longo prazo. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da intensificação em um sistema de cria, utilizando níveis de produção de energia, sobre parâmetros bioeconômicos associados à incerteza dos preços do mercado do bezerro, da vaca e da novilha de descarte, em um horizonte de 10 anos.

MATERIAL E MÉTODOS

Visão geral do modelo

O modelo desenvolvido é representativo dos sistemas de produção de cria de bovinos de corte da região sul do Brasil (**Fig. 1 e 2**). O rebanho está constituído principalmente por raças britânicas (Hereford e Angus) e seus cruzamentos com *Bos indicus* (Braford e Brangus). O clima desta região é subtropical úmido (Alvares et al., 2013) com uma precipitação média anual de 1440 mm durante o ano. No entanto, as chuvas não são bem distribuídas durante o ano. Durante o verão, a evapotranspiração é alta e muitas vezes maior que a precipitação, resultando em balanço hídrico negativo e consequentemente afetando a produção de forragem (Berlato and Fontana, 2003; Gelcer et al., 2013).

A unidade básica de medida do tempo foi configurada para um dia em razão das exigências diárias de energia metabolizável dos animais e ao crescimento diário das pastagens. O modelo está constituído por quatro submodelos: estrutura de rebanho, exigência de energia dos animais, produção de energia do sistema e submodelo econômico (**Fig. 3**) Esses submodelos estão relacionados por meio de fluxos de informações, estoques, conversores e conectores. O modelo pode arbitrar valores iniciais inteiros e não inteiros. Não obstante, os valores das saídas não inteiros são resolvidos por truncamento, gerando valores inteiros, por exemplo, no caso do número de animais de cada categoria no rebanho.

O sistema base de produção (**BS**) foi definido com a utilização de 100% de campo natural. A partir deste, o modelo permite avaliar a intensificação por meio do uso de áreas com ou sem irrigação do capim sudão (*Sorghum bicolor* (L.) Moench x *Sorghum sudanense* (Piper) Stapf) durante o verão, associado à utilização de azevém (*Lolium multiflorum* Lam) em consórcio com aveia (*Avena strigosa* Schreb) durante o inverno, sem irrigação. Além disso, o modelo avalia o efeito do nível de intensificação em uma linha temporal, aqui denominada de horizonte de 10 anos. Neste período foi possível capturar os efeitos de diversos ciclos produtivos considerando os impactos do ENSO, sendo que em anos de El Niño a precipitação pluvial foi definida como acima da média climatológica, em La Niña abaixo da média e em Neutro como a média (Gelcer et al., 2013).

Nível de intensificação

A área total do sistema de produção foi definida em 1000 hectares (ha) como representativa dos sistemas de cria na região do estudo. Para avaliar os efeitos da intensificação foram simulados diferentes cenários, os quais representam níveis de intensificação determinados pela proporção de área utilizada durante o verão e inverno com pastagens cultivadas e pela utilização

ou não da irrigação apenas no período de verão. A proporção de área intensificada foi modelada para ser igual tanto no verão, quanto no inverno em cada nível de intensificação. (**Tabela 1; Fig. 3A**).

Submodelo estrutura de rebanho

A estrutura de rebanho foi modelada para funcionar baseada em indicadores reprodutivos e de sobrevivência, associados aos manejos usualmente praticados nos sistemas de cria no sul do Brasil (**Tabela 2**). Os valores destes parâmetros foram mantidos constantes entre os níveis de intensificação e os fenômenos ENSO, ou seja, o submodelo estrutura de rebanho foi definido para não ocorrerem mudanças no desempenho individual dos animais entre os cenários. Assim, o que varia entre cada nível de intensificação é a capacidade de suporte do rebanho devido às alterações na quantidade de energia metabolizável produzida em cada nível de intensificação (Ruviaro et al., 2015). Para satisfazer este pressuposto é oferecida a quantidade exigida de energia metabolizável por parte dos animais, possibilitando atingir os parâmetros de desempenho produtivo, reprodutivo e de sobrevivência.

Este submodelo considera todas as categorias animais presentes em um rebanho e para sua evolução foram definidos alguns pressupostos. A idade ao primeiro acasalamento das novilhas ocorre em média aos 27 meses e a stayability das vacas é de 8 anos. Para os propósitos deste modelo, o acasalamento, por monta natural, foi definido para ocorrer em média em dezembro, a parição em meados de outubro e o diagnóstico de gestação e a desmama em abril. Por ocasião destes manejos, o modelo foi configurado para contabilizar o excedente de vacas no mês abril. O excedente de novilhas é contabilizado em dezembro e abril, momento em que se realiza a seleção das novilhas para o acasalamento e o diagnóstico de gestação, respectivamente.

A estrutura de rebanho foi modelada para ter uma configuração das categorias animais, de acordo com a quantidade de matrizes que cada nível de intensificação pode suportar, associado aos parâmetros do rebanho (**Tabela 2**). Desse modo, o número de matrizes suportadas anualmente no BS foi de 231, 278 e 327 em La Niña, Neutro e El Niño, respectivamente. A partir desse cenário base foi realizada a intervenção na produção de energia, esta por sua vez define a capacidade de suporte do rebanho conforme o nível de intensificação e as exigências, na quantidade de energia metabolizável por parte dos animais.

Submodelo exigência de energia

Este submodelo foi adaptado de Freer et al. (2012), permitindo calcular a quantidade de ME (Mcal/dia) que seria requerida por um tipo específico de animal com uma dieta específica, a fim de atingir um alvo específico de crescimento, gestação, lactação, ou o conjunto destas etapas fisiológicas acontecendo de forma paralela, de acordo com as recomendações da CSIRO, (2007).

O crescimento das novilhas e a evolução do peso das vacas ao longo da sua vida produtiva foi modelado conforme as recomendações de Rovira,

(1996), buscando atingir indicadores reprodutivos satisfatórios (**Tabela 2**) de acordo com parâmetros dinâmicos do estado fisiológico de cada categoria animal. Estes parâmetros de entrada, associados ao peso dos bezerros à desmama, ao peso das vacas de descarte, novilhas de descarte e à concentração de ME na forragem, possibilitam determinar as exigências energéticas de cada animal em qualquer momento da sua vida produtiva. Esta foi a principal adaptação deste submodelo, o que o torna dinâmico e funcional para a proposta de avaliação.

Submodelo produção de energia

A produção de ME foi a variável finalística para calcular a capacidade de suporte do rebanho em cada nível de intensificação. Essa produção se dá pela relação das variáveis, nutrientes digestíveis totais (TDN), a massa de forragem e a taxa diária de acúmulo de matéria seca. No entanto, variáveis como o tipo de pastagem, o mês do ano e o evento climático, que pode ser El Niño, Neutro ou La Niña, também são determinantes para predizer a produção de ME. Assim, o modelo simula de forma realística a variabilidade mensal da produção de ME, contabilizando anualmente a produção e as exigências de ME pelos animais. Desse modo, o modelo realiza um ajuste, otimizando o tamanho do rebanho sob o pressuposto que nos meses em que há excedente de alimento, este será armazenado para ser oferecido na forma de feno nos meses deficitários.

Todos os cenários foram arbitrados para quantificar a produção total de energia metabolizável, sem alocação de categorias específicas nas áreas intensificadas. Os valores para parametrizar esse submodelo foram obtidos a partir de um banco de dados sobre o campo natural que representa a região de estudo (Carvalho et al., 2017). Foram utilizados somente os valores da massa de forragem e da taxa diária de acúmulo de matéria seca que estavam dentro do intervalo de dois desvios padrões da média.

A identificação dos eventos ENSO baseou-se na classificação do NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), a qual considera o desvio de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ na temperatura média da superfície do mar para identificação dos trimestres referentes às estações do ano (NOAA, 2014 and Pereira et al., 2018). Os valores médios dos nutrientes digestíveis totais foram modelados considerando a variabilidade da qualidade das pastagens ao longo do ano. Contudo, estes valores são configurados como fixos entre os níveis de intensificação e os fenômenos climáticos - ENSO (Ul-Allah et al., 2014) para os propósitos deste modelo. A massa de forragem e a taxa diária de acúmulo de matéria seca foi configurada considerando sua variabilidade ao longo do ano, de acordo com o tipo de pastagem, o efeito da irrigação e dos fenômenos ENSO (**Tabela 3**).

A oferta de forragem foi definida em 12% (12 kg de MS para cada 100 kg de PV; Trindade et al., 2016) em todas as pastagens. Em sistemas a pasto com a oferta de forragem proposta, nem toda a forragem é colhida pelos animais, ocorrendo resíduos. Para representar isto, que acontece nos sistemas biológicos, foi definido um fator de utilização para cada tipo de pastagem (**Tabela 4**).

Submodelo econômico

Este submodelo visa resolver uma matriz de custo para cada nível de intensificação no horizonte de 10 anos. Adotou-se o método de custeio variável para classificar os custos. Essa classificação baseia-se na separação dos custos em variáveis e fixos. Variáveis são os itens que se alteram conforme a quantidade produzida. Custos fixos são aqueles que não mudam quando o volume de produção varia, isto é, no curto prazo (Rushton, 2009). Nesta classificação, foram acrescentados os custos semifixos (Powers, 1987), os quais devem respeitar os seguintes critérios para se adequar a esta categoria: i) ser um custo base, mesmo que a quantidade Q produzida seja zero; ii) o custo aumenta com o aumento da produção de Q ; e iii) o aumento do custo semifixo pelo Q deve ser menor, proporcionalmente, do que com os custos variáveis.

Um dos objetivos do submodelo econômico é resolver o custo operacional efetivo (**COE**), o custo operacional total (**COT**) e o custo total (**CT**), seguindo as recomendações de Matsunaga et al. (1976). O COE refere-se aos custos que são desembolsos efetivos para a produção ao longo de um ano e que serão consumidos neste mesmo intervalo de tempo, como: estabelecimento de pastagens, reprodução, suplementação mineral, manutenção da pastagem natural, sanidade, combustíveis, energia elétrica e telefonia, energia elétrica para irrigação, sede, contabilidade e mão de obra. Em relação ao COT, adiciona-se ao COE o valor das depreciações de benfeitorias, máquinas e implementos. É contabilizado também o imposto territorial rural, os custos de manutenções e seguros. Por fim, o CT adiciona ao COT os valores referentes ao custo de oportunidade da remuneração da terra, 40 kg de boi/ha/ano como representativo da região do estudo, e o custo da remuneração do capital investido, que neste caso, seriam os itens do custo variável (estabelecimento de pastagens, reprodução, suplementação mineral, manutenção da pastagem natural e sanidade), utilizando-se uma taxa de juros de 0.5% ao mês, que representa o rendimento médio de uma aplicação financeira no Brasil (Banco central do Brasil, 2018).

Saídas do modelo

Os resultados do modelo incluem parâmetros físicos e econômicos como a produtividade, a receita, o COE, as diferentes margens econômicas, a eficiência econômica, o risco econômico associado à sensibilidade na margem operacional efetiva em decorrência da variação dos preços de mercado. Além disso, os resultados incluem uma análise de otimização estocástica do ponto de equilíbrio físico e econômico associado à incerteza dos preços do mercado, em um horizonte de 10 anos.

Indicadores bioeconômicos

A produtividade foi obtida pela equação:

$$Pr = \sum CW + \sum CC + \sum CH \quad (1; \text{adaptado de Davis et al. 1983 e Lamb et al. 1992})$$

Em que Pr é a produtividade, medida como a quantidade de peso vivo produzido (kg PV/ha/ano); CW é a quantidade de bezerro desmamado (kg PV/ha/ano); CC é a quantidade de excedente de vaca (kg PV/ha/ano) e CH é quantidade de excedente de novilha (kg PV/ha/ano).

A receita, aqui definida como o produto entre os quilos de PV produzidos por categoria animal e o preço do kg de cada categoria, foi obtida pela equação:

$$R = \sum CW \times PCW + \sum CC \times PCC + \sum CH \times PCH \quad (2; \text{adaptado de Berger et al. 2017})$$

Em que R é a receita, composta pela entrada de dinheiro no sistema por ocasião da produtividade (US\$/ha/ano); CW é a quantidade de bezerro desmamado (kg PV/ha/ano); PCW é o preço de mercado do bezerro desmamado (US\$/kg PV); CC é a quantidade de vaca de descarte (kg PV/ha/ano); PCC é o preço de mercado da vaca de descarte (US\$/kg PV); CH é a quantidade de novilha de descarte (kg PV/ha/ano) e PCH é o preço de mercado da novilha de descarte (US\$/kg PV).

O COE foi obtido pela equação:

$$COE = CV + CSF + MO \quad (3; \text{adaptado de Sartorello et al., 2018})$$

Em que COE é o custo operacional efetivo que é desembolsado para a produção em um período de um ano (US\$/ha/ano); CV é o somatório dos custos variáveis (US\$/ha/ano); CSF é o somatório dos custos semifixos (US\$/ha/ano) e MO é o custo de mão de obra (US\$/ha/ano).

A margem operacional efetiva foi definida como a subtração do COE da receita, e foi obtida pela equação:

$$MOE = R - COE \quad (4; \text{adaptado de Sartorello et al., 2015})$$

Em que MOE é a margem operacional efetiva (US\$/ha/ano); R é a receita (US\$/ha/ano) e COE é o custo operacional efetivo (US\$/ha/ano).

A margem operacional total foi definida como a subtração do COT da receita, e foi obtida pela equação:

$$MOT = R - COT \quad (5; \text{adaptado de Sartorello et al., 2015})$$

Em que MOT é a margem operacional total (US\$/ha/ano); R é a receita (US\$/ha/ano) e COT é o custo operacional total (US\$/ha/ano).

A margem líquida foi definida como a subtração do CT da receita, e foi obtida pela equação:

$$ML = R - CT \quad (6; \text{adaptado de Sartorello et al., 2015})$$

Em que ML é a margem líquida (US\$/ha/ano); R é a receita (US\$/ha/ano) e CT é o custo total (US\$/ha/ano).

A eficiência econômica, aqui definida como a produtividade por cada US\$ 100 de COE, foi obtida pela equação:

$$EE = Pr / US\$100 \text{ de COE} \quad (7; \text{adaptado de Reidsma et al., 2018})$$

Em que EE é a eficiência econômica (kg PV/US\$ 100 de COE); Pr é a produtividade (kg PV/ha/ano) e COE é o custo operacional efetivo (US\$/ha/ano).

Indicadores de risco quantitativo

O modelo foi configurado para prever o risco quantitativo da MOE em cada cenário de intensificação. Isto é realizado por meio de uma análise estocástica, utilizando o método de Monte Carlo (MC). A simulação MC integra a incerteza das premissas do modelo em um processo de tomada de decisão atribuindo funções de distribuição de probabilidade (PDF) a determinados parâmetros de entrada do modelo. As PDFs finalmente entram em uma simulação estocástica combinando aleatoriamente valores prováveis de parâmetros de entrada em grandes números para criar uma distribuição de probabilidade de um valor o intervalo de valores alvo em vez de um único valor determinístico (Vose, 2008).

Para essas análises, foi considerada a variabilidade do preço de mercado do bezerro, da vaca e da novilha de descarte, devido ao produtor ter pouca ingerência sobre estes (Turner et al., 2013). Neste estudo, o resultado desta análise deve ser interpretado a partir da seguinte pergunta: qual é a probabilidade da MOE ser maior ou menor que um valor determinado (exemplo, probabilidade da MOE > US\$ 0,00), levando em consideração a variabilidade dos preços de mercado do bezerro, da vaca e da novilha de descarte?

Os preços dessas categorias foram obtidos a partir de um banco de dados publicado pelo Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA, 2017). Foi utilizada uma série histórica de preços de 1997-2017 na moeda real do Brasil. Os valores foram deflacionados a 31 de março de 2018 pelo índice Geral de Preços-Disponibilidade Interna da Fundação Getúlio Vargas () e convertidos para US\$ usando a taxa de câmbio do Banco Central do Brasil (US\$ 1.00 = R\$ 3.32).

As distribuições de probabilidade das variáveis aleatórias foram ajustadas usando @RISK 7 Excel®-add-in (Palisade, 2017a). O melhor ajuste de distribuição para cada série de preço foi selecionado baseado no critério de informação de Akaike, produzindo funções de distribuição derivadas do ajuste (**Tabela 5**). Posteriormente, a simulação foi executada com 100.000 iterações. Assim, o modelo estima as distribuições de probabilidade da MOE como resultado dos diferentes cenários de intensificação da cria de bovinos de corte.

Indicadores de sensibilidade

Uma análise de sensibilidade foi customizada para ranquear o impacto das variáveis aleatórias de entrada sobre a variável de saída usando o @RISK 7 Excel®-add-in (Palisade, 2017a). Nesta análise, foi quantificado o efeito que cada variável aleatória teve sobre a MOE. Uma análise previa mostrou que o preço do bezerro foi a variável aleatória de maior impacto sobre a MOE. Por esse motivo, optou-se por realizar três análises de sensibilidade, no BS, e no resultado médio dos cenários intensificados com (WI) e sem irrigação (NI). Em cada análise, dentro de cada variável aleatória e considerando sua distribuição de probabilidade (**Tabela 5**), foi verificado o efeito do menor e maior valor provável sobre a MOE, quando os valores das outras variáveis permaneceram constantes no seu valor médio.

Indicadores de otimização estocástica

Com o objetivo de conhecer o preço de mercado e o peso à desmama do bezerro (um desacoplado do outro) necessário para neutralizar o COE nos cenários onde a MOE foi negativa (NI10%, NI15%, NI20%, WI15% e WI20%), optou-se por configurar duas análises de otimização estocásticas. Para o peso à desmama do bezerro, a otimização estocástica teve por objetivo otimizar a média estatística da MOE, estabelecendo seu valor alvo = 0, variando o parâmetro de decisão peso do bezerro à desmama (WCW) e considerando a incerteza do preço de mercado do bezerro, da vaca e da novilha de descarte.

Nos parâmetros do modelo para os quais uma função de distribuição de probabilidade foi atribuída, são marcadas com um _____, sendo descrita formalmente como segue:

$$MOE_{TARGET\ VALUE = 0} = (WCW \times \underline{PCW} \times QCW + WCC \times \underline{PCC} \times QCC + WCH \times \underline{PCH} \times QCH) - COE \quad (8)$$

Com um intervalo ajustável $173\text{ kg PV} \leq WCW \leq 300\text{ kg PV}$

Onde, se $WCW > 173\text{ kg}$, então $COE = COE + ((WCW_t - 173\text{ kg PV}) \times QCW \times \underline{VC_u})$

Em que MOE é a margem operacional efetiva (US\$/ano); WCW é o peso do bezerro à desmama (kg PV); PCW é o preço de mercado do bezerro à desmama (US\$/kg PV); QCW é a quantidade de bezerras desmamadas; WCC é o peso da vaca de descarte (kg PV); PCC é o preço de mercado da vaca de descarte (US\$/kg PV); QCC é a quantidade de vacas de descarte; WCH é o peso da novilha de descarte (kg PV); PCH é o preço de mercado da novilha de descarte (US\$/kg PV); QCH é a quantidade de novilhas de descarte; COE é o custo operacional efetivo (US\$); WCW_t é o peso do bezerro à desmama testado na otimização estocástica e VC_u é o custo variável unitário por cada kg de PV adicional (US\$ 0.53 ± 0.08 ; decorrente da utilização de suplementação via creep feeding) ao peso médio de desmama, 173 kg. A premissa de utilização do creep feeding sustenta biologicamente a otimização estocástica do peso à desmama acima da média (173 kg).

Para o preço de mercado do bezerro desmamado, a otimização estocástica teve por objetivo otimizar a média estatística da MOE, estabelecendo seu valor alvo = 0, variando o parâmetro de decisão PCW e considerando a incerteza do preço de mercado da vaca e da novilha de descarte. Isto pode ser formalmente descrito como segue:

$$MOE_{TARGET\ VALUE = 0} = (WCW \times PCW \times QCW + WCC \times PCC \times QCC + WCH \times PCH \times QCH) - COE \quad (9)$$

Com um intervalo ajustável US\$ 1.62/kg PV \leq PCW \leq US\$ 3.31/kg PV

O modelo foi desenvolvido em Microsoft Excel com a ferramenta RISKOptimizer dentro do @RISK 7 (Palisade, 2017b). A otimização estocástica como um elemento de pesquisa operacional (por exemplo, Heyman e Sobel, 2003), foi aplicada no RISKOptimizer combinando otimização baseada em algoritmos genéticos (GA) com avaliação estocástica de risco aplicando simulação de MC. Os GAs são baseados na ideia de princípios biológicos evolutivos e são usados para resolver problemas de otimização. Os GAs compreendem uma população de "cromossomos", seleção de acordo com a aptidão, cruzamento para produzir novos descendentes e uma mutação aleatória de novos descendentes (Mitchell, 1998). Portanto, na otimização do GA, informações históricas são aplicadas para melhorar constantemente os resultados de um problema.

No RISKOptimizer, a otimização baseada em GA combina valores possíveis de parâmetros de entrada para formar uma única solução preliminar, que é então duplicada e recombinada várias vezes para criar melhores resultados dentro de um processo evolucionário. Integrando o MC, cada solução preliminar da otimização do GA contém uma simulação de probabilidade completa, em que os valores prováveis das PDFs são selecionados aleatoriamente para formar uma estatística em PDF para o parâmetro alvo. Neste caso a $MOE_{TARGET\ VALUE = 0}$, é retornada para a otimização do GA para criar melhores soluções preliminares (Palisade, 2017b). Nesta análise de otimização estocástica, tanto as simulações baseadas em GA quanto as de probabilidade foram realizadas 1000 vezes cada, totalizando um milhão de operações aritméticas por simulação.

O modelo desenvolvido é uma proposta de avaliação bioeconômica da intensificação da cria de bovinos de corte, não sendo específico para um determinado sistema de produção ou conjunto de dados. Em geral, modelos de sistemas como este não se prestam a procedimentos tradicionais de validação (Walters et al., 2016). Por essa razão, em nossa simulação a validação está fundamentada em poderosas análises de risco quantitativo, em análises de sensibilidade e em análises de otimização estocástica. Todas estas, previamente descritas.

RESULTADOS

No horizonte de 10 anos a produtividade média dos cenários intensificados com irrigação (81 kg PV/ha/ano) foi 41 e 5% superior ao BS e

aos cenários intensificados sem irrigação, respectivamente. Estas mesmas diferenças percentuais foram observadas também na receita. No entanto, o COE médio dos cenários intensificados com e sem irrigação foi superior comparado ao BS (US\$ 38/ha/ano). Isto resultou em uma eficiência econômica média 51 e 53% inferior nos cenários intensificados com e sem irrigação, respectivamente, em relação ao BS (151 kg PV/US\$ 100/ha/ano). Consequentemente a MOE foi negativa para os cenários intensificados com (US\$ -7/ha/ano) e sem irrigação (US\$ -11/ha/ano), enquanto que o BS gerou um saldo positivo na sua MOE (US\$ 41/ha/ano; **Tabela 6**).

No horizonte de 10 anos, os cenários intensificados com irrigação tiveram uma maior produção de bezerros por ano do que os cenários intensificados sem irrigação, e estes por sua vez produziram mais bezerros do que o BS. A produção de bezerros foi superior em 55, 41, 27, e 14% no NI20%, NI15%, NI10% e NI5%, respectivamente, do que no BS. Contudo, a produção de bezerros foi superior em 66, 49, 33, e 16% no WI20%, WI15%, WI10% e WI5%, respectivamente, do que no BS (**Tabela 7**). O PV das vacas de descarte, dos bezerros desmamados e das novilhas de descarte tiveram uma participação na produtividade de 44, 34 e 22%, respectivamente. Contudo, na receita a participação foi de 38% para as vacas de descarte, 40% para os bezerros desmamados e de 21% para as novilhas de descarte (**Fig. 4**).

Anualmente a receita e o COE aumentaram conforme o aumento do nível de intensificação com e sem irrigação, enquanto a MOE teve um comportamento antagônico a este. No entanto, dentro dos níveis de intensificação, foi possível evidenciar que a receita e o COE foram levemente superiores em anos de El Niño, intermediários em anos Neutro e inferiores em anos de La Niña. De forma geral, a MOE foi positiva nos níveis de intensificação 0 e 5%, próxima de zero em 10% de intensificação e negativa em 15 e 20% de intensificação (**Tabela 8**). Anualmente, na intensificação sem irrigação, a MOT foi positiva no E0%, N0%, E5%, L0% e N5%. Já na intensificação com irrigação a MOT foi positiva somente em E5% e N5%. No resto dos cenários a MOT foi negativa. Contudo, a margem líquida foi negativa em todos os cenários, com um efeito acentuado nos níveis de maior intensificação, especialmente nos cenários irrigados (**Tabela 8**).

No horizonte de 10 anos, os custos variáveis foram aproximadamente 10, 8, 6 e 3 vezes superior em NI20% e WI20%; NI15% e WI15%; NI10% e WI10%; e NI5% e WI5%, respectivamente, do que no BS (US\$ 13547). Os custos semifixos foram 9, 7, 4 e 2% inferior em NI20%, NI15%, NI10% e NI5%, respectivamente, do que no BS (US\$ 5454). Não obstante, estes foram 3, 3, 5 e 3% superior em WI20%, WI15%, WI10% e WI5%, respectivamente, do que no BS. Não houve variação dos custos fixos entre os cenários intensificados sem irrigação e o BS (US\$ 28663). Entretanto, estes foram 56, 38, 25 e 17% superior em WI20%, WI15%, WI10% e WI5%, respectivamente, do que no BS. Já a renda dos fatores foi aproximadamente 10, 7, 5 e 2% superior em NI20% e WI20%; NI15% e WI15%; NI10% e WI10%; e NI5% e WI5%, respectivamente, do que no BS, cujo valor foi de US\$ 53802 (**Tabela 9**). Em relação ao custo de depreciação, ele representou em média 9 e 2% do COT, nos cenários com e sem irrigação, respectivamente, enquanto que no BS ele representou 6%.

Contudo, em média o COT de WI10%, WI15%, WI20%, NI10%, NI15% e NI20% foi 3 vezes superior ao COT de BS (**Tabela 9**)

Os resultados mostraram que há uma probabilidade de 100, 17.5 e 7.1% da MOE ser positiva ($MOE \geq US\$ 0.00$) no BS, na média dos cenários intensificados com irrigação e na média dos cenários intensificados sem irrigação, respectivamente. Nos cenários individuais a probabilidade foi de 99.7, 45.1, 0.7, 0.0, 99.8, 62.1, 2.9 e 0.1% para NI5%, NI10%, NI15%, NI20%, WI5%, WI10%, WI15% e WI20%, respectivamente (**Fig. 5**).

No BS, o valor mais alto e baixo possível no preço do bezerro desmamado pode causar alterações de 32 a US\$ 48/ha/ano, respectivamente, sobre a MOE. Já na média dos cenários sem e com irrigação os efeitos sobre a MOE podem ser de -22 a US\$ 0/ha/ano e de -19 a US\$ 4/ha/ano, respectivamente (**Fig. 6**).

O peso do bezerro à desmama necessário para neutralizar o COE foi 179, 296, 392, 263 e 343 kg PV nos cenários NI10%, NI15%, NI20%, WI15% e WI20%, respectivamente. Com estes pesos à desmama e levando em conta a incerteza dos preços do bezerro, da vaca e da novilha de descarte, há uma probabilidade de 90% de a MOE se enquadrar no intervalo de -12 a 12, -19 a 19, -27 a 28, -18 a 18 e -26 a US\$ 27/ha/ano nos cenários NI10%, NI15%, NI20%, WI15% e WI20%, respectivamente (**Fig. 7**). O preço do bezerro à desmama necessário para neutralizar o COE foi 1.64, 2.41, 3.01, 2.20 e 2.74 nos cenários NI10%, NI15%, NI20%, WI15% e WI20%, respectivamente. Com estes preços e levando em conta a incerteza dos preços da vaca e da novilha de descarte, há uma probabilidade de 90% de a MOE se enquadrar no intervalo de -7 a 7, -8 a 8, -9 a 9, -8 a 8 e -9 a US\$ 10/ha/ano nos cenários NI10%, NI15%, NI20%, WI15% e WI20%, respectivamente (**Fig. 8**).

DISCUSSÃO

Evidências crescentes apoiam o papel das avaliações bioeconômicas, por meio de modelos de simulação, na cria de bovinos de corte (Berger et al., 2017; Baber et al., 2016; Monjardino et al., 2015; Villalba et al., 2010; Mosnier et al., 2009). Até onde é conhecido, o presente estudo é o primeiro relato que examina o papel da intensificação a longo prazo, utilizando níveis de produção de energia por meio de pastagens cultivadas e a irrigação. Além disso, considerando fenômenos climáticos e a incerteza dos preços de mercado (bezerro, vaca de descarte e novilha de descarte), sobre parâmetros bioeconômicos da cria de bovinos de corte em ambiente subtropical.

O maior efeito sobre produtividade e, portanto, sobre a receita foi nos cenários intensificados com irrigação, seguido dos cenários intensificados sem irrigação, comparado com o BS. Isto é explicado devido aos cenários intensificados com e sem irrigação produzirem maiores quantidades anuais de ME, possibilitando alocar uma maior quantidade de matrizes e consequentemente produzir uma maior quantidade de bezerras, de vacas e de novilhas de descarte. A produção de ME foi superior em 65, 48, 32, 16, 55, 41, 27 e 13% em WI20%, WI15%, WI10%, WI5%, NI20%, NI15%, NI10% e NI5%, respectivamente, comparado com o BS. Isto significa que a irrigação em média permitiu produzir 40 e 6% a mais de ME do que o BS e a média dos cenários

intensificados sem irrigação, respectivamente. Estes incrementos de ME se traduziram em aumentos de 41 e 35% na produtividade nos cenários intensificados com e sem irrigação, respectivamente, comparado com o BS.

Apesar que a intensificação com e sem irrigação teve impactos positivos sobre a produtividade, a receita gerada não conseguiu neutralizar o COE, resultando em prejuízo financeiro, na média dos cenários intensificados com e sem irrigação, como demonstrado pela MOE. Isto pode ser explicado principalmente devido ao alto custo de investimento das pastagens de inverno e verão. Sendo que estes representaram aproximadamente 74, 69, 60, e 44% do COE em WI20% e NI20%, WI15% e NI15%, WI10% e NI10%, e WI5% e NI5%, respectivamente. Isto também contribui na baixa eficiência econômica nos cenários com e sem irrigação em relação à eficiência do BS.

Em outros locais do Brasil, por exemplo o centro oeste, a capacidade de suporte média nos sistemas de cria intensiva é 1.2 UA/ha/ano com uma MOT de US\$ 29/ha/ano (ANUALPEC, 2017). Nossos resultados bioeconômicos podem estar associados à baixa capacidade de suporte (0.36, 0.48 e 0.51 UA/ha/ano, no BS, na média dos cenários intensificados sem e com irrigação, respectivamente), o que resultou em menores produtividades e consequentemente em menores margens econômicas.

Entre os cenários intensificados, com exceção do NI5% e WI5%, todos apresentaram MOT negativa, com um efeito acentuado nos maiores níveis de intensificação. Isto pode ser explicado devido à adição dos custos fixos por ocasião de seguros, manutenções, imposto territorial rural e principalmente aos custos de depreciações, item este de maior impacto no custo fixo, especialmente nos cenários com irrigação em decorrência do investimento nesta tecnologia. Tais achados sinalizam que ainda que a MOE do NI10% e do WI10% não foi negativa, estes cenários estariam se descapitalizando devido a não gerar resultados econômicos suficientes para substituir os bens de operação após seu período de vida útil (Gonçalves et al., 2017).

Ao considerar a renda dos fatores, a margem líquida mostrou que nenhum dos cenários, especialmente o BS, NI5% e WI5% (que até então eram positivos na MOT), conseguem arcar com os custos de remuneração da terra e do capital de giro. Portanto, nas condições deste estudo, os resultados sugerem que a cria de bovinos de corte é uma atividade de baixa margem operacional efetiva, com uma tendência de descapitalização dos bens de operação, e inviável economicamente, quando considerados os impactos econômicos da renda dos fatores, especificamente, a remuneração da terra e do capital de giro. Apesar destes resultados, os cenários intensificados com irrigação mostraram dominância estocástica de primeira ordem (FSD; Eisenführ and Weber, 2002) sobre os cenários intensificados sem irrigação. Não obstante, O BS mostrou FSD comparado com todos os cenários intensificados com e sem irrigação. A FSD é atingida quando a probabilidade para cada ponto de dados da função de probabilidade acumulada de WI (MOE neste caso) é pelo menos tão alta quanto para a função de probabilidade acumulada de NI, bem como para pelo menos um ponto de dados maior para WI do que para NI, por exemplo. Isto sugere que a irrigação diminui o risco da MOE ser menor, comparado com os cenários intensificados sem irrigação. Além disso, foi constatado que, quanto maior o nível de intensificação, maior a diferença do

risco entre o mesmo nível, irrigado e sem irrigação (**Fig. 5**). Isto pode ser explicado devido à irrigação estabilizar a produção de ME ao longo do tempo, diminuindo os efeitos do ENSO (Jensen et al., 2010). No entanto, A variância do provável resultado de MOE é maior nos níveis intensificados com e sem irrigação do que o BS. Isto é indicado por uma distribuição mais estreita de resultados prováveis absolutos e uma função mais acentuada de resultados prováveis acumulados no BS do que para os níveis intensificados com e sem irrigação. Isto pode estar associado ao fato do COE do BS ser menor que o COE dos cenários intensificados com e sem irrigação (Blumenstein et al., 2018).

A MOE demonstrou ser sensível à variação dos preços de mercado do bezerro desmamado, da vaca e da novilha de descarte, sendo que a variação do preço de mercado do bezerro foi a variável de maior impacto sobre ela. Isto é devido ao preço do bezerro ser em média 37% superior ao preço da vaca de descarte e pela distribuição *Logistic* do preço do bezerro permitir gerar valores mais altos e variados do que a *Laplace* do preço da vaca de descarte. Esta distribuição, concentra os valores aleatórios mais próximos da sua média, que é menor que a média do preço do bezerro (Palisade, 2017a).

Devido ao peso à desmama ser um dos principais fatores de desempenho econômico na cria (Morris et al., 1994), foi customizada uma análise de otimização estocástica para prever o peso à desmama necessário para neutralizar o COE. Nos cenários onde a MOE foi negativa, os resultados desta análise sugerem que a medida que aumenta o nível de intensificação, com e sem irrigação, maior deverá ser o peso ou o preço do bezerro à desmama, necessário para neutralizar o COE. Esta análise inclui a incerteza dos preços de mercado das categorias animais. Assim sendo, foi verificado também que quanto maior o nível de intensificação, maior o intervalo possível de variação da MOE com uma mesma chance de ocorrência (90%). Isto pode ser explicado devido aos maiores níveis de intensificação terem um maior COE, o que aumenta a variância da MOE com a ocorrência de valores aleatórios distantes da média (para cima ou para baixo) dos preços do bezerro, da vaca e da novilha de descarte. A otimização do peso do bezerro à desmama, necessário para neutralizar o COE nos cenários NI15% (296 kg PV), NI20% (392 kg PV) e WI20% (346 kg PV) foi “ideal”. Entretanto, sabemos que a ocorrência destes pesos em sistemas biológicos é pouco provável de acontecer (AgriProfit\$, 2018). Isto sugere que os cenários passíveis de neutralizar seu COE por meio do gerenciamento do peso à desmama do bezerro seriam NI10% e WI15% (**Fig. 7**).

Nas avaliações bioeconômicas de sistemas de produção de bovinos de corte, uma das principais limitações é a desconsideração dos efeitos da variação do clima e dos preços de mercado dos animais ao longo do tempo (por exemplo, Wang et al., 2018). Este é justamente o ponto forte do nosso modelo, ao considerar os efeitos do ENSO e o comportamento dos preços de mercado dos animais em um longo período. Isto permite que os resultados considerem os efeitos do clima e a incerteza do mercado, estando eles vinculados às probabilidades de ocorrência, na tentativa de representar holisticamente a realidade dos sistemas de produção de cria de bovinos de corte (Hendrickson et al., 2008; Wu and David, 2002). Todavia, uma possível

limitação do nosso trabalho poderia ser que ele assume valores determinísticos para os insumos do custo variável, quando uma possibilidade plausível seria considerar seus padrões estocásticos de preço de mercado. No entanto, esse aspecto técnico não diminui a relevância geral dos nossos resultados.

Em resumo, a intensificação ocasionou impactos importantes na produtividade, com menor risco sobre a MOE nos cenários intensificados com irrigação. No entanto, estes impactos não foram suficientes para arcar com o COE, gerando prejuízo econômico nos cenários intensificados. De forma geral, isto pode estar associado à baixa capacidade de suporte do campo natural do bioma pampa (Modernel et al., 2018) (em média 0.6 UA/ha/ano; ANUALPEC, 2017), onde os cenários de máxima intensificação (NI20% e WI20%), funcionaram com 80% da área sobre estas condições. Isto poderia estar sinalizando três perspectivas. A primeira, a necessidade de avaliar as respostas da intensificação do próprio campo natural (por exemplo, Jaurena et al., 2016) sobre parâmetros bioeconômicos da cria de bovinos de corte. A segunda, avaliar a intensificação integrando outras fases produtivas de maior eficiência biológica como a recria ou terminação (Nasca et al., 2015). E a terceira, avaliar cenários alternativos que aumentam a eficiência bioeconômica da cria (Lampert et al., 2013) por meio de relações de eficiência entre o custo da terra, o custo de produção, a produção por área e o preço do produto (por exemplo, Pereira et al., 2018).

CONCLUSÃO

O modelo desenvolvido permitiu entender o processo de como ocorre a resposta bioeconômica decorrente dos níveis de intensificação nos sistemas de cria de bovinos de corte. A intensificação na cria tem consideráveis impactos biofísicos, especialmente na produtividade. Não obstante, com os valores dos parâmetros usados nesta análise, esses impactos não conseguem amortecer o custo total de produção, mostrando ineficiência econômica nos cenários avaliados. Apesar disso, a tecnologia de irrigação se mostra como minimizadora do risco econômico frente às mudanças climáticas, ainda que não seja capaz de neutralizar o prejuízo. No entanto, dados os benefícios na produtividade da cria de bovinos de corte no sul do Brasil, o desafio continua sendo encontrar formas de tornar a irrigação de pastagens mais eficiente ou explorar cenários alternativos que melhorem a eficiência bioeconômica, a fim de alcançar um sistema robusto que permaneça economicamente viável no futuro.

Acknowledgements

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

LITERATURA CITADA

- AgriProfit\$, 2018. Benchmarks for Alberta cattlemen. Special edition, 22 year economic, productive, and financial performance of Alberta cow/calf operations. Alberta, Canada.
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., de Moraes, G., Leonardo, J., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22, 711-728.
- ANUALPEC/FNP, 2017. Anuário da Pecuária Brasileira (Yearbook of Brazilian Livestock). Instituto FNP, AGRA FNP Pesquisas Ltda, São Paulo, Brazil.
- Ash, A., Hunt, L., McDonald, C., Scanlan, J., Bell, L., Cowley, R., Watson, I., McIvor, J., MacLeod, N., 2015. Boosting the productivity and profitability of northern Australian beef enterprises: Exploring innovation options using simulation modelling and systems analysis. *Agricultural Systems* 139, 50-65.
- Baber, J. R., Sawyer, J. E., Anderson, D. P., Richardson, J. W., & Wickersham, T. A. (2016). 029 An Economic Comparison between Limit-Fed and Conventional Cow-Calf Production Systems During Periods of Reduced Forage Availability. *Journal of Animal Science*, 95(suppl_1), 14-14.
- Behrendt, K., Scott, J.M., Cacho, O., Jones, R., 2013. Simulating the impact of fertiliser strategies and prices on the economics of developing and managing the Cicerone Project farmlets under climatic uncertainty. *Anim. Prod. Sci.* 53, 806–816. <https://doi.org/10.1071/AN11173>.
- Banco central do Brasil, 2018. Remuneração dos depósitos de poupança. <https://www4.bcb.gov.br/pec/poupanca/poupanca.asp> (accessed 23 October 2018).
- Berger, H., Bilotto, F., Bell, L. W., & Machado, C. F. (2017). Feedbase intervention in a cow-calf system in the flooding pampas of Argentina: 2. Estimation of the marginal value of additional feed. *Agricultural Systems*, 158, 68-77.
- Berlato, M.A., Fontana, D.C., 2003. El Niño e La Niña: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul: aplicações de previsões climáticas na agricultura. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul.
- Bertazzo, R.P., Freitas, R.T.F.d., Gonçalves, T.d.M., Pereira, I.G., Eler, J.P., Ferraz, J.B.S., Oliveira, A.I.G.d., Andrade, I.F.d., 2004. Parâmetros genéticos de longevidade e produtividade de fêmeas da raça Nelore. *Revista Brasileira de Zootecnia* 33, 1118-1127.
- Blumenstein, B., Siegmeier, T., Selsam, F., & Möller, D. (2018). A case of sustainable intensification: Stochastic farm budget optimization considering internal economic benefits of biogas production in organic agriculture. *Agricultural Systems*, 159, 78-92.
- Cardoso, A.S., Berndt, A., Leytem, A., Alves, B.J.R., de Carvalho, I.d.N.O., de Barros Soares, L.H., Urquiaga, S., Boddey, R.M., 2016. Impact of the intensification of beef production in Brazil on greenhouse gas emissions and land use. *Agricultural Systems* 143, 86-96.
- Carvalho P.C.F., Wallau M.O., Bremm C., Bonnet O., Trindade J.K., da Rosa F.Q., de Freitas T.S., Moojen F.G., 2017. Nativão: 30 anos de pesquisa

- em campo nativo. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia. Porto Alegre, Rio Grande do Sul.
- Casey, J., Holden, N., 2006. Greenhouse gas emissions from conventional, agri-environmental scheme, and organic Irish suckler-beef units. *J. Environ. Qual.* 35, 231–239.
- CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada, 2017. Indicador do bezerro Esalq/ BM&FBovespa - Mato Grosso do Sul: 1997–2017. <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/consultas-ao-banco-de-dados-do-site.aspx> (accessed 21 December 2017).
- Ciccioli, N.H., Wettemann, R.P., Spicer, L.J., Lents, C.A., White, F.J., Keisler, D.H., 2003. Influence of body condition at calving and postpartum nutrition on endocrine function and reproductive performance of primiparous beef cows^{1,2}. *Journal of Animal Science* 81, 3107-3120.
- Cosentino, S.L., Mantineo, M., Testa, G., 2012. Water and nitrogen balance of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* moench (L.)) cv. Keller under semi-arid conditions. *Industrial Crops and Products* 36, 329-342.
- Cotton, J., Burow, G., Acosta-Martinez, V., Moore-Kucera, J., 2013. Biomass and cellulosic ethanol production of forage sorghum under limited water conditions. *BioEnergy Research* 6, 711-718.
- CSIRO, 2007. Nutrient Requirements of Domesticated Ruminants. Primary Industries Standing Committee on Agriculture. CSIRO Publishing, Melbourne.
- Davis, M.E., Rutledge, J.J., Cundiff, L.V., Hauser, E.R., 1983. Life Cycle Efficiency of Beef Production: I. Cow Efficiency Ratios for Progeny Weaned³. *Journal of Animal Science* 57, 832-851.
- de Freitas, E.A.G., 1975. Produtividade de matéria seca, proteína digestível e nutrientes digestíveis totais em pastagem nativa do Rio Grande do Sul. Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia. Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Porto Alegre, Rio Grande do Sul.
- De Oliveira Silva, R., Barioni, L. G., Hall, J. A. J., Matsuura, M. F., Albertini, T. Z., Fernandes, F. A., & Moran, D. (2016). Increasing beef production could lower greenhouse gas emissions in Brazil if decoupled from deforestation. *Nature Climate Change*, 6(5), 493.
- Dill, M.D., Pereira, G.R., Costa, J.B.G., Canellas, L.C., Peripolli, V., Neto, J.B., Sant'Anna, D.M., McManus, C., Barcellos, J.O.J., 2015. Technologies that affect the weaning rate in beef cattle production systems. *Tropical animal health and production* 47, 1255-1260.
- Eisenführ, F., Weber, M., 2002. Rational Decision Making [Rationales Entscheiden], 4. Aufl. Springer 2003.
- Ferrell, C.L., Jenkins, T.G., 1985. Cow Type and the Nutritional Environment: Nutritional Aspects. *Journal of Animal Science* 61, 725-741.
- Filho, S.D.C.V., Machado, P.A.S., Chizzotti, M.L., Amaral, H.F., Magalhães K.A., Júnior, V.R.R., Capelle, E.R., 2010. Tabelas brasileiras de composição de alimentos para bovinos, third ed. Viçosa, Minas Gerais.
- Flichman, G., Louhichi, K., Boisson, J.M., 2011. Modelling the relationship between agriculture and the environment using bio-economic models:

- some conceptual issues. In: Flichman, G. (Ed.), *Bio-Economic Models Applied to Agricultural Systems*. Springer, Netherlands, pp. 3–14.
- Freer, M., Moore, A.D., Donnelly, J.R., 2012. The GRAZPLAN animal biology model for sheep and cattle and the GrazFeed decision support tool1. CSIRO Plant Industry Technical Paper.
<http://www.grazplan.csiro.au/files/TechPaperMay12.pdf>
- Frizzo, A., Rocha, M.d., Restle, J., Freitas, M.R., Biscaíno, G., Pilau, A., 2003. Produção de forragem e retorno econômico da pastagem de aveia e azevém sob pastejo com bezerras de corte submetidas a níveis de suplementação energética. *Revista Brasileira de Zootecnia* 32, 632-642.
- Gelcer, E., Fraise, C., Dzotsi, K., Hu, Z., Mendes, R., Zotarelli, L., 2013. Effects of El Niño Southern Oscillation on the space–time variability of Agricultural Reference Index for Drought in midlatitudes. *Agricultural and Forest Meteorology* 174-175, 110-128.
- Gerber, P., Vellinga, T., Opio, C., Steinfeld, H., 2011. Productivity gains and greenhouse gas emissions intensity in dairy systems. *Livest. Sci.* 139, 100–108.
- Gonçalves, G. V. B., Vaz, R. Z., Vaz, F. N., Mendonça, F. S., da Fontoura Júnior, J. A. S., & Castilho, E. M., 2017. Análise de custos, receitas e ponto de equilíbrio dos sistemas de produção de bezerros no Rio Grande do Sul. *Ciência Animal Brasileira*, 18, 1-17.
- Hendrickson, J.R., Hanson, J.D., Tanaka, D.L., Sassenrath, G.F., 2008. Principles of integrated agricultural systems: introduction to processes and definition. *Renew. Agric. Food Syst.* 23 (4), 265–271.
- Heyman, D.P., Sobel, M.J., 2003. *Stochastic Models in Operations Research: Stochastic Optimization*. Courier Corporation.
- Jahanzad, E., Jorat, M., Moghadam, H., Sadeghpour, A., Chaichi, M.R., Dashtaki, M., 2013. Response of a new and a commonly grown forage sorghum cultivar to limited irrigation and planting density. *Agricultural Water Management* 117, 62-69.
- Jaurena, M., Lezama, F., Salvo, L., Cardozo, G., Ayala, W., Terra, J., & Nabinger, C. (2016). The dilemma of improving native grasslands by overseeding legumes: Production intensification or diversity conservation. *Rangeland ecology & management*, 69(1), 35-42.
- Jensen, K.B., Waldron, B.L., Peel, M.D., Robins, J.G., 2010. Nutritive value of herbage of five semi-irrigated pasture species across an irrigation gradient. *Grass and Forage Science* 65, 92-101.
- Kragt, M. E., Pannell, D. J., McVittie, A., Stott, A. W., Ahmadi, B. V., & Wilson, P. (2016). Improving interdisciplinary collaboration in bio-economic modelling for agricultural systems. *Agricultural Systems*, 143, 217-224.
- KREBS, Pivôs de irrigação, 2017. <https://krebs.com.br/pivos/> (accessed 21 December 2017).
- Lamb, M.A., Tess, M.W., Robison, O.W., 1992. Evaluation of mating systems involving five breeds for integrated beef production systems: I. Cow-calf segment. *Journal of Animal Science* 70, 689-699.
- Lampert, V. D. N., Barcellos, J. O. J., Kliemann Neto, F. J., Canellas, L. C., Dill, M. D., & Canozzi, M. E. A. (2012). Development and application of a

- bioeconomic efficiency index for beef cattle production in Rio Grande do Sul, Brazil. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 41(3), 775-782.
- Macari, S., Rocha, M.G.d., Restle, J., Pilau, A., Freitas, F.K.d., Neves, F.P., 2006. Avaliação da mistura de cultivares de aveia preta (*Avena strigosa* Schreb) com azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) sob pastejo. *Ciência Rural* 36, 910-915.
- Matsunaga, M; Bemelmans, P. F.; Toledo, P. E. N.; Dulley, R. D.; Okawa, H.; Pedroso, I. A. Metodologia de custo de produção utilizada pelo IEA. In: seminário internacional sobre custos de produção agrícola, 1976, SÃO PAULO. Anais... São Paulo, Sociedade Brasileira de Economia Rural e Instituto de Economia Agrícola, 1976.
- Mazzetto, A.M., Feigl, B.J., Schils, R.L.M., Cerri, C.E.P., Cerri, C.C., 2015. Improved pasture and herd management to reduce greenhouse gas emissions from a Brazilian beef production system. *Livestock Science* 175, 101-112.
- Menegassi, S.R.O., Barcellos, J.O.J., Lampert, V.d.N., Borges, J.B.S., Peripolli, V., 2011. Bioeconomic impact of bull breeding soundness examination in cow-calf systems. *Revista Brasileira de Zootecnia* 40, 441-447.
- Mitchell, M., 1998. *An Introduction to Genetic Algorithms*. MIT Press.
- Modernel, P., Dogliotti, S., Alvarez, S., Corbeels, M., Picasso, V., Tiftonell, P., & Rossing, W. A. H. (2018). Identification of beef production farms in the Pampas and Campos area that stand out in economic and environmental performance. *Ecological Indicators*, 89, 755-770.
- Monjardino, M., MacLeod, N., McKellar, L., Prestwidge, D., 2015. Economic evaluation of irrigated forage production in a beef cattle operation in the semi-arid tropics of northern Australia. *Agricultural Systems* 139, 122-143.
- Morris, S.T., Brookes, I.M., Parker, W.J., McCutcheon, S.N., 1994. Biological efficiency: how relevant is this concept to beef cows in a mixed livestock, seasonal pasture supply context? *Proc. N. Z. Soc. Anim. Prod.* 54, 333–336.
- Mosnier, C., Agabriel, J., Lherm, M., & Reynaud, A. (2009). A dynamic bio-economic model to simulate optimal adjustments of suckler cow farm management to production and market shocks in France. *Agricultural Systems*, 102(1-3), 77-88.
- Mosnier, C., Duclos, A., Agabriel, J., & Gac, A. (2017). Orfee: A bio-economic model to simulate integrated and intensive management of mixed crop-livestock farms and their greenhouse gas emissions. *Agricultural Systems*, 157, 202-215.
- Mott, G.O., 1960. Grazing pressure and the measurement of pasture production. In: Skidmore, C.L., Boyle, P.J., & Raymond, L.W., (eds) *Proceedings 8th International Grassland Congress*, Reading, UK, pp. 606–611. Oxford, UK: Alden Press.
- Nasca, J.A., Feldkamp, C.R., Arroquy, J.I., Colombatto, D., 2015. Efficiency and stability in subtropical beef cattle grazing systems in the northwest of Argentina. *Agricultural Systems* 133, 85-96.
- NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration, 2014. Cold and warm episodes by seasons.

- http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml (accessed 21 July 2017).
- Oaigen, R.P., Barcellos, J.O.J., Christofari, L.F., Braccini Neto, J., Oliveira, T.E.d., Prates, Ê.R., 2008. Melhoria organizacional na produção de bezerras de corte a partir dos centros de custos. *Revista Brasileira de Zootecnia* 37, 580-587.
- Oaigen, R.P., Barcellos, J.O.J., Christofari, L.F., Braccini Neto, J., Oliveira, T.E.d., Prates, Ê.R., 2009. Análise da sensibilidade da metodologia dos centros de custos mediante a introdução de tecnologias em um sistema de produção de cria. *Revista Brasileira de Zootecnia* 38, 1155-1162.
- Oliveira, T.E.d., Freitas, D.S.d., Gianezini, M, Ruviaro, C.F., Zago, D., Mércio, T.Z., Dias, E.A., Lampert, V.d.N., Barcellos, J.O.J., 2017. Agricultural land use change in the Brazilian Pampa Biome: The reduction of natural grasslands. *Land Use Policy*. 63:394-400.
- Palisade, 2017a. User Manual for @RISK 7.5.2, Risk and Simulation Add-in for Excel. Palisade Corporation, Ithaca, NY, USA.
- Palisade, 2017b. User Manual for RISKOptimizer 7.5.2, Risk and Simulation Add-in for Excel. Palisade Corporation, Ithaca, NY, USA.
- Pereira, P.R.R.X., Hasenack, H., Pereira, G.R., Dewes, H., Canellas, L.C., Oliveira, T.E., Barcellos, J.O.J., 2018. Climate change and beef supply chain in Southern Brazil. *The Journal of Agricultural Science*, 1-8.
- Pereira, C.H., Patino, H.O., Hoshide, A.K., Abreu, D.C., Alan Rotz, C., Nabinger, C., 2018. Grazing supplementation and crop diversification benefits for southern Brazil beef: A case study. *Agricultural Systems* 162, 1-9.
- Piazzetta, R.G., Dittrich, J.R., Alves, S.J., Moraes, A.d., Lustosa, S.B.C., Gazda, T.L., Melo, H.A., Monteiro, A.L.G., 2009. Características qualitativas da pastagem de aveia preta e azevém manejada sob diferentes alturas, obtida por simulação de pastejo. *Archives of Veterinary Science* 14, 43-48.
- Portugal, T.B. 2016. Estratégias de manejo de híbrido de sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor* (L.) Moench x *Sorghum sudanense* (Piper) Stapf) em pastoreio rotativo. Universidade Federal do Paraná. Dissertação de Mestrado em Ciências. Curitiba, Paraná.
- Pötter, L., Lobato, J.F.P., Mielitz Netto, C.G.A., 1998. Produtividade de um modelo de produção para novilhas de corte primíparas aos dois, três e quatro anos de idade. *Revista Brasileira de Zootecnia* 27, 613-619.
- Powers, T. L. Breakeven analysis with semifixed costs. *Industrial Marketing Management*, New York, v. 16, p. 35-41, 1987.
- Reidsma, P., Janssen, S., Jansen, J., & van Ittersum, M.K., 2018. On the development and use of farm models for policy impact assessment in the European Union—A review. *Agricultural Systems*, 159, 111-125.
- Restle, J., Roso, C., Soares, A.B., 1999. Produção animal e retorno econômico em misturas de gramíneas anuais de estação fria. *Revista Brasileira de Zootecnia* 28, 235-243.
- RGE Sul, Tarifas de energia elétrica, 2017. <https://www.rgesul.com.br/Paginas/default.aspx> (accessed 15 September 2017).

- Roso, C., Restle, J., Soares, A.B., Alves Filho, D., Brondani, I.L., 1999. Produção e qualidade de forragem da mistura de gramíneas anuais de estação fria sob pastejo contínuo. *Revista Brasileira de Zootecnia* 28, 459-467.
- Rovira J., 1996. Manejo nutritivo de los rodeos de cría em pastoreo. In: Sur Hemisferio, editor. Montevideo.
- Rushton, J. The economics of animal health and production. London: CABI Head Office, 2009. 384 p.
- Santos, D.T.d., Rocha, M.G.d., Genro, T.C.M., Quadros, F.L.F.d., Freitas, F.K.d., Roman, J., Neves, F.P., 2004. Suplementos energéticos para recria de novilhas de corte em pastagens anuais: análise econômica. *Revista Brasileira de Zootecnia* 33, 2359-2368.
- Sartorello, G.L., Bastos, J.P.S.T., Gameiro, A.H., 2018. Development of a calculation model and production cost index for feedlot beef cattle. *Revista Brasileira de Zootecnia* 47.
- Schittenhelm, S., Schroetter, S., 2014. Comparison of Drought Tolerance of Maize, Sweet Sorghum and Sorghum-Sudangrass Hybrids. *Journal of Agronomy and Crop Science* 200, 46-53.
- Silveira, E.O., 2001. Produção e comportamento ingestivo de cordeiros em pastagem de azevém anual (*Lolium multiflorum* Lam.) manejada em diferentes alturas. Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado em Zootecnia. Porto Alegre, Rio Grande do Sul.
- Silveira, M. C. T. Da; Sant'anna, D. M.; Montardo, D. P.; Trentin, G. 2015. Aspectos relativos à implantação e manejo de capim-sudão BRS Estribo. Comunicado técnico No. 89. Embrapa Pecuária Sul, Bagé, Brasil.
- Soares, A.B., Restle, J., Roso, C., Lupatini, G.C., Alves Filho, D.C., 2001. Dinâmica, qualidade, produção e custo de produção de forragem da mistura aveia preta e azevém anual adubada com diferentes fontes de nitrogênio. *Ciência Rural* 31, 117-122.
- Soares, J. C. D. R., Barcellos, J. O. J., Queiroz Filho, L. A. V., Oaigen, R. P., Canozzi, M. E. A., Camargo, C. M., ... & Braccini Neto, J. (2015). Avaliação econômica da terminação de bovinos de corte em pastagem irrigada. *Arquivo brasileiro de medicina veterinária e zootecnia= Brazilian journal of veterinary and animal sciences*. Belo Horizonte. Vol. 67, n. 4 (jul./ago. 2015), p. 1096-1104.
- Trindade, J.K., 2011. Comportamento e consumo de forragem de bovinos de corte em pastagem natural complexa. Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado em Agronomia. Porto Alegre, Rio Grande do Sul.
- Trindade, J.K.d., Neves, F.P., Pinto, C.E., Bremm, C., Mezzalira, J.C., Nadin, L.B., Genro, T.C., Gonda, H.L., Carvalho, P.C., 2016. Daily forage intake by cattle on natural grassland: Response to forage allowance and sward structure. *Rangeland ecology & management* 69, 59-67.
- Turner, B.L., Rhoades, R.D., Tedeschi, L.O., Hanagriff, R.D., McCuiston, K.C., Dunn, B.H., 2013. Analyzing ranch profitability from varying cow sales and heifer replacement rates for beef cow-calf production using system dynamics. *Agric. Syst.* 114, 6–14.

- Ul-Allah, S., Khan, A.A., Fricke, T., Buerkert, A., Wachendorf, M., 2014. Fertilizer and irrigation effects on forage protein and energy production under semi-arid conditions of Pakistan. *Field Crops Research* 159, 62-69.
- Veysset, P., Lherm, M., Bébin, D., 2010. Energy consumption, greenhouse gas emissions and economic performance assessments in French Charolais suckler cattle farms: model-based analysis and forecasts. *Agric. Syst.* 103, 41–50.
- Vieira, A., Lobato, J.F.P., Corrêa, E.S., Torres Júnior, R.A.d.A., Costa, F.P., 2006. Desenvolvimento e desempenho reprodutivo de novilhas Nelore criadas a pasto nos cerrados do Centro-Oeste brasileiro. *Revista Brasileira de Zootecnia* 35, 186-192.
- Villalba, D., Ripoll, G., Ruiz, R., & Bernués, A. (2010). Long-term stochastic simulation of mountain beef cattle herds under diverse management strategies. *Agricultural systems*, 103(4), 210-220.
- Vose, D., 2008. *Risk Analysis: A Quantitative Guide*, 3rd ed. John Wiley & Sons.
- Walters, J.P., Archer, D.W., Sassenrath, G.F., Hendrickson, J.R., Hanson, J.D., Halloran, J.M., Vadas, P., Alarcon, V.J., 2016. Exploring agricultural production systems and their fundamental components with system dynamics modelling. *Ecological Modelling* 333, 51-65.
- Wang, T., Teague, W. R., Park, S. C., & Bevers, S. (2018). Evaluating long-term economic and ecological consequences of continuous and multi-paddock grazing—a modeling approach. *Agricultural Systems*, 165, 197-207.
- Wu, J., David, J.L., 2002. A spatially explicit hierarchical approach to modelling complex ecological systems: theory and applications. *Ecol. Model.* 153, 7–26.
- Zamfir, M.C., Schitea, M., Zamfir, I., 2001. The variability study of some quantitative traits in sudan grass [*Sorghum sudanense* Piper (Staph.)]. *Romanian Agricultural Research* 1, 23-30.

Figura 1. Localização geográfica do bioma pampa Brasileiro.

Figura 2. Linha do tempo com os principais processos do ciclo produtivo dos sistemas de cria de bovinos de corte no hemisfério sul.

Figura 3. Esquema geral simplificado do modelo conceitual proposto da intensificação dos sistemas de produção da cria de bovinos de corte. Onde A é a configuração dos níveis de intensificação (intervenção).

Figura 4. Participação percentual da produção de bezerros desmamados, das vacas de descarte e novilhas de descarte sobre a produtividade e receita anual, em um horizonte de 10 anos.

Figura 5. Portfólio de risco da margem operacional efetiva, em um horizonte de 10 anos, em diferentes níveis de intensificação da cria de bovinos de corte com e sem uso de irrigação de pastagem. BS = cenário base; NI = média dos cenários intensificados sem irrigação; WI = média dos cenários intensificados com irrigação (A, acima). Para mais detalhes sobre os cenários de B (abaixo), ver Tabela 1.

Figura 6. Análise de sensibilidade da margem operacional efetiva em decorrência da variação dos preços de mercado do bezerro desmamado, da vaca e da novilha de descarte, no BS (cenário base), na média dos cenários intensificados com irrigação (WI5%, WI10%, WI15% e WI20%) e na média dos cenários intensificados sem irrigação (NI5%, NI10%, NI15% e NI20%). Os inputs foram ranqueados de acordo com o efeito na média da saída.

Figura 10. Otimização estocástica do peso do bezerro à desmama necessário (PEFW = ponto de equilíbrio físico) para neutralizar o custo operacional efetivo e seu respectivo impacto na MOE (margem operacional efetiva), com uma probabilidade de ocorrência de 90%.

Estes resultados foram apresentados somente nos cenários onde a MOE foi negativa (sem irrigação, NI10%, NI15% e NI20%; com irrigação, WI15% e WI20%).

Figura 7. Otimização estocástica do preço do bezerro à desmama necessário (PEMP = ponto de equilíbrio monetário) para neutralizar o custo operacional efetivo e seu respectivo impacto na MOE (margem operacional efetiva), com uma probabilidade de ocorrência de 90%.

Estes resultados foram apresentados somente nos cenários onde a MOE foi negativa (sem irrigação, NI10%, NI15% e NI20%; com irrigação, WI15% e WI20%).

Figura 8. Otimização estocástica do preço do bezerro à desmama necessário (PEMP = ponto de equilíbrio monetário) para neutralizar o custo operacional efetivo e seu respectivo impacto na MOE (margem operacional efetiva), com uma probabilidade de ocorrência de 90%. Estes resultados foram apresentados somente nos cenários onde a MOE foi negativa (sem irrigação, NI10%, NI15% e NI20%; com irrigação, WI15% e WI20%).

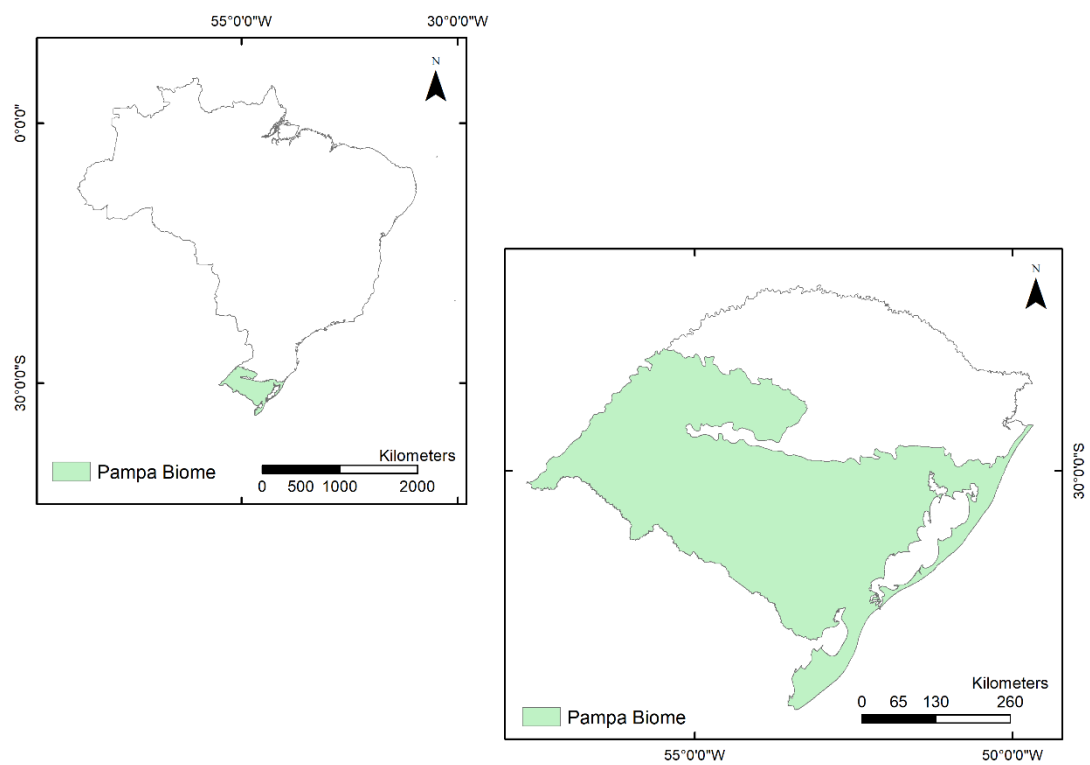


Figura 1. Localização geográfica do bioma pampa Brasileiro.

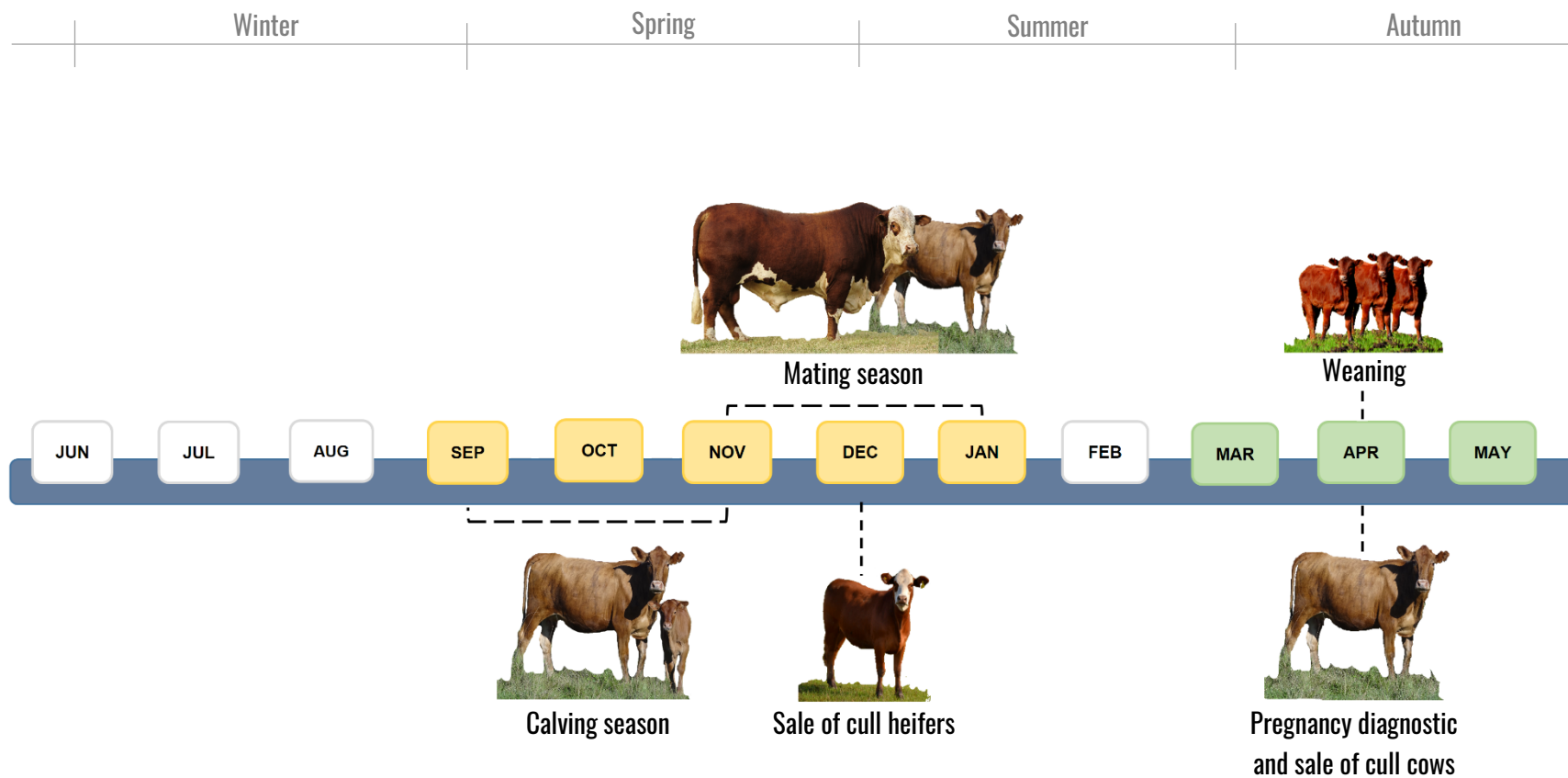


Figura 2. Linha do tempo com os principais processos do ciclo produtivo dos sistemas de cria de bovinos de corte no hemisfério sul.

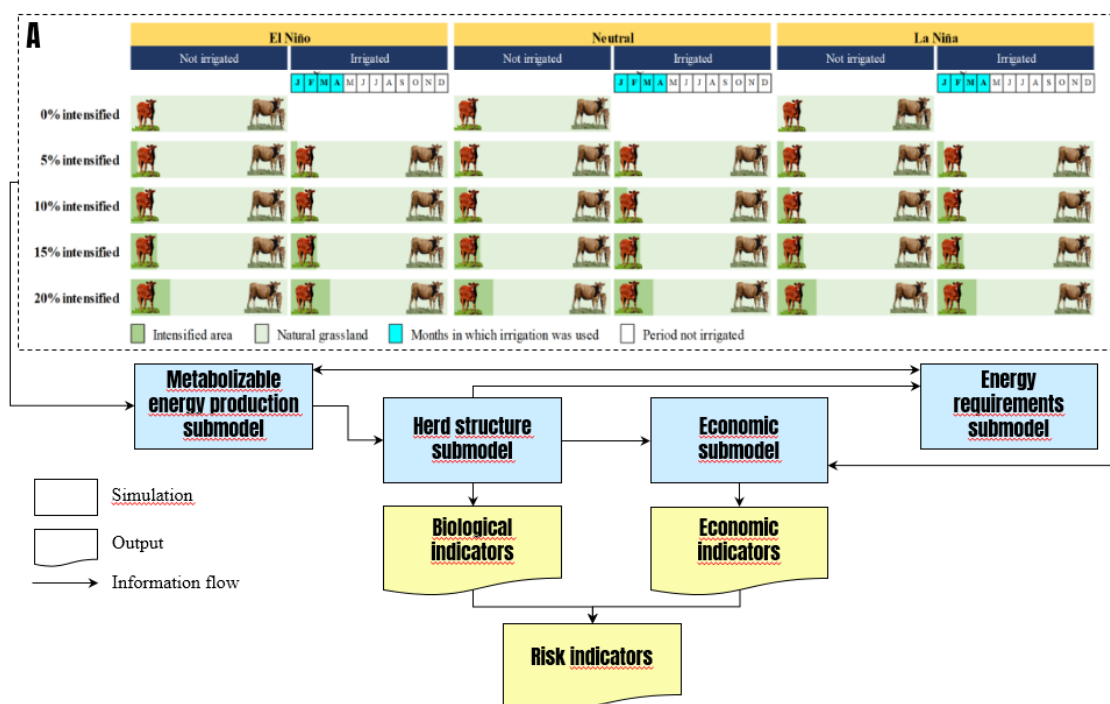


Figura 3. Esquema geral simplificado do modelo conceitual proposto da intensificação dos sistemas de produção da cria de bovinos de corte. Em que A é a configuração dos níveis de intensificação (intervenção).

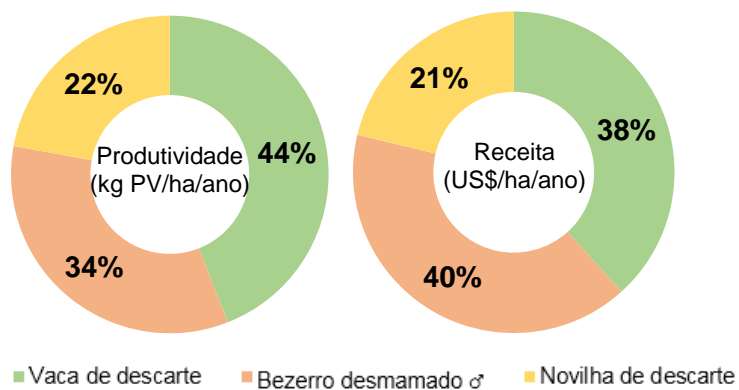


Figura 4. Participação percentual da produção de bezerros desmamados, das vacas de descarte e novilhas de descarte sobre a produtividade e receita anual, em um horizonte de 10 anos.

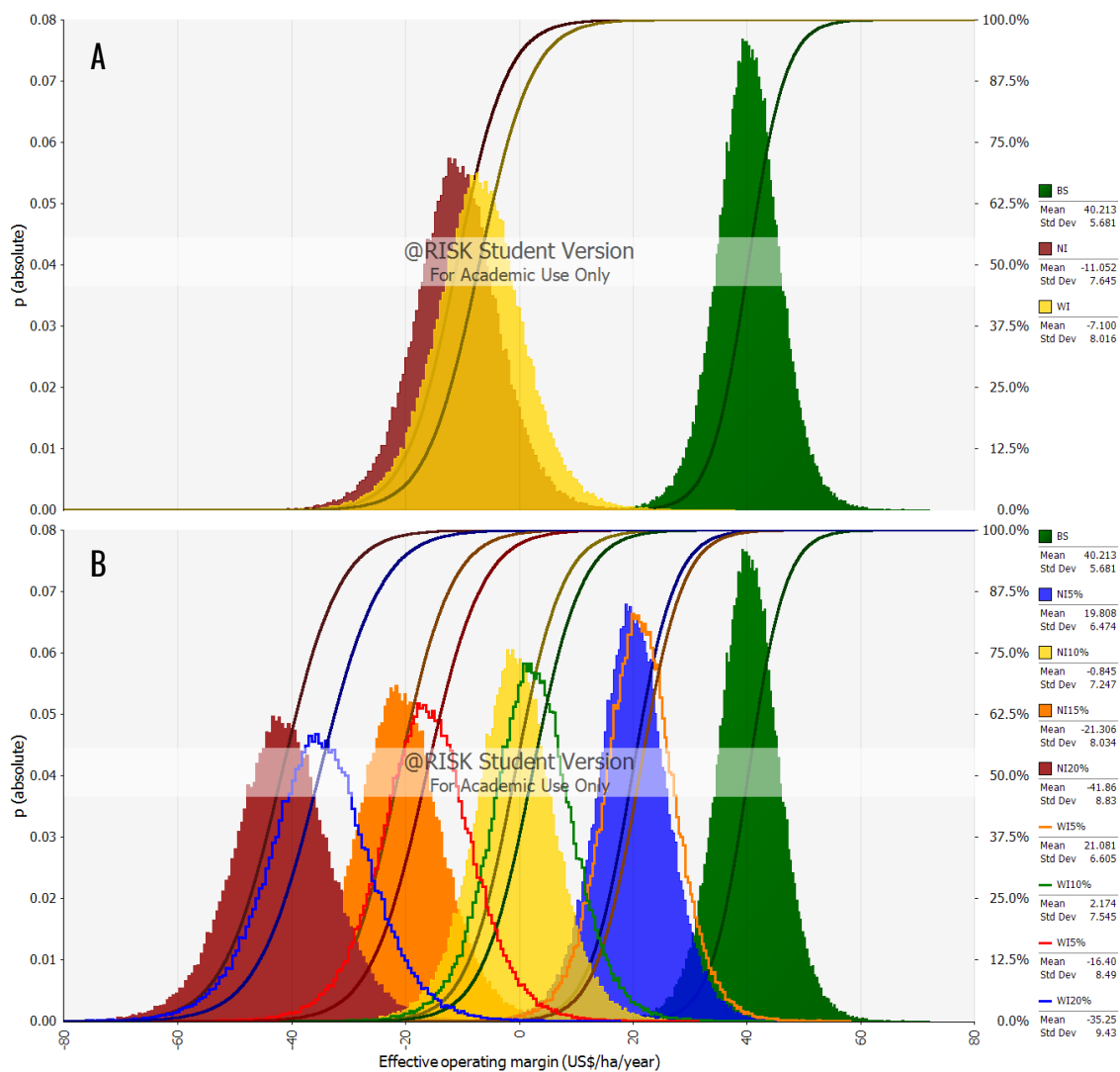


Figura 5. Portfólio de risco da margem operacional efetiva, em um horizonte de 10 anos, em diferentes níveis de intensificação da cria de bovinos de corte com e sem uso de irrigação de pastagem. BS = cenário base; NI = média dos cenários intensificados sem irrigação; WI = média dos cenários intensificados com irrigação (A, acima). Para mais detalhes sobre os cenários de B (abaixo), ver Tabela 1.

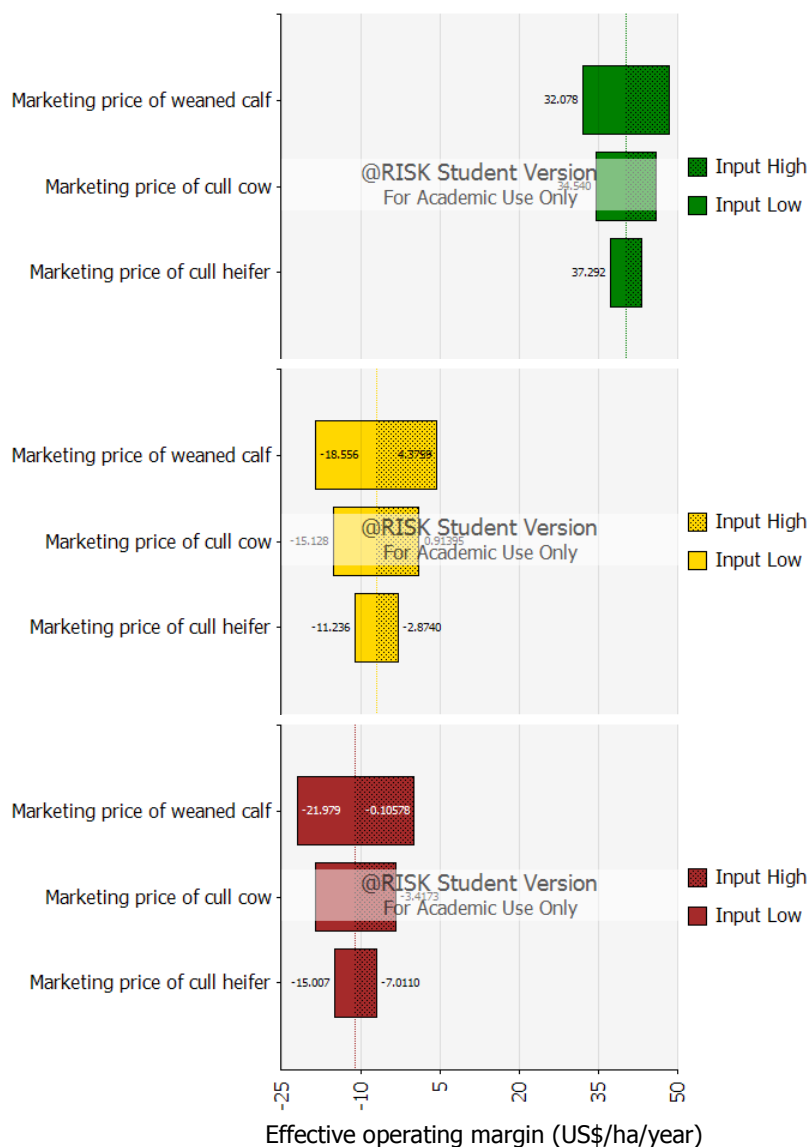


Figura 6. Análise de sensibilidade da margem operacional efetiva em decorrência da variação dos preços de mercado do bezerro desmamado, da vaca e da novilha de descarte, no BS (cenário base; barras verdes), na média dos cenários intensificados com irrigação (WI5%, WI10%, WI15% e WI20%; barras amarelas) e na média dos cenários intensificados sem irrigação (NI5%, NI10%, NI15% e NI20%; barras vermelhas). Os inputs foram ranqueados de acordo com o efeito na média da saída.

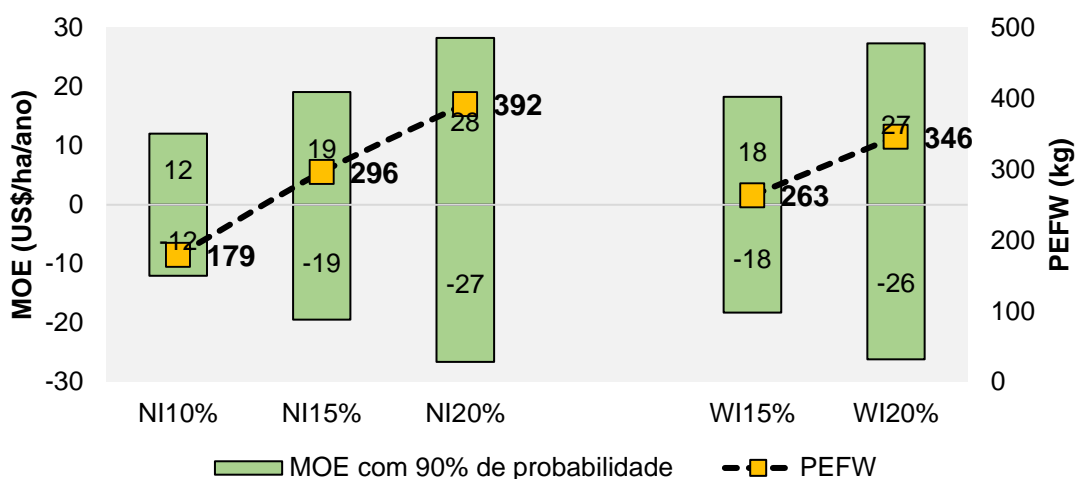


Figura 7. Otimização estocástica do peso do bezerro à desmama necessário (PEFW = ponto de equilíbrio físico) para neutralizar o custo operacional efetivo e seu respectivo impacto na MOE (margem operacional efetiva), com uma probabilidade de ocorrência de 90%.

Estes resultados foram apresentados somente nos cenários em que a MOE foi negativa (sem irrigação, NI10%, NI15% e NI20%; com irrigação, WI15% e WI20%).

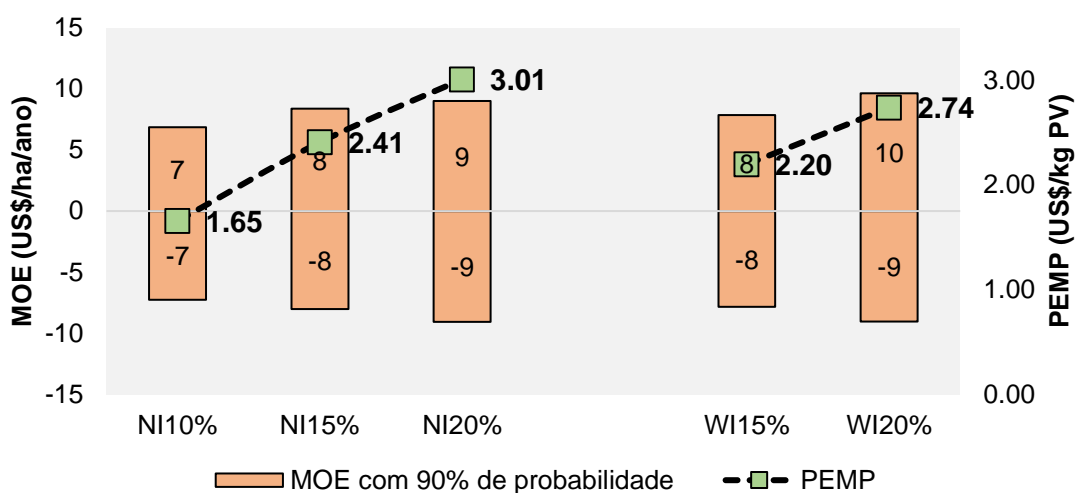


Figura 8. Otimização estocástica do preço do bezerro à desmama necessário (PEMP = ponto de equilíbrio monetário) para neutralizar o custo operacional efetivo e seu respectivo impacto na MOE (margem operacional efetiva), com uma probabilidade de ocorrência de 90%.

Estes resultados foram apresentados somente nos cenários em que a MOE foi negativa (sem irrigação, NI10%, NI15% e NI20%; com irrigação, WI15% e WI20%).

Tabela 1. Descrição geral dos cenários no horizonte de 10 anos.

Cenário	Irrigado	Área intensificada	Área de campo natural	Área total (ha)
		(ha)	(ha)	
BS	Não	0	1000	1000
NI5%	Não	50	950	1000
NI10%	Não	100	900	1000
NI15%	Não	150	850	1000
NI20%	Não	200	800	1000
WI5%	Sim	50	950	1000
WI10%	Sim	100	900	1000
WI15%	Sim	150	850	1000
WI20%	Sim	200	800	1000

BS = cenário base; NI = não irrigado; WI = com irrigação.

Os cenários descritos nesta tabela já integram os efeitos do El Niño-Southern oscillation (ENSO).

A área intensificada consistiu na utilização de uma pastagem de capim sudão durante o verão (janeiro a abril) e uma pastagem de azevém em consórcio com aveia durante o inverno (junho a novembro).

Table 2. Parâmetros do submodelo estrutura de rebanho

Parâmetro	Valor/descrição	Unidade	Referência
Stayability	8	Anos	Bertazzo et al. (2004)
Idade ao primeiro acasalamento das novilhas	27	Meses	Dill et al. (2015)
Risco de prenhez da vaca de primeira cria (novilhas)	90	%	Vieira et al. (2006)
Risco de prenhez da vaca de segunda cria (primíparas)	76	%	Ciccioli et al. (2003)
Risco de prenhez múltiparas	80	%	Santos, (2004)
Probabilidade de sobrevivência da natalidade até desmama	97	%	Dill et al. (2015)
Probabilidade de sobrevivência da desmama até primeiro ano de idade	98	%	Mazzetto et al. (2015)
Probabilidade de sobrevivência novilhas um ano	97	%	Potter et al. (1998)
Probabilidade de sobrevivência das vacas de primeira cria	98	%	Mazzetto et al. (2015)
Probabilidade anual de sobrevivência das vacas de segunda, múltipara e última cria	98	%	Mazzetto et al. (2015)
Percentual de utilização de touros em relação a quantidade de vacas	2.5	%	Menegassi et al. (2011)
Peso do bezerro à desmama	173	kg	Dill et al. (2015)
Peso da vaca de descarte	405	kg	Potter et al. (1998)
Peso da novilha de descarte em dezembro ¹	305	kg	Cardoso et al. (2016)
Peso da novilha de descarte em abril ²	334	kg	Freer et al. (2012)
Época média de entoure	Dezembro		Oaigen et al. (2009)
Diagnóstico de prenhez e desmama dos bezerros	Abril		Oaigen et al. (2008)
Época média de parição	Outubro		Oaigen et al. (2008)

¹ Neste mês é contabilizado o excedente de novilhas após a reposição de matrizes no rebanho.

² Neste mês é contabilizado o excedente de novilhas após o diagnóstico de gestação.

Tabela 3. Valores dos parâmetros do submodelo produção de energia

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Unidade	Referência
Campo natural														
El Niño														
Taxa diária de acúmulo	18.2	22.5	18.3	8.4	12.9	8.3	9.3	7.5	11.9	23.0	19.4	21.0	kg MS/ha/d	[1]
Massa de forragem	1413.5	1456.1	1657.6	1657.0	1565.9	1463.2	1412.0	1319.9	1376.8	1471.3	1588.4	1551.1	kg MS/ha	[1]
Nutrientes digestíveis totais	53.5	53.5	53.5	53.5	56.5	56.5	56.5	56.5	56.5	54.1	54.1	54.1	%	[2]
Neutro														
Taxa diária de acúmulo	9.9	12.3	15.2	16.0	9.7	12.8	12.4	7.2	7.1	14.3	14.3	13.1	kg MS/ha/d	[1]
Massa de forragem	1094.1	1189.7	1365.5	1271.0	1438.7	1294.5	1268.5	1204.6	1279.8	1303.2	1340.3	1438.9	kg MS/ha	[1]
Nutrientes digestíveis totais	53.5	53.5	53.5	53.5	56.5	56.5	56.5	56.5	56.5	54.1	54.1	54.1	%	[2]
La Niña														
Taxa diária de acúmulo	5.9	10.3	11.4	10.1	5.2	6.5	10.0	7.2	6.7	8.0	7.7	9.2	kg MS/ha/d	[1]
Massa de forragem	928.6	1030.3	1034.9	1151.8	1192.5	1239.8	1220.3	1165.0	1198.0	1178.3	1127.8	1050.8	kg MS/ha	[1]
Nutrientes digestíveis totais	53.5	53.5	53.5	53.5	56.5	56.5	56.5	56.5	56.5	54.1	54.1	54.1	%	[2]
Capim sudão														
Irrigado														
Taxa diária de acúmulo	243.9	208.1	98.8	44.6									kg MS/ha/d	[3]
Nutrientes digestíveis totais	59.5	57.6	58.8	57.9									%	[4]
El Niño														
Taxa diária de acúmulo	217.0	185.2	87.9	39.7									kg MS/ha/d	[5]
Nutrientes digestíveis totais	59.5	57.6	58.8	57.9									%	[4]
Neutro														
Taxa diária de acúmulo	220.8	143.6	57.6	33.3									kg MS/ha/d	[3;5]
Nutrientes digestíveis totais	59.5	57.6	58.8	57.9									%	[4]
La Niña														
Taxa diária de acúmulo	154.7	124.1	54.8	17.8									kg MS/ha/d	[3;5]
Nutrientes digestíveis totais	59.5	57.6	58.8	57.9									%	[4]
Azevém consorciado com aveia														
El Niño														
Taxa diária de acúmulo						40.1	30.2	44.4	40.0	41.0	42.3		kg MS/ha/d	[6;7]
Massa de forragem						1000.2	1042.8	1068.8	1150.7	1233.8	1224.6		kg MS/ha	[6;7]
Nutrientes digestíveis totais						60.7	60.2	60.5	58.6	55.7	44.8		%	[8;9]
Neutro														
Taxa diária de acúmulo						48.2	50.4	52.8	45.8	50.7	52.4		kg MS/ha/d	[8;10]
Massa de forragem						1132.1	1455.5	1345.7	1693.0	1816.4	1803.0		kg MS/ha	[8;10]
Nutrientes digestíveis totais						60.7	60.2	60.5	58.6	55.7	44.8		%	[8;9]
La Niña														
Taxa diária de acúmulo						22.9	56.8	45.5	49.9	53.8	55.5		kg MS/ha/d	[11]
Massa de forragem						1000.2	1042.8	1068.8	1150.7	1233.8	1224.6		kg MS/ha	[11]
Nutrientes digestíveis totais						60.7	60.2	60.5	58.6	55.7	44.8		%	[8;9]

[1] = Carvalho et al. (2017); [2] = de Freitas (1975); [3] = Schittenhelm and Schroetter (2014); [4] = Filho et al. (2010); [5] = Zamfir et al. (2001); [6] = Soares et al. (2001); [7] = Macari et al. (2006); [8] = Roso et al. (1999); [9] = Piazzetta et al. (2009); [10] = Restle et al. (1999); [11] = Frizzo et al. (2003).

Tabela 4. Parâmetros do submodelo produção de energia das pastagens

Parâmetro	Valor/descrição	Unidade	Referência
Evento climático	El Niño, Neutro, La Niña		
Tipo de pastagem	Campo natural, Azevém+Aveia, Capim sudão		
Época do ano	Mês		
Taxa diária de acúmulo		kg MS/ha/d	
Massa de forragem		kg MS/ha	
Nutrientes digestíveis totais		%	
Fator de utilização do campo natural	26	%	Trindade, (2011)
Fator de utilização do azevém em consorcio com aveia	65	%	Silveira, (2001)
Fator de utilização do Capim Sudão	61	%	Portugal, (2016)
Oferta de forragem	12	% PV	Trindade et al. (2016)

Tabela 5. Variáveis aleatórias, seus parâmetros de distribuição de probabilidade e o peso médio das categorias animais comercializados.

Item	Unidade	Probability distribution	μ	σ	Min.	Max.
Preço do bezerro em abril	US\$/kg PV	Logistic	1.63	0.23	$-\infty$	$+\infty$
Preço da vaca de descarte em abril	US\$/kg PV	Laplace	1.18	0.12	$-\infty$	$+\infty$
Preço da novilha de descarte em abril	US\$/kg PV	Laplace	1.31	0.15	$-\infty$	$+\infty$
Preço da novilha de descarte em dezembro	US\$/kg PV	Normal	1.37	0.18	$-\infty$	$+\infty$
Custo adicional de 1 kg PV de bezerro em creep feeding	US\$/kg PV	Normal	0.53	0.08	$-\infty$	$+\infty$
Peso do bezerro à desmama	kg PV	-	173.26	-	-	-
Peso da vaca de descarte em abril	kg PV	-	405.08	-	-	-
Peso da novilha de descarte em abril	kg PV	-	333.84	-	-	-
Peso da novilha de descarte em dezembro	kg PV	-	305.21	-	-	-

Tabela 6. Efeito da intensificação sobre parâmetros biofísicos e econômicos da cria de bovinos de corte.

Parâmetros	Unidade	Níveis de intensificação*		
		Cenário base	Sem irrigação	Com irrigação
Produtividade (Pr)	kg PV/ha/ano	57	77	81
Receita	US\$/ha/ano	78.6	105.9	111.0
Custo operacional efetivo (COE)	US\$/ha/ano	37.9	116.4	117.5
Eficiência econômica	Pr/US\$ 100 COE	151	71	73
Margem operacional efetiva	US\$/ha/ano	40.6	-10.5	-6.5

*O cenário base corresponde ao sistema sem intensificação e sem irrigação, o cenário sem irrigação à média dos cenários intensificados sem irrigação (NI5%, NI10%, NI15% e NI20%) e o cenário com irrigação à média dos cenários intensificados com irrigação (WI5%, WI10%, WI15% e WI20%) em um horizonte de 10 anos.

Tabela 7. Parâmetros físicos e econômicos da intensificação da cria de bovinos de corte, resultados médios anais de um horizonte de 10 anos.

Parâmetros	Unidade	Níveis de intensificação								
		BS	NI5%	NI10%	NI15%	NI20%	WI5%	WI10%	WI15%	WI20%
Físicos										
Área	haa	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Produção de energia metabolizável	Tcal/ano	10.6	12.0	13.5	14.9	16.4	12.3	14.0	15.7	17.5
Produtividade (Pr)	kg PV/ha/ano	57	65	73	81	89	67	76	86	95
Produção de bezerros	Cabeças/ano	112	127	143	158	174	130	148	167	185
Produção de vacas de descarte	Cabeças/ano	62	71	80	88	97	73	83	94	104
Produção de novilhas de descarte	Cabeças/ano	39	44	50	55	61	45	52	58	65
Econômicos										
Receita	US\$/ha/ano	78.6	89.6	100.3	111.3	122.2	91.4	104.4	117.6	130.5
Custo operacional efetivo (COE)	US\$/ha/ano	37.9	69.3	100.7	132.0	163.4	69.8	101.7	133.4	165.1
Custo operacional total	US\$/ha/ano	47.7	79.0	110.4	141.8	173.2	84.4	118.7	154.0	190.8
Custo total	US\$/ha/ano	101.5	134.2	166.8	199.5	232.2	139.5	175.2	211.8	249.9
Margem operacional efetiva	US\$/ha/ano	40.6	20.3	-0.3	-20.7	-41.2	21.5	2.7	-15.8	-34.6
Margem operacional total	US\$/ha/ano	30.9	10.5	-10.1	-30.5	-51.0	7.0	-14.3	-36.4	-60.3
Margem líquida	US\$/ha/ano	-22.9	-44.6	-66.5	-88.2	-110.1	-48.1	-70.7	-94.2	-119.4
Eficiência econômica	Pr/US\$ 100 COE	151	94	73	61	55	95	75	64	58

BS = cenário base; NI = não irrigado; WI = com irrigação.

Para mais detalhes sobre os níveis de intensificação, ver Tabela 1.

Tabela 8. Efeito anual do nível de intensificação associado ao evento climático sobre parâmetros econômicos (US\$/ha/ano).

Cenário*	Custo operacional efetivo	Receita	Margem operacional efetiva	Margem operacional total	Margem líquida
Sem irrigação					
La Niña 0%	35.9	63.8	27.9	18.2	-35.5
Neutro 0%	37.7	77.1	39.4	29.6	-24.2
El Niño 0%	39.6	90.8	51.2	41.5	-12.4
La Niña 5%	67.1	73.4	6.3	-3.5	-58.5
Neutro 5%	69.3	89.3	20.1	10.4	-44.8
El Niño 5%	70.9	100.8	29.9	20.2	-35.0
La Niña 10%	98.3	83.1	-15.2	-24.9	-81.3
Neutro 10%	100.7	100.8	0.1	-9.7	-66.1
El Niño 10%	102.2	111.1	8.9	-0.8	-57.3
La Niña 15%	129.5	92.3	-37.2	-46.9	-104.6
Neutro 15%	132.3	113.1	-19.2	-28.9	-86.7
El Niño 15%	133.4	121.1	-12.3	-22.1	-79.9
La Niña 20%	160.7	101.9	-58.8	-68.5	-127.5
Neutro 20%	163.8	124.8	-39.0	-48.7	-107.8
El Niño 20%	164.7	131.4	-33.3	-43.0	-102.2
Com irrigação					
La Niña 5%	67.9	77.1	9.2	-5.4	-60.4
Neutro 5%	69.8	90.8	21.1	6.5	-48.6
El Niño 5%	71.2	101.9	30.6	16.1	-39.1
La Niña 10%	99.9	90.1	-9.8	-26.8	-83.2
Neutro 10%	101.8	104.8	3.1	-13.9	-70.4
El Niño 10%	102.9	113.3	10.5	-6.5	-63.0
La Niña 15%	131.6	103.3	-28.2	-48.9	-106.6
Neutro 15%	133.6	119.3	-14.2	-34.9	-92.7
El Niño 15%	134.2	124.1	-10.1	-30.8	-88.6
La Niña 20%	163.4	116.6	-46.7	-72.4	-131.5
Neutro 20%	165.4	133.3	-32.1	-57.8	-117.0
El Niño 20%	165.7	135.1	-30.6	-56.3	-115.5

*O valor percentual de cada cenário representa o percentual de área intensificada conforme elucidado na Tabela 1, sendo que 0% corresponde ao cenário base de intensificação (BS).

Tabela 9. Matriz de custo anual (US\$) por nível de intensificação da cria de bovinos de corte, resultados médios de um horizonte de 10 anos.

Classificação dos custos	BS	Níveis de intensificação								Referência
		NI5%	NI10%	NI15%	NI20%	WI5%	WI10%	WI15%	WI20%	
A CUSTOS VARIÁVEIS (CV)										
1 Pastagem de azevém em consórcio com aveia ^a	-	17789	35578	53367	71156	17789	35578	53367	71156	[1]
2 Pastagem de capim sudão ^b	-	12486	24971	37457	49943	12486	24971	37457	49943	[2]
3 Reprodução	4815	5480	6141	6806	7474	5604	6393	7176	7965	[3]
4 Suplementação mineral	3812	4338	4861	5387	5916	4436	5060	5681	6305	[4]
5 Pastagem natural ^c	3477	3303	3129	2955	2781	3303	3129	2955	2781	[3]
6 Sanidade	1443	1643	1841	2040	2240	1680	1916	2151	2388	[3]
Subtotal	13547	45038	76521	108012	139510	45297	77047	108787	140537	
B CUSTOS SEMIFIXOS (CSF)										
7 Combustíveis	4636	4404	4172	3940	3708	4404	4172	3940	3708	[3]
8 Energia elétrica e telefonia	365	415	465	516	566	424	484	544	603	[4]
9 Energia elétrica para irrigação	-	-	-	-	-	241	479	474	563	[5;6]
10 Sede	240	273	306	339	372	279	319	358	397	[4]
11 Contabilidade	214	243	273	302	332	249	284	319	354	[4]
Subtotal	5454	5335	5216	5097	4979	5597	5738	5634	5626	
C CUSTOS FIXOS (CF)										
12 Mão de obra	18939	18939	18939	18939	18939	18939	18939	18939	18939	[4]
13 Depreciações	3024	3024	3024	3024	3024	7850	10287	13936	18990	[4]
14 Imposto territorial rural	3610	3610	3610	3610	3610	3610	3610	3610	3610	[7]
15 Manutenções	1931	1931	1931	1931	1931	1931	1931	1931	1931	[3]
16 Seguros	1159	1159	1159	1159	1159	1159	1159	1159	1159	[3]
Subtotal	28663	28663	28663	28663	28663	33490	35926	39575	44630	
D RENDA DOS FATORES (CRF)										
17 Remuneração da terra	53233	53233	53233	53233	53233	53233	53233	53233	53233	[8]
18 Remuneração do capital de giro	569	1892	3214	4537	5860	1903	3236	4570	5903	[9]
Subtotal	53802	55125	56448	57770	59093	55136	56470	57803	59137	
E CUSTO OPERACIONAL EFETIVO (COE = A + B + 12)	37940	69312	100676	132048	163427	69833	101724	133359	165101	
F CUSTO OPERACIONAL TOTAL (COT = A + B + C)	47664	79036	110400	141772	173152	84384	118712	153995	190792	
G CUSTO TOTAL (CT = A + B + C + D)	101466	134161	166848	199542	232245	139520	175181	211798	249929	

^{a,b}Refere-se aos custos decorrentes de todo o processo de estabelecimento e manejo da pastagem; ^csão custos associados aos processos de manutenção.

[1] = Frizzo et al. (2003); [2] = Silveira et al. (2015); [3] = Oaigen et al. (2009); [4] = ANUALPEC, (2017); [5] = KREBS, (2017); [6] = RGE Sul, (2017); [8] = Soares et al. (2015); [9] = Sartorello et al. (2018).

CAPÍTULO IV

7. CONCLUSÕES

De forma geral, o modelo desenvolvido permitiu entender o processo de como ocorre a resposta bioeconômica decorrente dos níveis de intensificação nos sistemas de cria de bovinos de corte, sendo que a principal resposta produtiva foi em decorrência do aumento do número de matrizes no rebanho, e conseqüentemente na quantidade de bezerros desmamados, especialmente como resultado do uso da irrigação. Assim, a intensificação na cria tem consideráveis impactos biofísicos, especialmente na produtividade. Não obstante, com os valores dos parâmetros usados nesta análise, esses impactos não conseguem amortecer o custo total de produção, mostrando ineficiência econômica nos cenários avaliados, e conseqüentemente sinalizando descapitalização dos bens de operação ao não gerar resultados econômicos suficientes para substituí-los após seu período de vida útil.

Apesar disso, a tecnologia de irrigação se mostra como minimizadora do risco econômico frente às mudanças climáticas, ainda que não seja capaz de neutralizar o prejuízo. No entanto, dados os benefícios na produtividade da cria de bovinos de corte no sul do Brasil, o desafio continua sendo encontrar formas de tornar a irrigação de pastagens mais eficiente ou explorar cenários alternativos que melhorem a eficiência bioeconômica, a fim de alcançar um sistema robusto que permaneça economicamente viável no futuro.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os modelos bioeconômicos, ao permitir avaliar a complexidade na produção animal, são ferramentas que auxiliam os tomadores de decisão e os pesquisadores a analisar os *trade-offs* entre as inúmeras possibilidades e riscos associados à produção. Além disso, fornecem informação valiosa que pode ajudar a direcionar os sistemas de produção na busca de uma melhor sustentabilidade.

A lógica da proposta do modelo desenvolvido, poderá ser utilizada para avaliar os efeitos sistêmicos de possíveis intervenções de intensificação em sistemas de produção de bovinos de corte. A análise do sistema e sua síntese, através dos submodelos produção de energia, estrutura de rebanho, exigências de energia dos animais e o econômico, permitiu entender as respostas da intensificação em um sistema de cria, utilizando níveis de produção de energia por meio de pastagens cultivadas e a irrigação, sobre parâmetros bioeconômicos.

Este estudo revela que a intensificação com irrigação pode aumentar a produtividade em 66%, intensificando no máximo 20% da área. Isto considerando os efeitos dos eventos climáticos que podem ocorrer nos sistemas de produção em um horizonte de 10 anos. Assim, fica evidente o impacto biofísico no sistema, provocado pelo incremento de energia, em decorrência da intervenção de intensificação. Não obstante, ditos impactos biofísicos não conseguiram arcar o custo total associado à produção, indicando a descapitalização do sistema ao longo do tempo. Portanto, os resultados obtidos neste estudo rejeitam parcialmente a hipótese inicial.

Embora, esses impactos biofísicos não conseguiram amortecer o custo total de produção, inclusive no sistema base de produção em campo natural do bioma pampa, a irrigação se mostrou como minimizadora do risco econômico, frente às mudanças climáticas, ao estabilizar a produção de energia no sistema. A baixa eficiência biológica da cria de bovinos de corte pode explicar o prejuízo econômico, já que do total de energia metabolizável requerida anualmente, aproximadamente 70 a 75% é usada para atender as necessidades das funções de manutenção da vaca. Isto pode estar sugerindo duas situações associadas, direta ou indiretamente à cria. A primeira, é a criação de estratégias que permitam aumentar o peso do bezerro à desmama, e a segunda, desacoplada da primeira, a necessidade de aumentos no preço de mercado do bezerro. Neste quesito, a análise de otimização estocástica é de grande valia ao permitir, considerando a incerteza dos preços de mercado, encontrar o ponto de equilíbrio físico e econômico em cada um dos cenários avaliados, auxiliando a tomada de decisão dos atores da atividade.

Em um contexto holístico de propriedade, as considerações supracitadas podem estar sinalizando três perspectivas sobre o arranjo de produção. A primeira é a necessidade de avaliar as respostas da intensificação, exclusivamente, no complexo campo natural, sobre parâmetros bioeconômicos da cria de bovinos de corte. A segunda, avaliar a intensificação integrando outras fases produtivas de maior eficiência biológica como a recria, a terminação ou o ciclo completo. E a terceira, avaliar cenários alternativos que aumentem a

eficiência bioeconômica da cria por meio de relações de eficiência entre o custo da terra, o custo de produção, a produção por área e o preço do produto.

8.1 Considerações pessoais

Saindo do ordinal, gostaria de deixar aqui o registro de algumas considerações pessoais que acredito podem ser úteis para os colegas que pretendam incursionar no mundo da modelagem de sistemas agropecuários. Apesar desta área de estudo ter seus primórdios na década do 90, são poucas as pessoas que trabalham na América do Sul no desenvolvimento de modelos de simulação. Portanto, uma das primordiais preocupações do pesquisador deveria ser entender profundamente os princípios biológicos de funcionamento do sistema em questão, para posteriormente partir para as etapas de elaboração de um modelo de simulação (item 2.2.3 desta tese).

Desta maneira, é preciso evitar cair em uma das principais armadilhas nesta área de estudo, que é tomar atalhos, pulando conceitos básicos biológicos e de dinâmica de populações e partir para preocupações de cunho operacional. Neste sentido, após esse primeiro passo de entendimento e domínio do circunscrito ao problema de pesquisa, sugiro procurar material de alta qualidade na área da modelagem (por exemplo, Jorgensen & Fath, 2011) para entender os conceitos e preceitos que regem essa maraviolosa área de estudo.

Uma das disciplinas que mais contribuiu na direção do estudo sobre modelos de simulação foi *Sistemas de Produção de Bovinos de Corte*, ministrada pelo Prof. Júlio Barcellos no Programa de Pós-Graduação em Zootecnia-UFRGS. Um outro aspecto que contribuiu muito em meu trabalho de pesquisa foi partir para outros Programas de Pós-graduação onde me deparei com a disciplina de *Modelagem Estocástica*, ministrada pelo Prof. João Becker no Programa de Pós-Graduação em Administração-UFRGS.

Além disso, a avaliação de sistemas de produção requer do pesquisador uma boa habilidade de comunicação com profissionais de diversas áreas ao serem abordagens de cunho transdisciplinar, ou seja, de relação complexa dos diversos saberes. Foram muitas as trocas de experiência que o NESPro facilitou na minha formação e especialmente no desenvolvimento deste projeto. Dentre delas vale destacar o trabalho colaborativo que realizamos com o INIA (Uruguai) na pessoa do Dr. Juan Manuel Soares de Lima, sobre dinâmica de populações e com o Prof. Rodrigo Allende da Universidade de Concepción (Chile) sobre modelos de exigências nutricionais.

Por fim, poderia mencionar muitas considerações pessoais sobre o que me permitiu culminar com êxito mais uma etapa importante na minha vida, mas gostaria de destacar como uma das mais importantes, a constante comunicação que criamos entre meu mentor, Prof. Júlio Barcellos e eu. Esta, ao meu ver, foi o canal de sucesso deste projeto de pesquisa.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR, C.; ALLENDE, R.; MORALES, S. **Gestión de sistemas pecuários, Modelos para Evaluar Alternativas Tecnológicas y Creación de Valor en la Empresa Pecuaria**. Colección en Agricultura, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal., Santiago: Pontificia Universidad Católica de Chile, 2003. 633 p.

ALBERTO, C. M. et al. Água no solo e rendimento do trigo, soja e milho associados ao El Niño Oscilação Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n. 7, p. 1067-1075, 2006.

ANUALPEC: Anuário da Pecuária Brasileira. São Paulo, Brazil: Instituto FNP, AGRA FNP Pesquisas Ltda, 2015.

ANUALPEC: Anuário da Pecuária Brasileira. São Paulo, Brazil: Instituto FNP, AGRA FNP Pesquisas Ltda, 2017.

ARCHER, J. A. et al. Potential for selection to improve efficiency of feed use in beef cattle: a review. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v. 50, p. 147-161, 1999.

ARTHUR, P. F. et al. Maternal productivity of Angus cows divergently selected for post-weaning residual feed intake. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Collingwood, v. 45, p. 985-993, 2005.

ASH, A. et al. Boosting the productivity and profitability of northern Australian beef enterprises: Exploring innovation options using simulation modelling and systems analysis. **Agricultural Systems**, Essex, v. 139, p. 50-65, 2015.

AUGUSIAK, J.; VAN DEN BRINK, P. J.; GRIMM, V. Merging validation and evaluation of ecological models to 'evaluation': a review of terminology and a practical approach. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 280, p. 117-128, 2014.

AUMANN, C. A. A methodology for developing simulation models of complex systems. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 202, n. 3-4, p. 385-396, 2007.

AZEVEDO, L. P.; SAAD, J. C. C. Irrigação de pastagens via pivô central, na bovinocultura de corte. **Irriga**, Botucatu, v. 14, p. 492-503, 2009.

BABER, J. R. et al. An Economic Comparison between Limit-Fed and Conventional Cow-Calf Production Systems During Periods of Reduced Forage Availability. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 95 (suppl_1), p. 14-14, 2016.

- BAGLEY, C. P. Nutritional management of replacement beef heifers: a review. **Journal of animal science**, Champaign, v. 71, n.11, p. 3155-3163, 1993.
- BAILEY, C. M. et al. Life-cycle evaluation of *Bos taurus* and *Bos indicus* x *Bos taurus* breed types in a dry, temperate climate: performance of mature dams. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 68, p. 960–968, 1990.
- BAKER, R. L.; CARTER, A. H. Influences of breed and crossbreeding on beef cow perform. **Proceedings of the Ruakura Farmer Conference**, Hamilton, v. 9, p. 39-44, 1976.
- BARCELLOS, J. O. J. et al. Taxas de prenhez em novilhas de corte acasaladas aos 18 e 24 meses de idade. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v. 58, p. 1168-1173, 2006.
- BARCELLOS, J. O. J. et al. A reconfiguração dos sistemas de produção de bovinos de corte para a próxima década. In: JORNADA NESPRO, 8., SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE BOVINOS DE CORTE, 1., Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: NESPRO/UFRGS, 2013. p.197-221.
- BARCELLOS, J. O. J. et al. Sistemas pecuários no sul do Brasil – “zona campos”: tecnologias e perspectivas. In: REUNIÓN DE GRUPO TÉCNICO EM FORRAGERAS DEL CONO SUR - ZONA CAMPOS. Mercedes. **Anais...** Mercedes: Estación Experimental Agropecuaria Mercedes, 2002. p. 10-15.
- BARCELLOS, J. O. J.; CANELLAS, L. C.; LAMPERT, V. N. Gestão de Tecnologias para Pecuária de Corte. In: SEMINARIO INTERNACIONAL CALIDAD Y TECNOLOGÍA DE CARNES ROJAS, 2009, Temuco. **Anais.** Temuco, 2009. p. 75-90.
- BARCELLOS, J. O. J. et al. **Crescimento de fêmeas bovinas de corte aplicado aos sistemas de cria**. Porto Alegre: UFRGS, 2003. 72p. (Sistemas de Produção em Bovinos de Corte. Publicação Ocasional, 1).
- BENOIT, M.; LAIGNEL, G. Sheep-for-meat farming systems in French semi-upland area. Adapting to new context: increased concentrates and energy prices, and new agricultural policy. **International Journal of Sustainable Development**, Olney, v. 17, p. 35-48, 2014.
- BERETTA, V. et al. Produtividade e eficiência biológica de sistemas pecuários de cria diferindo na idade das novilhas ao primeiro parto e na taxa de natalidade do rebanho no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 1278-1286, 2001.
- BERETTA, V.; LOBATO, J. F. P. Sistema "Um Ano" de produção de carne: avaliação de estratégias alternativas de alimentação hiberna de novilhas de

reposição. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 157-163, 1998.

BERGER, H. et al. Feedbase intervention in a cow-calf system in the flooding pampas of Argentina: 2. Estimation of the marginal value of additional feed. **Agricultural Systems**, Essex, 158, 68-77, 2017.

BERLATO, M. A.; FARENZENA, H.; FONTANA, D. C. Associação entre El Niño Oscilação Sul e a produtividade do milho no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.5, p.423-432, 2005.

BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. **El Niño e La Niña**: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul: aplicações de previsões climáticas na agricultura. Porto Alegre: UFRGS, 2003.

BERNDT, A.; TOMKINS, N. Measurement and mitigation of methane emissions from beef cattle in tropical grazing systems: A perspective from Australia and Brazil. **Animal**, Cambridge, v. 7, (S2), p.363-372, 2013.

BLACK, J. L.; DAVIES, G. T.; FEMING, F. F. Rol of Computer Simulation in the Applications of Knowledge to Animal Industries. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v. 44, n.3, p. 541-555, 1993.

BOLZE, R.; CORAH, L. R. **Selection and development of replacement heifers: Cooperative Extension Service**. Manhattan: Kansas State University, 1993. 10 p.

BORGES, P. J. et al. Assessing impacts of common agricultural policy changes on regional land use patterns with a decision support system. An application in Southern Portugal. **Forest Policy and Economics**, Amsterdam, v. 12, p. 111-120, 2010.

CACHAPUZ, J. M. da S. **O panorama setorial da bovinocultura de corte gaúcha no processo de integração do Mercosul**. 2.ed. Porto Alegre: Emater, 1995. 68p. (Realidade Rural, 7)

CANELLAS, L. C. Recria de fêmeas e idade ao primeiro acasalamento. In: JORNADA NESPRO, 11., 2016, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 2016.

CARARETO, E. S. et al. Gestão estratégica de custos: custos na tomada de decisão. **Revista de Economia da Universidade Estadual de Goiás**, Anápolis, v. 2, n. 2, p. 1-24, jul/dec. 2006.

CARVALHO, P. C. F. et al. Produção animal no bioma campos sulinos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 35, p. 156-202, 2006.

CARVALHO, P. C. F.; MARASCHIN, G. E.; NABINGER, C. Potencial produtivo do campo nativo do rio grande do sul. In: SUPLEMENTAÇÃO DE RUMINANTES EM PASTEJO, 1998, Porto Alegre. **Anais**. Porto Alegre, 1998.

CASEY, J.; HOLDEN, N. Greenhouse gas emissions from conventional, agri-environmental scheme, and organic Irish suckler-beef units. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 35, 231-239, 2006.

CHAPMAN, D. F.; KENNY, S. N.; BECA, D.; Johnson, I. R. Pasture and forage crop systems for non-irrigated dairy farms in southern Australia. 2. Inter-annual variation in forage supply, and business risk. **Agricultural Systems**, Essex, v. 97, 126-138, 2008.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Custos de produção agrícola: a metodologia da Conab. Brasília, CONAB, 2010. 59 p.

CORDEIRO, A. P. A.; BERLATO, M. A. Frequência da temperatura mínima do ar associada a eventos El Niño, La Niña e neutros no Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16., Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SBA, 2009. 1 CD-ROM. Disponível em: <http://www.sbagro.org.br/anais_congresso_2009/cba2009/410.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2014.

CRUZ, P. et al. Laaf traits as functional descriptors of the intensity of continuous grazing in native grasslands in the South of Brazil. **Rangeland Ecology & Management**, Denver, v. 63, n.3, p.350–358. 2010.

CUNHA, G. R.; DALMAGO, G. A.; ESTEFANEL, V. Enso influences on wheat crop in Brazil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n.1, p.127-138, 1999.

DAVIS, M. E. et al. Life cycle efficiency of beef production: I. Cow efficiency ratios for progeny weaned. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 57, 832-851, 1983.

DAVIS, M. E. et al. Life cycle efficiency of beef production. IV. Cow efficiency ratios for progeny slaughtered. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 58, 1119-1137, 1984.

DE OLIVEIRA SILVA, R. et al. Increasing beef production could lower greenhouse gas emissions in Brazil if decoupled from deforestation. **Nature Climate Change**, London, v. 6,n.5, p. 493-497, 2016.

DELAND, M. P. B.; NEWMAN, S. Lifetime productivity of crossbred cows 1. Experimental design, growth and carcass characteristics of progeny. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Collingwood, v. 31, p. 285–292, 1991.

DENT, J. B.; The application of systems theory in agriculture. In: *STUDY of agricultural systems*. London, UK: Applied Science Publishers, 1975. p. 107-127.

DIAS-FILHO, M. B. Produção de bovinos a pasto na fronteira agrícola. In: *ZOOTEC 2010 CONGRESSO BRASILEIRO DE ZOOTECNIA, 20.*, 2010, Palmas. **Anais...** Palmas, 2010. p.131-145.

DIAZ-SOLIS, H. et al. Application of a simple ecological sustainability simulator (SESS) as a management tool in the semi-arid rangelands of northeastern Mexico. **Agricultural Systems**, Essex, v. 88, p. 514–527, 2006.

DILL, M. D. et al. Technologies that affect the weaning rate in beef cattle production systems. **Tropical animal health and production**, Heidelberg, v. 47, p. 1255-1260, 2015.

DRUMOND, L. C. D.; AGUIAR, A. P. A. Irrigação de pastagem. Uberaba: L.C.D. DRUMOND, 2005. 210 p.

ENDECOTT, R. et al. Joint Alpharma-Beef Species Symposium: Implications of beef heifer development systems and lifetime productivity. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 91, n. 3, p. 1329-1335, 2013. ISSN 1525-3163.

FERRELL, C. L.; JENKINS, T. G. Cow Type and the Nutritional Environment: Nutritional Aspects. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 61, p. 725-741, 1985.

FIELDS, M.J.; SAND, R.S.; YELICH, J. V. **Factors affecting calf crop**: Biotechnology of Reproduction. Boca Raton, USA: CRC PRESS, 2002.

FLICHMAN, G. (Ed.). **Bio-economic models applied to agricultural systems**. Netherlands: Springer Science & Business Media, 2011.

FLICHMAN, G.; LOUHICHI, K.; BOISSON, J. M. Modelling the relationship between agriculture and the environment using bio-economic models: some conceptual issues. In: FLICHMAN, G. (Ed.). **Bio-economic models applied to agricultural systems**. Netherlands: Springer Science & Business Media, 2011. p. 3-14.

GALLAGHER, S. et al. **Profitability of irrigation**. South Perth: Department of Agriculture, 2005. (Dairynotes, 13).

GALYEAN, M. L. et al. BOARD-INVITED REVIEW: Efficiency of converting digestible energy to metabolizable energy and reevaluation of the California Net Energy System maintenance requirements and equations for predicting dietary net energy values for beef cattle¹. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 94, 1329-1341, 2016.

GARNETT, T. et al. Sustainable intensification in agriculture: Premises and Policies. **Science**, Washington, v. 341, n. 6141, p. 33-34, 2013.

GASQUES, J. G.; BASTOS, E. T.; VALDES, C. Preços da terra no Brasil. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, SOCIOLOGIA E ADMINISTRAÇÃO RURAL, 46., 2008, Rio Branco. **Anais...** Rio Branco, 2008.

GERBER, P. et al. Productivity gains and greenhouse gas emissions intensity in dairy systems. **Livestock Science**, Amsterdam, v. 139, p. 100-108, 2011.

GERIS, L.; GOMEZ-CABRERO, D. **Uncertainty in biology**. Berlin, Germany: Springer, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-21296-8.

GOCHT, A. et al. Farm type effects of an EU-wide direct payment harmonisation. **Journal of Agricultural Economics**, Oxford, v. 64, p. 1-32, 2013. ISSN:1477-9552.

GONZALEZ, F. A. L. **Avaliação bioeconômica de sistemas de cria de bovinos de corte intensificados com irrigação de pastagens**. 144 f. 2018. Tese (Doutorado em Produção Animal) - Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

GOTTSCHALL, C. S. **Produção e manejo de ruminantes: bovinos de corte.**, Canoas: Ed. ULBRA, 2007.

GOTTSCHALL, C. S.; CANELLAS, L. C. Aspectos relacionados ao manejo de novilhas de corte acasaladas aos 14, 18 ou 24 meses. In: CICLO DE PALESTRAS EM PRODUÇÃO E MANEJO DE BOVINOS, 12., 2007, Canoas. **Anais**. Canoas: Ed da ULBRA, 2007. p. 85-128.

GRIMM, V.; RAILSBACK, S. F. **Individual-Based Modeling and Ecology.**, Princeton: Princeton University Press, 2005. p. 480,

GROSSI, D. A. et al. Genetic associations between accumulated productivity, and reproductive and growth traits in Nelore cattle. **Livestock Science**, Amsterdam, v. 117, 139-146, 2008.

HERRERO, M. et al. Livestock, livelihoods and the environment: understanding the trade-offs. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, Amsterdam, v. 1, p. 111-120, 2009.

HERRING, A. D. **Beef cattle production systems**. Oxfordshire: CABI, 2014.

HERSOM, M. J.; BODINE, T. N.; HERRING, A. JOINT ALPHARMA-BEEF SPECIES SYMPOSIUM: Redefining the Replacement Heifer Paradigm. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 91, n. 3, p. 1321-1322, 2013.

Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.2527/jas.2013-6277> >. Acesso em: 22 abr. 2018.

HOLMES, P. R. The opportunity of a lifetime. Reproductive efficiency in the beef herd. Rahway: MSDAGVET, 1989. 34 p.

HUGH, N. M. C. et al. Genetic parameters for cattle price and body weight from routinely collected data at livestock auctions and commercial farms, **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 89, p. 29-39, 2011.

INFORMATIVO NESPRO & EMBRAPA PECUÁRIA SUL: bovinocultura de corte no Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS: UFRGS, Ano 4, n. 1, 2018.

JACÓBSEN, L. O.; FONTANA, D. C.; SHIMABUKURO, Y. E. Alterações na vegetação em macrozonas do Rio Grande do Sul associados a eventos El Niño e La Niña, usando imagens NOAA. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p.361-374, 2003.

JENKINS, T. G.; FERRELL, C. L. Productivity through weaning of nine breeds of cattle under varying feed availabilities: I. Initial evaluation. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 72, 2787-2797, 1994.

JONES, J. W. et al. Brief history of agricultural systems modeling. **Agricultural Systems**, Essex, Available online 21 June 2016.

JORGENSEN, S. E; FATH, B. D. **Fundamentals of ecological modelling: Applications in environmental management and research**. 4th Ed. The Netherlands: Elsevier, 2011. 399 p.

JUNGES, A. H. et al. Relação entre eventos ENOS e desvios de NDVI e EVI do sensor MODIS em pastagens naturais no Rio Grande do Sul, Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa, PB, Brasil, 2015.

KLUYTS, J. F.; NESER, F. W. C.; BRADFIELD, M. J. Development of breeding objectives for beef cattle breeding: derivation of economic values: review article. **South African Journal of Animal Science**, Pretoria, v. 33, p. 142-158, 2003.

KRAGT, M. E. et al. Improving interdisciplinary collaboration in bio-economic modelling for agricultural systems. **Agricultural Systems**, Essex, v. 143, p. 217-224, 2016.

KVAMSDAL, S. et al. A bridge between continuous and discrete-time bioeconomic models: Seasonality in fisheries. **Ecological modelling**, Amsterdam, v. 364, p. 124-131, 2017.

- LAMB, M. A.; TESS, M. W.; ROBISON, O. W. Evaluation of mating systems involving five breeds for integrated beef production systems: I. Cow–calf segment. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 70, p. 689–699, 1992a.
- LAMB, M. A.; TESS, M. W.; ROBISON, O. W. Evaluation of mating systems involving five breeds for integrated beef production systems. III. Integrated system. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 70, p. 714–722, 1992b.
- LAMPERT, V. D. N. et al. Development and application of a bioeconomic efficiency index for beef cattle production in Rio Grande do Sul, Brazil. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 41, n.3, p.775-782, 2012.
- LANA, R. P.; GOMES, J. R. P. Sistema de suplementação alimentar para bovinos de corte em pastejo: Validação. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 31, n.1, supl., p.451-459, 2002.
- LESCOT, J. M. et al. Bio-economic modeling of wine grape protection strategies for environmental policy assessment. **Operations Research**, Catonsville, v. 14, p. 283-318, 2014.
- MAKEHAM, J. P.; MALCOLM, L. R. *The Farming Game Now*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1993.
- MARTINEZ, G. E. et al. Genetic parameters for six measures of length of productive life and three measures of lifetime production by 6 yr after first calving for Hereford cows. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 82, p. 1912-1918, 2004a.
- MARTINEZ, G. E. et al. Number of calves born, number of calves weaned, and cumulative weaning weight as measures of lifetime production for Hereford cows. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 82, p. 1903-1911, 2004b.
- MÉNDEZ, V.; CAMPOS, D.; BARTUMEUS, F. Random search strategies. In: *STOCHASTIC foundations in movement ecology*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014. p. 177-205.
- MENEGASSI, S. R. O.; BARCELLOS, J. O. J. **Aspectos Reprodutivos do Touro**. Guaíba: Agrolivros, 2015. 280 p. il.
- MODERNEI, P. et al. Identification of beef production farms in the Pampas and Campos area that stand out in economic and environmental performance. **Ecological Indicators**, Germany, v. 89, p. 755-770, 2018. ISSN: 1470-160X.
- MONJARDINO, M. et al. Economic evaluation of irrigated forage production in a beef cattle operation in the semi-arid tropics of northern Australia. **Agricultural Systems**, Essex, v. 139, p. 122-143, 2015.

MONTANHOLI, Y. R. et al. Ganho de peso na recria e desempenho reprodutivo de novilhas acasaladas com sobreano. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 1253-1259, 2004.

MOORE, A. D.; BELL, L. W.; REVELL, D. K. Feed gaps in mixed-farming systems: insights from the Grain & Graze program. **Animal Production Science**, Melbourne, v. 49, p. 736-748, 2009.

MOSNIER, C. et al. A dynamic bio-economic model to simulate optimal adjustments of suckler cow farm management to production and market shocks in France. **Agricultural Systems**, Essex, v. 102, n.1-3, p. 77-88, 2009.

MOSNIER, C. et al. Orfee: A bio-economic model to simulate integrated and intensive management of mixed crop-livestock farms and their greenhouse gas emissions. **Agricultural Systems**, Essex, v. 157, p. 202-215, 2017.

MOURATIADOU, I. et al. Modelling common agricultural policy-water framework directive interactions and cost-effectiveness of measures to reduce nitrogen pollution. **Water Science & Technology**, London, v. 61, p. 2689-2697, 2010.

MWANSA, P. B. et al. Multiple trait selection for maternal productivity in beef cattle. **Journal of Animal Breeding and Genetics**, Berlin, v. 119, p. 391-399, 2002. ISSN:1439-0388.

NAAZIE, A.; MAKARECHIAN, M.; HUDSON, R. J. Evaluation of life-cycle herd efficiency in cow-calf systems of beef production. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 77, n.1, p. 1-11, 1999.

NASCA, J. A. et al. Efficiency and stability in subtropical beef cattle grazing systems in the northwest of Argentina. **Agricultural Systems**, Essex, v. 133, p. 85-96, 2015.

NEWMAN, K. B. et al. **Modelling population dynamics**. New York: Springer, 2014.

NOGUEIRA, G. P. Puberty in South American *Bos indicus* (Zebu) cattle, **Animal Reproduction Science**, Amsterdam, v. 82, p. 361-372, 2004.

OAIGEN, R. P. et al. Análise da sensibilidade da metodologia dos centros de custos mediante a introdução de tecnologias em um sistema de produção de cria. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 38, n.6, p. 1155-62, 2009.

OAIGEN, R. P. et al. **Gestão na Bovinocultura de Corte.**, Guaíba: Agrolivros, 2014. 176 p. il.

- OLIVEIRA, T. E. D. et al. Agricultural land use change in the Brazilian Pampa Biome: The reduction of natural grasslands. **Land Use Policy**, Amsterdam, v. 63, p. 394-400, 2017.
- OLIVEIRA, R. L. et al. Nutrição e manejo de bovinos de corte na fase de cria. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, Salvador, v. 7, n.1, p.57-86, 2006.
- PANG, H. et al. Structure of a dynamic simulation model for beef cattle production systems. **Canadian Journal of Animal Science**, Ottawa, v. 79, p. 409-417, 1999. ISSN 0008-5286.
- PASSOS, C. R. M.; NOGAMI, O. Teoria dos custos. In: PRINCÍPIOS de economia. 5. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2008. p. 239-282.
- PATTERSON, D. et al. Management considerations in heifer development and puberty. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 70, n. 12, p. 4018-4035, 1992.
- PEDREIRA, C. G. S.; SILVA, L. S.; ALONSO, M. P. Use of grazed pastures in the Brazilian livestock industry: a brief overview. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FORAGES IN WARM CLIMATES, 2015, Lavras, MG, Brazil. **Proceedings of the...** Lavras, MG, 2015, p. 7-17 (Available on-line at:http://www.neforufla.com.br/upimg/ck/files/Proceedings_CONFOR_2015.pdf).
- PEREIRA, C. H. et al. Grazing supplementation and crop diversification benefits for southern Brazil beef: A case study. **Agricultural Systems**, Essex, v. 162, p. 1-9, 2018.
- PINHEIRO, V. D. **Viabilidade econômica da irrigação de pastagem de capim Tanzânia em diferentes regiões do Brasil**. 2002. 85 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- PUCHALSKY, L. A. **Efeitos associados ao fenômeno El Niño e La Niña na temperatura média, precipitação pluvial e déficit hídrico no Estado do Rio Grande do Sul**. 2000. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- RAHNEFELD, G. W.; WEISS, G. M.; WARD, D. A comparison of methods to evaluate beef cow productivity. **Canadian Journal of Animal Science**, Ottawa, v. 73, p. 971-975, 1993.
- RÁMIZ, A. A. Os custos. In: ENCICLOPÉDIA prática de economia: questões da teoria econômica. São Paulo: Nova Cultural, 1988.

RANDEL, R.; WELSH, T. JOINT ALPHARMA-BEEF SPECIES SYMPOSIUM: Interactions of feed efficiency with beef heifer reproductive development. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 91, n. 3, p. 1323-1328, 2013. ISSN 1525-3163.

REFSGAARD, J. C.; HENRIKSEN, H.J. Modelling guidelines – terminology and guiding principles. **Advances in Water Resources**, Essex, v. 27, p. 71-82, 2004. ISSN: 0309-1708.

REIDSMA, P. et al. On the development and use of farm models for policy impact assessment in the European Union–A review. **Agricultural Systems**, Essex, v. 159, p. 111-125, 2018.

RIBEIRO, E. G. et al. Influência da irrigação durante as épocas seca e chuvosa na taxa de lotação, no consumo e no desempenho de novilhos em pastagens de capim-elefante e capim-mombaça. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 37, n. 9, p. 1546-1554, 2008.

ROBERTS, C. R. Effect of stocking rate on tropical pastures. **Tropical Grasslands**, Cali, v.14, n.3, p.225-231, 1980. ISSN: 2346-3775.

ROBERTSON, A. Body size and efficiency. **Proceedings of the British Society of Animal Production**, Harlow, v. 2, p. 9-14, 1973.

ROCHA, M. G.; LOBATO, J. F. P. Sistemas de alimentação pós-desmama de bezerras de corte para acasalamento com 14/15 meses de idade. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 31, n. 4, p. 1814-1822, 2002.

ROVIRA, J. **Manejo nutritivo de los rodeos de cria en pastoreo**. Montevideo, Uruguay: Ed. Hemisferio Sur, 1996. 288p.

RUVIARO, C. F. et al. Economic and environmental feasibility of beef production in different feed management systems in the Pampa biome, southern Brazil. **Ecological Indicators**, Germany, v. 60, p. 930-939, 2016. ISSN: 1470-160X.

RYKIEL, E. J. J. Modelling agroecosystems: lessons from ecology. In: LOWRANCE, R.; STINNER, B. R.; HOUSE, G. J. (Eds.). **Agricultural Ecosystems: Unifying Concepts**. New York, NY: John Wiley & Sons, 1984. p. 157–178.

SACCO, R. E. et al. Lifetime productivity of straight bred and F1 cows of a five-breed diallel. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 67, p. 1964-1971, 1989.

SANTANA, M. L. J. R. et al. Genetic associations among average annual productivity, growth traits, and stayability: a parallel between Nelore and

composite beef cattle, **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 91, p. 2566-2574, 2013.

SCHLESINGER, S. Terminology for model credibility. **Simulation**, San Diego, v. 32, p. 103-104, 1979. ISSN: 0037-5497.

SEIDEL, J. G. E.; WHITTIER, J. C. Beef production without mature cows. In: **Journal of Animal Science**, Kansas City, MO, v. 93, p.4244-4251, 2015. BEEF SPECIES SYMPOSIUM.

SEMMELMANN, C. E. N.; LOBATO, J. F. P.; ROCHA, M. G. Efeito de sistemas de alimentação no ganho de peso e desempenho reprodutivo de novilhas Nelore acasaladas aos 17/18 meses. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 30, p. 835-843, 2001.

SHORT, R. E. et al. Breeding heifers at one year of age: biological and economic considerations. In: FIELDS, M.J.; SAND, R.S. (Ed.). **Factors affecting calf crop**. Boca Raton: CRC Press, 1994. p. 55-68.

SILVA, A. H. G. et al. Milheto em substituição ao milho na dieta de novilhos confinados. **Semina: ciências agrícolas**, Londrina, v. 35, n. 4, p. 2077-2094, Jul/Ago, 2014.

SILVA, H. R.; MAROUELLI, W. A.; CHRISTOFIDIS, D. Situação da irrigação no Brasil. In: EL RIEGO en los países del Cono Sur / IICA, PROCISUR. Montevideo: IICA, 2010. p. 51-64.

SIMEONE, A.; LOBATO, J. F. P. Efeitos da lotação animal em campo nativo e do controle da amamentação no comportamento reprodutivo de vacas de corte primíparas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 25, n.6, p. 1216-1227, 1996.

SOARES, J. C. R. et al. Avaliação econômica da terminação de bovinos de corte em pastagem irrigada. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 67, n.4, p. 1096-1104, 2015. ISSN 1678-4162.

SOLAZZO, R. et al. A PMP model for the impact assessment of the Common Agricultural Policy reform 2014-2020 on the Italian tomato sector. **New Medit**, Bari, v. 13, p. 9-19, 2014.

Sterman, J. D. **Systems Dynamics: Thinking Systems and Modeling for a Complex World**. Boston: McGraw-Hill, 2000.

TAYLOR, ST. C. S.; YOUNG, G. B. Variation in growth and efficiency in twin cattle with live weight and food intake controlled. **The Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 66, p. 67-85, 1966.

THORROLD, B. S. et al. Modelling the effects of irrigation reliability on pasture growth in a dairy system in Canterbury. **Proceedings of the New Zealand Grassland Association**, Wellington, v.66, p. 31–34, 2004.

TILMAN, D. et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. **Proceedings of the National Academy Sciences. USA**, Washington, v.108, 2026020264, 2011.

TRINDADE, J. K. D. et al. Daily forage intake by cattle on natural grassland: Response to forage allowance and sward structure. **Rangeland ecology & management**, Denver, v. 69, p. 59-67, 2016.

VAN DE VEN, G. W. J.; VAN KEULEN, H. A mathematical approach to comparing environmental and economic goals in dairy farming: identifying strategic development options. **Agricultural Systems**, Essex, v. 94, p. 231–246, 2007.

VAN DYNE G. M.; ABRAMSKY, Z. Agricultural systems models and modelling: an overview. In: **STUDY of agricultural systems**. London, UK: Applied Science Publishers, 1975. p. 23-106.

VEYSSET, P.; LHERM, M.; BÉBIN, D. Energy consumption, greenhouse gas emissions and economic performance assessments in French Charolais suckler cattle farms: model-based analysis and forecasts. **Agricultural Systems**, Essex, v. 103, p. 41–50, 2010.

VILLALBA, D. et al. Long-term stochastic simulation of mountain beef cattle herds under diverse management strategies. **Agricultural Systems**, Essex, v. 103, n.4, p. 210-220, 2010.

VOGELER, I. et al. Effect of inter-annual variability in pasture growth and irrigation response on farm productivity and profitability based on biophysical and farm systems modelling. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 565, p. 564-575, 2016. ISSN: 0048-9697.

VOSOUGH AHMADI, B. et al. Impacts of greening measures and flat rate regional payments of the Common Agricultural Policy on Scottish beef and sheep farms. **The Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 153, p. 676–688, 2015.

WAGNER, W. R. et al. A comparison of crossbred and straightbred cow-calf pairs. II. Biological efficiency of the cow-calf unit. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 58, p. 1160–1170, 1984.

WAGNER, A. P. L. et al. Tendências temporais de índices de vegetação nos campos do Pampa do Brasil e do Uruguai. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n.9, p.1192-1200, 2013.

WAGNER, S. et al. Costs and benefits of ammonia and particulate matter abatement in German agriculture including interactions with greenhouse gas emissions. **Agricultural Systems**, Essex, v. 141, p. 58-68, 2015.

WALMSLEY, B. J. et al. A review of factors influencing key biological components of maternal productivity in temperate beef cattle. **Animal Production Science**, Melbourne, v. 58, p. 1-19, 2016.

WALTERS, J. P. et al. Exploring agricultural production systems and their fundamental components with system dynamics modelling. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 333, p. 51-65, 2016.

WHEELER, T.; VON BRAUN, J. Climate change impacts on global food security. **Science**, Washington, v. 341, n.6145, p. 508–513, 2013. Disponível em: < DOI: 10.1126/science.1239402 >. Acesso em: 20 ago. 2018.

WIAZOWSKI, B. A. **Dinâmica de Sistemas**: uma aplicação à análise da Coordenação Vertical no Agronegócio da Carne Bovina. 2000. 125p. Dissertação (Mestrado em Economia Rural) – Departamento de Economia Rural, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

YOUNG, H. B. Certain cost concepts. **The Journal of Higher Education**, Columbus, v. 29, n. 2, p. 89-94 e 116, 1958.

10. VITA

Fredy Andrey Lopez Gonzalez, filho de Bernabe Lopez Lopez e Marilce Gonzalez Gonzalez, nasceu em 21 de julho de 1985 na cidade de Bogotá D. C, Colômbia.

Cursou o ensino fundamental no Colégio Nuestra Señora de la Candelaria e parte do ensino médio no mesmo colégio. Continuou o ensino médio no Colégio Integrado del Carare, concluindo esta etapa no Instituto Adventista del Carare no município de cimitarra Santander, Colômbia.

Em 2003 iniciou seu primeiro curso superior na cidade de Medellín na Corporación Universitaria Adventista, onde se formou como Tecnólogo em Sistemas de Informação no ano de 2005.

Na mesma cidade, em 2006 ingressou ao curso de Zootecnia na Universidade de Antioquia, onde desenvolveu atividades no laboratório de informática aplicada às ciências animais e laboratório em reprodução animal. Em 2012 teve a oportunidade de realizar um intercâmbio acadêmico com a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, onde desenvolveu seu trabalho de conclusão de curso realizado na Estação Experimental Agronômica da mesma instituição, trabalho intitulado como “*Desempenho reprodutivo de novilhas suplementadas com diferentes fontes energéticas*” sob a orientação do professor Harold Ospina Patiño.

Realizou seu mestrado em Zootecnia no Programa de Pós Graduação em Zootecnia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ingressou em abril de 2013, na área de concentração produção animal, como bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), sob a orientação do professor José Fernando Piva Lobato e coorientação do professor Jaime Urdapilleta Tarouco. O produto da sua pesquisa deu origem a dois artigos científicos. O primeiro foi publicado no Boletim de indústria animal, intitulado “*Performance of heifers supplemented with different levels of corn on pasture*”. O segundo trabalho foi publicado na revista *Italian Journal of animal Science*, intitulado “*Average daily gain rates determine eye muscle area and rump fat depth of beef heifers*”.

Posteriormente, no mesmo Programa, ingressou no curso de Doutorado, em abril de 2015, na área de concentração produção animal, como bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), sob a orientação do professor Júlio Otávio Jardim Barcellos no Núcleo de Estudos em Sistemas de Produção de Bovinos de Corte e Cadeia Produtiva (NESPro). Nesta oportunidade, desenvolveu seu trabalho sobre a intensificação da cria de bovinos de corte com irrigação de pastagens e suas respostas bioeconômicas, trabalho que deu origem a esta tese.