



**PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CAMPUS PROFESSORA CINOBELINA ELVAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA TROPICAL**

ELISABETH VIANA DIAS

**DETERMINANTES BIOLÓGICOS E AMBIENTAIS DA EFICIÊNCIA DA
PRODUÇÃO IN VITRO DE EMBRIÕES (PIVE) EM BOVINOS**

TERESINA - PI

2026

ELISABETH VIANA DIAS

**DETERMINANTES BIOLÓGICOS E AMBIENTAIS DA EFICIÊNCIA DA
PRODUÇÃO IN VITRO DE EMBRIÕES (PIVE) EM BOVINOS**

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

Área de concentração: Produção Animal nos Trópicos

Linha de Pesquisa: Melhoramento Genético e Reprodução Animal nos Trópicos

Orientadora: Profa. Dra. Tânia Vasconcelos Cavalcante

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Setorial CCA
Serviço de Representação da Informação

D541d Dias, Elisabeth Viana.

Determinantes biológicos e ambientais da eficiência da produção in vitro de embriões (PIVE) em bovinos / Elisabeth Viana Dias. -- 2026.

73 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-graduação em Zootecnia Tropical, Teresina, 2026..

“Orientadora: Profa. Dra. Tania Vasconcelos Cavalcante.”

1. Biotecnologias reprodutivas. 2. Eficiência reprodutiva. 3. Melhoramento genético. 4. Pecuária bovina. I. Cavalcante, Tania Vasconcelos. II. Título.

CDD 636.08626

Bibliotecário: Rafael Gomes de Sousa - CRB3/1163

DETERMINANTES BIOLÓGICOS E AMBIENTAIS DA EFICIÊNCIA DA PRODUÇÃO IN VITRO DE EMBRIÕES (PIVE) EM BOVINOS

ELISABETH VIANA DIAS

Dissertação aprovada em: 27/01/2026

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 TÂNIA VASCONCELOS CAVALCANTE
Data: 31/03/2026 12:02:45-0300
Verifique em <https://validar.j6.gov.br>

Profa. Dra. Tânia Vasconcelos Cavalcante (Presidente) / DCCV/CCA/UFPI

Documento assinado digitalmente
 YNDYRA NAYAN TEIXEIRA CARVALHO CASTELO
Data: 31/03/2026 12:33:39-0300
Verifique em <https://validar.j6.gov.br>

Profa. Dra. Yndyra Nayan Teixeira Carvalho Castelo Branco (Interna) / DCCV/CCA/UFPI

Documento assinado digitalmente
 ANA KELEN FELIPE LIMA
Data: 06/04/2026 12:09:25-0300
Verifique em <https://validar.j6.gov.br>

Profa. Dra. Ana Kelen Felipe Lima (Externa) / UFNT

Documento assinado digitalmente
 CLEIDSON MANOEL GOMES DA SILVA
Data: 06/04/2026 13:15:38-0300
Verifique em <https://validar.j6.gov.br>

Prof. Dr. Cleidson Manoel Gomes da Silva (Externo) / UNIFESSPA

Documento assinado digitalmente
 GABRIELA HÉMYLIN FERREIRA MOURA
Data: 06/04/2026 15:22:34-0300
Verifique em <https://validar.j6.gov.br>

Profa. Dra. Gabriela Hémylin Ferreira Moura (Externa) / UE

**"Porque sou eu que conheço os planos que tenho para vocês", declara o SENHOR, "planos de fazê-los prosperar e não de causar dano, planos de dar a vocês esperança e um futuro"
Jeremias 29:11**

AGRADECIMENTOS

Com profunda gratidão, elevo meus agradecimentos a Deus, fonte inesgotável de misericórdia, amparo e vida, por cada cuidado, força concedida e pelos milagres que tornaram este caminho possível.

Ao Programa de Pós-Graduação em Zootecnia Tropical (PPGZT/UFPI), pela acolhida e pela oportunidade de crescimento acadêmico, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro essencial à realização deste sonho.

À professora e orientadora Dra. Tânia Vasconcelos Cavalcante, pela dedicação, paciência, confiança e pelos ensinamentos que ultrapassaram o campo científico, deixando marcas profundas na minha formação pessoal e profissional.

Ao Felipe, pela parceria, disponibilidade e contribuição valiosa ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, Gilmar Dias e Arleide Viana, meu alicerce, por todo amor, incentivo, proteção e por nunca soltarem minha mão, mesmo nos momentos mais desafiadores.

À minha irmã, Ellen Eduarda, pela presença constante, pelas palavras de ânimo e pela força silenciosa que me sustentou ao longo desta trajetória.

À minha psicóloga, Gabriela, pelo acolhimento, escuta sensível e por me ajudar a transformar dificuldades em resiliência.

A todos os docentes do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia Tropical, pelo conhecimento compartilhado, pela inspiração diária e pela contribuição fundamental na construção do meu aprendizado e amadurecimento acadêmico.

E a todos os meus colegas da pós-graduação, que caminharam ao meu lado ao longo dessa jornada, compartilhando desafios, aprendizados e momentos que tornaram o percurso mais leve, humano e significativo. A cada pessoa que, direta ou indiretamente, contribuiu para que este trabalho se concretizasse, deixo minha sincera gratidão. Muito obrigada.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	9
PRODUÇÃO IN VITRO DE EMBRIÕES (PIVE): FATORES INFLUENTES NA PRODUTIVIDADE NO CONTEXTO DA PECUÁRIA BOVINA	9
2. METODOLOGIA	11
3. DESENVOLVIMENTO	12
3.1. A pecuária bovina no brasil	12
3.1.1. Fêmeas bovinas e ciclos reprodutivos	13
3.1.2. Importância e ideal sustentável no sistema de produção	16
3.1.3. Desafios enfrentados e as demandas por inovação, sustentabilidade e rastreabilidade	18
3.2. Biotecnologias reprodutivas na Bovinocultura	20
3.2.1. Evolução das técnicas reprodutivas	20
3.2.2. Inseminação Artificial em Tempo Fixo	22
3.3 Transferência de Embriões (TE)	23
3.4 Fundamentos e aplicações da PIVE	25
3.5. Fatores que influenciam a eficácia da PIVE	27
3.6. Taxas de sucesso da PIVE em bovinos	29
3.7. Desafios e perspectivas da PIVE no Brasil	32
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
5. REFERÊNCIAS	34
CAPÍTULO 2	47
EFICIÊNCIA REPRODUTIVA EM PROGRAMAS COMERCIAIS DE PIVE: IMPACTO DA SAZONALIDADE, IDADE DA DOADORA E ESTÁDIO EMBRIONÁRIO	47
1 INTRODUÇÃO	49
2 MATERIAL E MÉTODOS	55
2.1 Procedimentos da técnica de produção in vitro de embriões	56
2.2 Estrutura experimental	57
2.3 Variáveis analisadas	58
2.4 Análise estatística	59
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
3.1 Dinâmica da Produção Oocitária	60
3.2 Eficiência de Conversão em Embriões (Fresco)	63
3.3 Taxa de Prenhez	64
4 DISCUSSÃO	66
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
5. REFERÊNCIAS	68

CAPÍTULO 1

PRODUÇÃO *IN VITRO* DE EMBRIÕES (PIVE): FATORES INFLUENTES NA PRODUTIVIDADE NO CONTEXTO DA PECUÁRIA BOVINA

PRODUÇÃO *IN VITRO* DE EMBRIÕES (PIVE): FATORES INFLUENTES NA PRODUTIVIDADE NO CONTEXTO DA PECUÁRIA BOVINA

Resumo

A produção *in vitro* de embriões consolidou-se como uma das principais biotecnologias aplicadas à pecuária bovina, permitindo acelerar o melhoramento genético e ampliar a eficiência produtiva dos rebanhos. Diante disso, o presente artigo teve como objetivo analisar os principais fatores que influenciam a eficiência da técnica, com ênfase na sazonalidade, idade das doadoras, raça dos animais e receptividade uterina das receptoras. Verificou-se que a qualidade dos oócitos e o sucesso das gestações são determinados por uma integração entre aspectos fisiológicos, nutricionais, ambientais e genéticos. Além disso, fatores como estresse térmico, variabilidade de protocolos laboratoriais e limitações de infraestrutura representam entraves importantes à aplicação da PIVE em larga escala. Por outro lado, as perspectivas apontam para a integração com tecnologias emergentes, como biomarcadores moleculares, edição gênica e métodos não invasivos de avaliação embrionária, que podem aumentar a previsibilidade e a sustentabilidade da técnica. Nesse contexto, a PIVE reafirma-se como uma ferramenta estratégica para a pecuária brasileira, contribuindo para ganhos zootécnicos, econômicos e ambientais.

Palavras-chaves: Biotecnologias Reprodutivas. Pecuária Bovina. Eficiência Reprodutiva; Melhoramento Genético.

Abstract

In vitro embryo production has become one of the main biotechnologies applied to cattle farming, enabling the acceleration of genetic improvement and enhancing herd productivity. In this context, the present article aimed to analyze the main factors that influence the efficiency of the technique, with emphasis on seasonality, donor age, animal breed, and uterine receptivity of recipients. It was found that oocyte quality and pregnancy success are determined by an integration of physiological, nutritional, environmental, and genetic aspects. In addition, factors such as heat stress, variability in laboratory protocols, and infrastructure limitations represent significant obstacles to the large-scale application of IVEP. On the other hand, future perspectives point to the integration with emerging

technologies, such as molecular biomarkers, gene editing, and non-invasive methods of embryo assessment, which may increase the predictability and sustainability of the technique. In this scenario, IVEP reaffirms itself as a strategic tool for Brazilian cattle farming, contributing to zootechnical, economic, and environmental gains.

Keywords: Reproductive Biotechnologies. Cattle Farming. Reproductive efficiency. Genetic improvement.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de carne bovina do mundo, sendo responsável por cerca de 20% das exportações globais, consolidando-se assim como protagonista no setor agropecuário (Brasil, 2024). Neste cenário, a pecuária bovina representa uma das principais atividades econômicas do país, contribuindo de maneira significativa para o Produto Interno Bruto (PIB), geração de empregos e fortalecimento da balança comercial, atuando desse modo como um potencializador da economia nacional (Brasil, 2022).

Ao longo do tempo, a agropecuária tem enfrentado desafios crescentes relacionados às mudanças climáticas, à escassez de recursos naturais e à demanda por produção sustentável e em larga escala, além da demanda pela busca de alimentos de qualidade e com rastreabilidade, reforçando a necessidade de eficiência produtiva na pecuária (Akasha; Mondalb; Adusumilic, 2021). Na bovinocultura, os métodos tradicionais de reprodução já não atendem plenamente às exigências do mercado moderno, sendo necessário a ampliação em investimentos em soluções tecnológicas para superar a baixa taxa de fertilidade, perdas reprodutivas e lentidão no progresso genético (Mikkola et al., 2024).

Nesse contexto, as biotecnologias reprodutivas, como Inseminação Artificial em Tempo Fixo (IATF), a Fertilização *in vitro* (FIV) e a Transferência de Embrião (TE), vêm sendo adotadas devido a capacidade de atuarem melhorando a produtividade e a genética do rebanho, possibilitando o uso intensivo de matrizes de alto valor genético e aumentando a taxa de prenhez em diferentes condições ambientais (Baruselli et al., 2019). Além disso, essas biotecnologias permitem maior controle sanitário e reprodutivo, contribuindo para a sustentabilidade econômica das propriedades (Donato et al., 2023). Quando aliadas à gestão zootécnica eficiente, essas biotecnologias representam uma resposta direta aos desafios da agropecuária moderna (Singh et al., 2022).

Embora as biotecnologias reprodutivas tragam avanços significativos para a bovinocultura, essas práticas ainda apresentam algumas limitações, como por exemplo a necessidade de mão de obra qualificada, infraestrutura adequada e assistência técnica, o que dificulta sua aplicação em pequenas e médias propriedades (Souza-Fabjan et al., 2021).

Além disso, os altos custos iniciais e os riscos de retorno financeiro incerto tornam o investimento pouco atrativo para grande parte dos produtores (Hunt; Tilsted, 2024). Ademais, no contexto brasileiro, alguns obstáculos afetam a logística, como transporte de insumos e falta de técnicos em regiões remotas, além de impactos climáticos que interferem os resultados dos protocolos (Singh et al., 2022).

Nesse sentido, a produção *in vitro* de embriões (PIVE) destaca-se entre as biotecnologias aplicadas à bovinocultura por oferecer maior flexibilidade em relação às estratégias convencionais de reprodução. Diferentemente da superovulação seguida de transferência de embriões, que depende da sincronização com o ciclo estral, a PIVE possibilita a aspiração folicular (Ovum Pick-up – OPU) em diferentes fases reprodutivas, inclusive em fêmeas em anestro ou gestantes, garantindo o aproveitamento contínuo de doadoras de alto valor genético ao longo do ano, desse modo consolidando a técnica como uma aliada estratégica no avanço do melhoramento genético, ampliando o número de descendentes e reduzindo o intervalo entre gerações (Souza-Fabjan et al., 2021)..

A PIVE tem contribuído para transformar o cenário da pecuária brasileira, permitindo maior difusão de material genético superior e potencializando ganhos de produtividade (Pereira et al., 2024). No entanto, o resultado da aplicação da técnica pode variar em função de diferentes fatores biológicos, ambientais e de manejo. Essas variáveis reforçam a importância de investigações que aprofundem a compreensão sobre os determinantes da eficiência da PIVE. Em vista disso, o presente trabalho teve como objetivo realizar um levantamento bibliográfico sobre os fatores que influenciam a produtividade bovina no Brasil, bem como identificar os principais condicionantes biológicos e ambientais envolvidos, contribuindo para práticas mais eficazes e sustentáveis em protocolos de reprodução assistida bovina

2. METODOLOGIA

A revisão foi conduzida de forma a oferecer uma visão ampla e atualizada do tema, destacando os principais achados e as lacunas de conhecimento. Foram analisados estudos primários publicados em bases científicas reconhecidas, garantindo a confiabilidade das informações. A busca bibliográfica foi realizada nas plataformas **Google Acadêmico**, **SciELO**, **PubMed** e **ScienceDirect**, utilizando descritores e palavras-chave em português e inglês, como: “*produção in vitro de embriões bovinos*”, “*sazonalidade reprodutiva*”, “*idade da doadora bovina*”, “*eficiência reprodutiva em bovinos*” e “*PIVE*”

e taxa de prenhez”, combinados com os operadores booleanos **AND** e **OR**. Foram incluídos artigos publicados entre os anos de 2015 e 2025, disponíveis integralmente e gratuitamente, nos idiomas portugueses ou inglês, que abordassem diretamente os fatores de interesse aplicados aos bovinos. Os dados extraídos foram submetidos a leitura crítica e interpretativa, sendo discutidos dentro dos três fatores centrais do estudo, sazonalidade, raça e idade, e sua correlação com a eficiência da PIVE e as taxas de prenhez.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. A pecuária bovina no Brasil

O cenário agrícola brasileiro é marcado pelo crescimento acelerado da produção, em especial quando trata-se da pecuária nacional, que expandiu-se continuamente ao longo dos anos posicionando o Brasil entre os maiores produtores globais (Ferreira, 2024). No campo agrícola, culturas de grande relevância econômica, como soja, milho e arroz, sustentam a matriz produtiva do país (Silva et al., 2022). Contudo, é a pecuária bovina, tanto de corte quanto de leite, que corresponde ao principal produto nesse contexto, respondendo por expressivos volumes de produção destinados ao consumo interno e às exportações (Abadias et al., 2020).

A pecuária bovina brasileira ocupa posição de destaque no agronegócio nacional, contribuindo para o abastecimento interno e para a geração de divisas via exportações, além de abrigar um dos maiores rebanhos bovinos do mundo, que por sua vez figura o país como um dos principais exportadores mundiais de carne bovina (De Souza; Ribeiro, 2025). Em 2023, o país embarcou aproximadamente 2,29 milhões de toneladas de carne bovina, alcançando novo recorde em volume (ABIEC, 2024). Esse protagonismo é sustentado por fatores estruturais, como as extensas áreas de pastagens, clima favorável em muitas regiões, tecnologias adaptadas ao ambiente tropical e programas genéticos voltados à eficiência produtiva, com destaque para as regiões Centro-Oeste, Norte e Sudeste que promovem sistemas produtivos intensivos, com elevada produtividade por hectare (Voltolini et al., 2022).

O setor bovino gera impactos econômicos expressivos quando se trata de receitas, como observado no ano de 2023, no qual a produção brasileira de carne bovina gerou receitas bilionárias e fortaleceu a balança comercial do setor (ABIEC, 2024). No âmbito social, estima-se que a cadeia produtiva ligue diretamente milhões de pessoas, especialmente produtores de pequeno e médio porte, à atividade pecuária, contribuindo

para a geração de renda no meio rural (IBGE, 2023). Além disso, a pecuária bovina representa uma parcela expressiva do agronegócio nacional e exerce influência significativa sobre o PIB do setor (De Oliveira; Carraro, 2019).

Estudos setoriais indicam que a bovinocultura de corte participa com aproximadamente 15,98 % do valor agregado do agronegócio no Brasil, segundo estimativa da Embrapa. No Valor Bruto da Produção (VBP) de 2024, a pecuária de corte destacou-se com R\$ 211,1 bilhões, consolidando-se em segundo lugar entre os principais segmentos do agronegócio nacional. A pecuária de leite, por sua vez, reportou VBP de R\$ 91,7 bilhões no mesmo ano (Malafaia *et al.*, 2021). Além disso, de acordo com o estudo de Barbaresco, em 2025, o setor como um todo cresceu 6,49 %, sendo que o ramo pecuário teve alta de 8,50 %. Projeções apontam que, ao longo de 2025, o agronegócio poderá responder por cerca de 29,4 % do PIB nacional. Dessa forma, fica claro que o segmento bovino não opera isoladamente, sua força econômica reforça a importância de estudos e inovações na reprodução assistida para garantir sustentabilidade, competitividade e ganhos de eficiência para toda a cadeia produtiva.

3.1.1. Fêmeas bovinas e ciclos reprodutivos

A raça nelore ocupa um espaço de destaque entre as raças mais utilizadas no cenário produtivo de carne no Brasil, principalmente pelo país ter um clima tropical, o que é fundamental para adaptação da raça no país (Murillo, 2024). Entretanto, animais deste grupo genético, normalmente tem ciclos sexualmente mais tardios que os de raças taurinas (*Bos taurus*), mesmo quando criados em condições semelhantes (Kantanen *et al.*, 2009). O atraso na vida reprodutiva das matrizes tem como consequência o aumento no rebanho de fêmeas que não estão em reprodução, redução na taxa de desfrute e eficiência de produção de bezerros, diminuindo o lucro da atividade e atrasando o processo de seleção genética (De Sousa *et al.*, 2018).

O ciclo reprodutivo das novilhas Nelore, como em outras fêmeas bovinas, passa por uma série de estágios de desenvolvimento até a maturidade sexual, sendo a puberdade um marco fundamental, caracterizado pelo início da atividade reprodutiva. Em novilhas Nelore, a puberdade ocorre geralmente entre 22 a 24 meses de idade, dependendo de fatores como genética, nutrição e manejo (Still, 2021). Durante essa fase, a produção de gonadotrofinas e hormônios sexuais sofrem variações significativas, preparando a novilha para a primeira ovulação (Siqueira; Pereira; Guaitolini, 2024).

O processo da puberdade é multifatorial e inclui a maturação do trato reprodutivo e de uma série de interações hormonais e metabólicas, como por exemplo, a fase pré-púbere que envolve um aumento gradual na secreção de LH (hormônio luteinizante), que é um dos principais hormônios envolvidos na ovulação, e da diminuição da resposta negativa ao estradiol. Com o aumento da secreção de LH e FSH (hormônio folículo-estimulante), as novilhas começam a desenvolver folículos ovarianos mais maduros, culminando na primeira ovulação (Al-Suhaumi; Khan; Homeida, 2022). Vale ressaltar que, durante o período pré-púbere, a produção de estrogênios aumenta, facilitando o amadurecimento dos órgãos sexuais e o estabelecimento da fertilidade (Bhattacharya; Sem Sharma; Majudar, 2019).

Como mencionado, a raça Nelore apresenta uma puberdade mais tardia, o que implica em uma série de desafios e oportunidades para a gestão reprodutiva. O atraso na puberdade resulta em um maior tempo para alcançar a maturidade sexual e, conseqüentemente, um início mais tardio na vida reprodutiva das novilhas. Esse fator pode ser um problema em sistemas de produção intensivos, onde a eficiência reprodutiva é essencial para maximizar a produção de bezerros e a lucratividade (Ferraz et al., 2018).

Por outro lado, o manejo adequado da puberdade e a indução da puberdade precoce podem trazer vantagens significativas, como por exemplo, a utilização de protocolos de indução hormonal e técnicas de sincronização de estros pode acelerar a puberdade, permitindo que novilhas se reproduzam mais cedo e, assim, aumentem sua produtividade ao longo da vida reprodutiva (Siqueira; Pereira; Guaitolini, 2024). O uso de hormônios como progesterona, que pode ser administrada via implantes é uma prática comum para antecipar a puberdade e sincronizar o ciclo estral, facilitando o manejo reprodutivo, especialmente em sistemas de inseminação artificial (Omontese, 2018).

A hormonioterapia tem sido amplamente empregada como estratégia para controlar e induzir a puberdade em novilhas. A progesterona é o hormônio mais utilizado nesse contexto, tanto para indução quanto para a manutenção de ciclos hormonais regulares (Silva, 2022). O uso de dispositivos intravaginais como o CIDR®, que libera progesterona de forma controlada, tem mostrado bons resultados, acelerando o desenvolvimento do trato reprodutivo e aumentando a taxa de ovulação (Silva, 2022).

Além disso, a administração de estradiol ou de seus análogos em associação com progesterona tem sido usada em protocolos hormonais para acelerar o crescimento folicular e induzir uma resposta mais rápida à inseminação artificial (Knox, 2015).

Contudo, é necessário calibrar cuidadosamente a dosagem e o tempo de exposição, especialmente em novilhas de raças zebuínas, como a Nelore, que apresentam metabolismo menos ativo (Batista et al., 2020). Doses elevadas ou regimes desajustados podem reduzir a pulsatilidade de LH, comprometer a ovulação ou induzir efeitos adversos no recrutamento folicular (Fatemi, 2021).

3.1.2. Importância e ideal sustentável no sistema de produção

Além de exercer um importante papel econômico, a pecuária bovina no Brasil atua como um setor estratégico com vastos efeitos multiplicadores em diversas áreas, como no campo da diplomacia internacional, onde o Brasil se destaca como protagonista em negociações comerciais e sanitárias, especialmente no que tange a questões de segurança alimentar e sustentabilidade ambiental, sendo um dos maiores exportadores de carne bovina do mundo, referência no atendimento às exigentes normas de qualidade e sustentabilidade impostas pelo mercado global (Brasil, 2022; Siegel; Lima, 2020).

A crescente pressão ambiental sobre biomas sensíveis, como a Amazônia e o Cerrado, é um dos principais desafios, dada a expansão das atividades pecuárias nessas áreas e os impactos ambientais decorrentes, como o desmatamento e a degradação do solo (Dick et al., 2021). Outro obstáculo importante são os baixos índices de produtividade observados em propriedades pecuárias extensivas, onde a eficiência operacional é prejudicada pela falta de inovação e de boas práticas de manejo (Thorne; Conroy, 2017).

Além disso, a resistência à adoção de tecnologias sustentáveis, especialmente entre pequenos produtores, compromete os esforços voltados à redução dos impactos negativos da pecuária sobre o meio ambiente. Esse cenário evidencia a necessidade urgente de políticas públicas que incentivem a capacitação técnica e a implementação de práticas de baixo impacto ambiental (Feitosa, 2024). O grande desafio consiste em equilibrar a expansão do setor pecuário com a preservação ambiental e o aprimoramento das condições produtivas, de modo a garantir maior competitividade e sustentabilidade no futuro.

O impacto ambiental pode ser compreendido como qualquer alteração significativa no meio ambiente, positiva ou negativa (Salamanca et al., 2017). Nesse contexto, a degradação ambiental global, impulsionada por fatores como crescimento populacional desordenado, desenvolvimento industrial insustentável e práticas agrícolas inadequadas, permanece como uma das principais preocupações contemporâneas, demandando esforços coordenados para mitigação de seus efeitos (Souza, 2021).

O uso inadequado dos recursos naturais, impulsionado pelo consumo excessivo, tem causado a degradação de ambientes naturais, resultando em modificações nas propriedades físicas, químicas e biológicas dos ecossistemas (Waise, 2020). A exploração predatória da vegetação para fins comerciais, como a extração de madeira e a implementação de pastagens, agrava ainda mais esse processo (Sands, 2018). A potencialização dessas atividades tem corroborado para um cenário que tem levado a sérios problemas ambientais, muitos dos quais são irreversíveis, comprometendo a estabilidade do meio ambiente e colocando em risco a sustentabilidade de diversas áreas (Li et al., 2025).

A agropecuária, em particular, tem se destacado como uma das principais responsáveis por essa degradação, especialmente quando realizada de maneira inadequada (Hossain, 2020). O manejo incorreto das pastagens e o uso excessivo das áreas agrícolas promovem o desgaste do solo e exacerbam a degradação ambiental, comprometendo a qualidade e a sustentabilidade dos ecossistemas onde a atividade está inserida (Mishra, 2025). Assim, a adoção de práticas de manejo mais eficientes, com foco na preservação ambiental, atua reduzindo problemas como a compactação do solo e a erosão, fenômenos comuns em regiões com elevada intensidade de exploração agropecuária (Shan; Wu, 2019). Além disso, as alterações físicas e biológicas ao longo do tempo alteram significativamente a paisagem e os ecossistemas locais, o que, em muitos casos, está relacionado ao avanço das tecnologias agrícolas e ao modo de vida das comunidades, intensificando as transformações no ambiente (Ellis, 2021).

3.1.3. Desafios enfrentados e as demandas por inovação, sustentabilidade e rastreabilidade

Problemas logísticos e de infraestrutura, como deficiência em estradas, armazenamento e acesso a crédito, também prejudicam a fluidez da cadeia produtiva, aumentando os custos e diminuindo a margem de lucro dos produtores (Lawrence; Mupa, 2024). No aspecto sanitário, doenças como brucelose e tuberculose ainda representam riscos, exigindo sistemas robustos de vigilância e rastreabilidade (Brasil, 2022). Além disso, os impactos das mudanças climáticas têm afetado diretamente a disponibilidade de pastagens, a qualidade dos recursos hídricos e o desempenho zootécnico dos animais, exigindo adaptações dos sistemas produtivos e maior uso de tecnologias como a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e suplementações nutricionais específicas (Li et al., 2025).

A transição para uma pecuária moderna, intensiva e sustentável não se limita a um desafio técnico, pois envolve uma reestruturação da cadeia produtiva, incluindo avanços em genética, manejo de pastagens e inovação em práticas de gestão (Duru; Therond, 2015). A busca por maior eficiência produtiva, especialmente em um contexto de pressão sobre as áreas naturais, exige o uso de tecnologias avançadas e mudanças culturais e organizacionais no campo (Sila; Santos, 2024).

Nesse sentido, práticas como o confinamento, semi-confinamento, integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), e suplementação estratégica de ração têm sido adotadas para aumentar a produtividade por hectare e reduzir a necessidade de expansão da fronteira agrícola, evitando o desmatamento e a degradação do solo (Embrapa, 2023). A utilização de genética superior, por sua vez, potencializa o desempenho dos rebanhos, promovendo não só a eficiência econômica, mas também reduzindo a pressão sobre os recursos naturais (Dayoub et al., 2024).

A cadeia produtiva da carne bovina no Brasil tem assumido um viés cada vez mais focado na sustentabilidade, com iniciativas como o Plano ABC+ (Agricultura de Baixo Carbono) que estimulam a recuperação de pastagens degradadas, o manejo racional do solo e a mitigação de emissões de gases de efeito estufa, especialmente metano proveniente da fermentação ruminal (Brasil, 2024). Entre 2018 e março de 2023, foram investidos cerca de R\$ 3,95 bilhões em programas ligados à pecuária dentro do ABC+, dos quais uma parcela significativa se destinou à recuperação de pastagens (Harfuch; Lobo; Cruz, 2023)

Entretanto, os desafios ambientais persistem, como a compactação do solo pela movimentação do gado, que por sua vez compromete sua estrutura e dificulta a infiltração da água, agravando processos erosivos e reduzindo a fertilidade (Centeri, 2022). A intensificação da rotação de pastagens e a adoção de práticas como calagem e aragem, quando bem manejadas, podem mitigar esses impactos e prolongar a vida útil dos pastos (Rapiya et al., 2025). Paralelamente, a rastreabilidade tem atuado de maneira estratégica na pecuária moderna, através da implantação de tecnologias como brincos eletrônicos, blockchain, inteligência artificial e sistemas de georreferenciamento que permitem monitorar cada estágio da cadeia produtiva, assegurando a origem da carne e atendendo às exigências sanitárias e ambientais dos mercados globais (Rabelo, 2024)

Recentemente, o governo lançou o Plano Nacional de Rastreabilidade Individual de Bovinos e Bubalinos (PNIB), que prevê a identificação individual obrigatória de bovinos e bubalinos em todo o território nacional, reforçando a transparência e a

conformidade regulatória (Brasil, 2023). Além das exigências legais e tecnológicas, grandes frigoríficos e empresas exportadoras, como JBS, Marfrig e Minerva, têm firmado compromissos em cadeia de suprimentos sem desmatamento, investindo em auditorias socioambientais e práticas regenerativas (Kuepper, 2020).

Cabe destacar que a degradação do solo não se resume à compactação, tratando-se de um fenômeno complexo que envolve alterações na estrutura física, química e biológica do solo (Saljnikov et al., 2021). A perda gradual de matéria orgânica, nutrientes e estabilidade do solo compromete sua capacidade de sustentar vegetação e torna os ecossistemas mais susceptíveis à erosão e à desertificação (Musa et al., 2024). Práticas inadequadas, como o uso repetitivo de maquinário sem controle, queimadas e desmatamento, aceleram esse processo, fragilizando a microbiota, estimulando a acidez e reduzindo a infiltração de água (Silva; Araújo; Barros, 2021).

A compactação do solo, por sua vez, reduz a porosidade, impedindo a movimentação de ar e água, prejudicando o desenvolvimento radicular e aumentando eventos de escoamento superficial (Shaheb; Venkatesh; Shearer, 2021). Em sistemas pecuários intensivos, esse efeito é intensificado pelo pisoteio dos animais e pela utilização constante de equipamentos agrícolas sem práticas conservacionistas (Serrano et al., 2023). Mais que um efeito natural, a degradação do solo é o reflexo direto das práticas humanas e da capacidade (ou incapacidade) de conservar os recursos naturais. Sem políticas efetivas e adoção de técnicas sustentáveis, esse processo deixa de ser um problema isolado e se torna um obstáculo à produção alimentícia, à biodiversidade e à estabilidade ambiental (Souza, 2021).

3.2. Biotecnologias reprodutivas na Bovinocultura

3.2.1. Evolução das técnicas reprodutivas

Nos últimos anos, a pecuária enfrentou um dilema central que diz respeito a como aumentar a produtividade sem ampliar proporcionalmente os impactos ambientais associados ao uso da terra, ao desmatamento e às emissões de gases de efeito estufa (Si; Aziz; Raza, 2021). Nesse contexto, as biotecnologias reprodutivas se colocam como ferramentas transformadoras para a produção de carne e leite (Menchaca, 2023). O que antes dependia quase exclusivamente de métodos convencionais de manejo e reprodução agora pode ser complementado ou substituído por técnicas que oferecem maior controle sobre fertilidade, seleção genética e saúde dos rebanhos (Medeiros et al., 2022)).

Essas biotécnicas envolvem machos e fêmeas e revolucionaram o campo ao permitir manipulações *in vitro* e *in vivo* que vão desde a inseminação artificial (IA) e transferência de embriões (TE) até métodos mais recentes, como produção *in vitro* de embriões (PIVE), sexagem de sêmen e edição genética (Yadav *et al.*, 2025). Por exemplo, a combinação de seleção genômica com tecnologias reprodutivas tem demonstrado acelerar ganhos genéticos de forma mais eficiente do que abordagens isoladas, uma vez que ajuda a encurtar a duração do programa de reprodução, reduzindo o número de ciclos reprodutivos necessários para atingir as metas e levam a um rápido aumento na taxa de ganho genético, podendo render 1,5 vezes mais ganho genético por ano em comparação com a seleção fenotípica (Anilkumar *et al.*, 2022). Em programas bem estruturados, o uso dessas tecnologias permite aumentar a taxa de multiplicação genética por doadora, reduzir o número de animais necessários e, conseqüentemente, reduzir a pegada ambiental por unidade produzida (Mueller; Van Eenennaam, 2022).

No entanto, apesar dos avanços e benefícios evidentes, essas tecnologias não estão livres de críticas e limitações, como por exemplo os custos de implementação e manutenção permanecem elevados, restringindo o acesso em grande parte das propriedades rurais (Hansen, 2023). Soma-se a isso a dependência de equipamentos sofisticados e a necessidade de mão de obra altamente especializada, fatores que podem dificultar sua adoção em sistemas produtivos mais tradicionais. Outro tópico diz respeito ao risco de redução da variabilidade genética dos rebanhos, especialmente quando essas ferramentas são aplicadas de forma indiscriminada, sem estratégias de manejo que garantam a diversidade, como a rotação genética ou o uso de múltiplas linhagens (Ferraz; Ferronato, 2023).

As biotecnologias reprodutivas aplicadas à bovinocultura avançaram de forma notável nas últimas décadas, transformando-se em instrumentos necessários para elevar a eficiência produtiva e acelerar o melhoramento genético do rebanho nacional (Mueller; Van Eenennaam, 2022). O percurso dessa evolução começou com a inseminação artificial convencional e, progressivamente, incorporou protocolos hormonais de sincronização, técnicas de criopreservação, sexagem de sêmen, produção *in vitro* de embriões e clonagem (Oliveira *et al.*, 2016).

Esses recursos possibilitaram maior controle sobre o ciclo estral, facilitaram a sincronização do cio e viabilizaram a fertilização em larga escala, o que reduziu o intervalo entre partos e elevou de maneira consistente os índices de prenhez em rebanhos comerciais (Chandra; Sejian; Sharma, 2015). Com o refinamento dos protocolos e a

ampliação da capacitação técnica no campo, tais práticas deixaram de ser exclusivas de grandes fazendas e passaram a integrar também a realidade de pequenos e médios produtores, democratizando o acesso à inovação (Van Loon et al., 2020).

3.2.2. Inseminação Artificial em Tempo Fixo

A inseminação artificial é um marco histórico no manejo reprodutivo bovino, sendo considerada uma das biotecnologias mais transformadoras da pecuária (Lonergan, 2018). No Brasil, a técnica começou a ganhar espaço na década de 1970, com a criação das primeiras centrais de inseminação, permitindo acesso a touros geneticamente superiores e maior controle sanitário dos rebanhos (Medeiros et al., 2022). No entanto, a dependência da detecção do estro sempre foi uma limitação importante, sobretudo em rebanhos zebuínos criados a pasto, em que o cio apresenta curta duração e ocorre, em sua maioria, durante a noite, dificultando sua identificação (Soares, 2021). Nesse contexto, emergiu a Inseminação Artificial em Tempo Fixo (IATF), capaz de contornar tais dificuldades por meio de protocolos hormonais de sincronização da ovulação (Soares, 2021).

A IATF como alternativa está associada à sua capacidade de otimizar a eficiência reprodutiva, reduzindo o intervalo entre partos e aumentando as taxas de prenhez (Lamb et al., 2010). Essa técnica trouxe avanços diretos para o planejamento reprodutivo, uma vez que possibilita programar a inseminação, eliminando a necessidade de observar cio e permitindo a padronização de nascimentos (Kolachi et al., 2025). Tal característica é especialmente relevante em rebanhos de corte e leite, em que a regularidade produtiva é determinante para a lucratividade (Resende et al., 2016).

Os protocolos hormonais que sustentam a técnica se baseiam na sincronização da emergência folicular, o controle da fase lútea e a indução da ovulação. Para isso, utiliza-se a combinação de hormônios como progesterona, prostaglandina, estradiol, GnRH e eCG, administrados em sequência previamente estabelecida. O emprego desses protocolos permite que mesmo vacas em anestro sejam induzidas a ovular, elevando assim a eficiência do processo (Arya; Goswami; Sharma, 2023).

Além disso, a evolução dos protocolos adaptados, como o *Ovsynch*, um protocolo caracterizado pela seguinte sequência: GnRH - 7 dias/PGF - 48 horas/GnRH - 16 horas antes da inseminação artificial. Esse esquema foi desenvolvido em meados da década de 1990 e se tornou referência para sincronização da ovulação (Baruselli et al., 2019). Ao longo do tempo, diferentes adaptações foram incorporadas, incluindo variações no tipo

de hormônio, doses e tempo de aplicação, o que possibilitou resultados mais consistentes em fêmeas *Bos indicus*, predominantes no Brasil (Cooke et al., 2020). Ademais, o uso de eCG nos protocolos mostrou-se particularmente eficaz em vacas zebuínas em anestro pós-parto, aumentando as taxas de concepção e tornando a técnica economicamente mais viável (Pinheiro et al., 2009).

Apesar das vantagens, alguns desafios permanecem, a eficácia da IATF depende diretamente de fatores como condição corporal, nutrição adequada, sanidade do rebanho e capacitação técnica da equipe envolvida (Abebe et al., 2024). Deficiências nutricionais, por exemplo, podem comprometer o retorno ao ciclo estral pós-parto, reduzindo as taxas de concepção. Bem como, a má execução dos protocolos hormonais ou o uso de sêmen de baixa qualidade impactam negativamente os resultados (Feskens *et al.*, 2022).

No campo econômico, a viabilidade da IATF ainda é tema de discussão, sobretudo devido ao custo dos hormônios empregados (Morotti; Lorenzetti; Seneda, 2021). No entanto, análises de custo-benefício demonstram que, quando avaliado o custo por prenhez, a técnica apresenta vantagem em relação à IA convencional, justamente porque aumenta a taxa de serviço e concentra os nascimentos em períodos estratégicos (Sun *et al.*, 2025). Como ainda, ao reduzir o intervalo entre partos e melhorar a eficiência reprodutiva, a IATF contribui diretamente para o aumento da produtividade (Oliveira; Silva; Santori, 2021).

Na pecuária de corte, a IATF tem um papel importante no cruzamento industrial, possibilitando a obtenção de animais com maior ganho de peso, melhor rendimento de carcaça e precocidade sexual (Abebe *et al.*, 2024). Estudos mostram que bezerros F1 resultantes de cruzamentos mediados por IA/IATF apresentam desempenho superior ao Nelore puro, evidenciando a importância da técnica para o avanço genético do rebanho nacional (Silva; Mello; Palhano, 2021). Além disso, ao permitir maior número de fêmeas gestantes no início da estação de monta, a IATF garante uniformidade nos lotes de bezerros, o que otimiza o manejo e a comercialização (Silva; Mello; Palhano, 2021).

3.3 Transferência de Embriões (TE)

A transferência de embriões em bovinos é uma das biotecnologias reprodutivas mais relevantes para acelerar o ganho genético e otimizar a produtividade na pecuária moderna (Yousuf; Yusuf; Mohammed, 2024). Desde as primeiras experiências realizadas no século XX, até o nascimento do primeiro bezerro, os avanços foram significativos, permitindo a aplicação rotineira em rebanhos comerciais (Moore; Hasler, 2017). Ao

possibilitar que uma fêmea produza múltiplos descendentes em um curto período, a TE tornou-se biotecnologia não apenas para multiplicar animais superiores, mas também para ampliar a base genética disponível, fortalecendo os programas de melhoramento (Dans; Mondal, 2022).

O desenvolvimento da TE acompanhou a evolução de outras biotecnologias, como a inseminação artificial e a fertilização *in vitro*, destacando-se pela sua capacidade de superar limitações fisiológicas naturais e ampliar a eficiência dos sistemas de produção (Yadav *et al.*, 2025). O Brasil, a partir da década de 1980, incorporou de forma progressiva essa tecnologia, tornando-se líder mundial em produção e utilização de embriões, tanto *in vivo* quanto *in vitro* (Viana *et al.*, 2018).

A TE envolve etapas complexas que vão desde a seleção de doadoras e protocolos de superovulação, até a coleta, classificação e criopreservação de embriões, culminando na transferência para receptoras sincronizadas (Chopra *et al.*, 2022). A manipulação hormonal da doadora permite a obtenção de múltiplas ovulações, garantindo maior número de embriões disponíveis para transferência (Kidie, 2019). Avanços como a utilização de protocolos com FSH em doses decrescentes, bem como a integração da TE com a PIVE e OPU, ampliaram a eficiência e a previsibilidade dos resultados (Mota *et al.*, 2024).

Como limitantes da técnica, o custo elevado de protocolos hormonais, a necessidade de estrutura laboratorial adequada e a capacitação técnica de profissionais ainda representam barreiras para pequenos e médios produtores (Hassan *et al.*, 2024). Além disso, a variabilidade individual na resposta à superovulação e os índices de prenhez, que variam dependendo da qualidade dos embriões e das condições das receptoras, demonstram que a eficiência da TE está sujeita a múltiplos fatores (Viziack, 2020).

Apesar dos desafios, a TE oferece vantagens para a pecuária, como a disseminação rápida de genótipos superiores, a preservação de raças em risco de extinção e a possibilidade de importação e exportação de material genético com menor custo e risco sanitário em comparação ao transporte de animais vivos (Mebrauto; Fesseha; Goa, 2020). A criopreservação e o uso de embriões vitrificados ou de transferência direta expandem ainda mais essas possibilidades, permitindo a formação de bancos genéticos e facilitando o comércio internacional respectivamente (Blackburn; Azevedo; Purdy, 2023). Além disso, a integração com técnicas de sexagem embrionária e engenharia genética projeta a TE como eixo central para programas de melhoramento que visam

aumentar a eficiência produtiva e atender às demandas globais por carne e leite de qualidade (Menchaca, 2023).

3.4 Fundamentos e aplicações da PIVE

A PIVE representa um conjunto de técnicas laboratoriais que culminam na geração de embriões fora do ambiente materno, sendo considerada atualmente uma das biotecnologias mais avançadas na reprodução animal e engloba diversas etapas de procedimentos, como por exemplo a maturação, fertilização e o cultivo de oócitos, conforme detalhado no estudo de Grázia *et al.* (2019). Este processo inicia-se com uma seleção rigorosa das fêmeas doadoras, onde aspectos como genética, fertilidade, condição corporal, ausência de patologias reprodutivas e potencial produtivo são criteriosamente avaliados. A saúde geral da matriz é um fator determinante que influencia diretamente a qualidade dos oócitos aspirados e, consequentemente, o sucesso de todo o procedimento (Solomon, 2024).

A PIVE tem se estabelecido como uma ferramenta aceleradora para o ganho genético otimizando a eficiência produtiva na pecuária bovina (Terry *et al.*, 2020). Sua evolução a partir dos avanços da fertilização *in vitro* possibilitou que a técnica fosse integrada em rotinas comerciais em larga escala, com o Brasil destacando-se como líder mundial em sua aplicação (Sartori *et al.*, 2018). A relevância da PIVE reside na sua capacidade de reduzir o intervalo entre gerações, multiplicando fêmeas de alto valor zootécnico e assim viabilizando a descendência mesmo de animais que apresentam limitações reprodutivas (Luedke *et al.*, 2019).

O processo de execução da PIVE ocorre em diversas etapas como já mencionado, iniciando-se pela seleção das doadoras, que podem ser vacas ou novilhas com mérito genético reconhecido e animais com infertilidade adquirida ou em condições reprodutivas adversas (Maciel; Masqui; Teixeira, 2025). Por sua vez, a obtenção dos oócitos é realizada principalmente pela técnica de OPU, ou alternativamente pela recuperação de ovários oriundos de abatedouros, que corresponde ao método mais comum em pesquisas (Luedke, 2019). Nessa etapa, a garantia da qualidade e eficácia do procedimento é fundamental, uma vez que a quantidade e a qualidade dos oócitos recuperados impactam diretamente o número de embriões viáveis a serem produzidos (Prata, 2013).

Após a recuperação dos complexos cúmulus-oócito (CCOs), segue-se a etapa de maturação *in vitro* (MIV), que complementa os processos de maturação nuclear e citoplasmática dos gametas, preparando-os para a fertilização (Yang *et al.*, 2021). Este

procedimento é conduzido em meios enriquecidos com hormônios e fatores de crescimento, sob condições controladas de temperatura e atmosfera em estufas (Maciel *et al.*, 2025). Estudos como o de Prata (2013) demonstram que a suplementação desses meios com antioxidantes, como melatonina e resveratrol, pode aprimorar a competência oocitária e aumentar as taxas de clivagem embrionária.

Em uma etapa subsequente, ocorre o processo de FIV, onde os oócitos maturados são expostos a espermatozoides previamente capacitados por técnicas laboratoriais, como *swim-up* ou gradiente de densidade (Zhao; Sun; Zhao, 2023). O sucesso da fertilização depende da qualidade dos gametas e da interação entre o meio de cultivo e os mecanismos fisiológicos de penetração espermática (Maciel *et al.*, 2025). Pesquisas indicam que a adição de fatores de crescimento, como o EGF, contribui para elevar a taxa de fecundação, evidenciando que ajustes laboratoriais precisos podem otimizar os resultados (Kereilwe, 2025).

Após a fertilização, os zigotos são transferidos para o cultivo embrionário *in vitro* (CIV), permanecendo por aproximadamente sete dias até alcançarem o estágio de blastocisto (Hasler; Barfield, 2021). Este processo exige meios de cultura específicos, formulados para replicar as condições fisiológicas do ambiente ovidutal e uterino, e é conduzido sob rigoroso controle de temperatura, pH e atmosfera gasosa, conforme destacado por Luedke *et al.* (2019). A eficácia do CIV pode ser significativamente aprimorado pela adição de suplementos antioxidantes, aminoácidos e fatores de crescimento, que comprovadamente elevam as taxas de desenvolvimento embrionário. Além disso, inovações como as apresentadas por Maciel *et al.* (2025) exploram alternativas para o transporte de embriões em cultivo, como a maturação dos óocitos viáveis, o que possibilita sua movimentação por até 48 horas sem perdas notáveis de viabilidade.

A fase conclusiva da PIVE compreende a transferência dos embriões para fêmeas receptoras previamente sincronizadas ou sua criopreservação por vitrificação para utilização futura. A sincronização precisa do ciclo estral da receptora garante um ambiente uterino otimizado para a implantação embrionária. A acurácia no manejo hormonal e a estrita observância do controle sanitário são fatores cruciais que determinam os índices de prenhez, os quais, em protocolos comerciais, flutuam entre 35% e 60% (Luedke, 2018).

Na prática, a PIVE expandiu-se muito além das aplicações reprodutivas convencionais, oferecendo a capacidade de multiplicar animais jovens, senis ou aqueles

com patologias reprodutivas, e ainda permitindo a criação de bancos de germoplasma para a conservação de espécies em risco de extinção. Em escala global, a PIVE estabeleceu-se como um avanço transformador na pecuária moderna. No Brasil, em particular, esta técnica foi decisiva para que o país assumisse a liderança mundial na produção de embriões, sendo responsável por cerca de 35% da produção global em 2017 (Gonçalves; Viana, 2019).

3.5. Fatores que influenciam a eficácia da PIVE

A eficiência da PIVE depende diretamente das condições fisiológicas e sanitárias das fêmeas doadoras, que determinam a qualidade dos oócitos e, por consequência, o sucesso dos procedimentos (Hew et al., 2024). Entre os fatores mais relevantes, destaca-se a condição nutricional da doadora e da receptora. Qualquer desequilíbrio no escore de condição corporal (ECC) pode comprometer o ambiente folicular e reduzir a competência ovocitária (Chaves et al., 2024).

Estudos indicam que, em vacas de alta produção, o metabolismo esteroidal elevado diminui os níveis de progesterona e estradiol circulantes, dificultando a expressão estral e comprometendo o microambiente folicular (Lima et al., 2019). Além disso, dietas energéticas excessivas podem reduzir a qualidade dos oócitos, possivelmente pela elevação da ureia plasmática, enquanto vacas com baixo ECC apresentam retorno tardio ao ciclo estral e menores taxas de concepção, sobretudo quando enfrentam balanço energético, compreendido como a comparação dos resultados fisiológicos e reprodutivos de vacas alimentadas com uma dieta de manutenção ou uma dieta de alta energia por um período prolongado, negativo no pós-parto (Sales *et al.*, 2015).

A qualidade oocitária é determinada diretamente pela idade da fêmea doadora, uma vez que a maturidade oocitária, entendida como a capacidade do oócito de completar a meiose após ser fertilizado, varia de acordo com a fase da vida reprodutiva e influenciando diretamente a PIVE (Moghadam *et al.*, 2022). Novilhas pré-púberes tendem a produzir oócitos de menor qualidade em comparação com vacas adultas, o que resulta em taxas reduzidas de blastocisto. Apesar disso, o uso de bezerras pode ser uma estratégia útil para antecipar a exploração de material genético de alto valor e reduzir o intervalo entre gerações (Luedke, 2018). Já as vacas adultas, em plena idade reprodutiva, costumam apresentar resultados mais consistentes, enquanto fêmeas senis enfrentam maior risco de degeneração oocitária e menor competência embrionária (Silva, 2021).

É importante destacar que mesmo embriões de alta qualidade podem falhar na implantação se a receptora apresentar alterações endometriais, deficiências hormonais ou desequilíbrios nutricionais (Baruselli *et al.*, 2019). A sincronização precisa do ciclo estral, associada a protocolos hormonais bem estabelecidos, favorece um ambiente uterino adequado e aumenta as chances de gestação (Pal; Dar, 2021).

Somando-se a esses elementos, é importante atentar-se à raça dos animais envolvidos na PIVE, uma vez que cada uma responde a uma maneira distinta ao tratamento (Gonçalves; Viana, 2019). No Brasil, a liderança mundial na aplicação da técnica está associada, em grande medida, à predominância de raças zebuínas (*Bos indicus*), como o Nelore, devido ao fato desses animais apresentarem uma elevada população folicular, o que possibilita a recuperação de um número maior de oócitos por sessão de OPU (Maciel *et al.*, 2025).

Embora corresponda a uma vantagem quantitativa, a elevada população folicular observada na raça zebuínas não implica necessariamente em uma maior qualidade, já que os oócitos de zebuínos podem apresentar menor competência de desenvolvimento embrionário quando comparados aos de taurinos (*Bos taurus*), que embora possuam menor número de folículos, destacam-se pela maior competência embrionária que é uma característica que equilibra a desvantagem numérica (Luedke, 2018). Nesse contexto, os cruzamentos entre zebuínos e taurinos têm se mostrado uma alternativa promissora, ao reunir o volume folicular característico das raças zebuínas com a superioridade oocitária das taurinas (Baruselli *et al.*, 2019).

O entrelaçamento entre raça, saúde e idade torna-se ainda mais evidente quando se observa a influência de fatores ambientais, como por exemplo a sazonalidade (Botsa *et al.*, 2023). Em períodos de seca, a queda na qualidade das pastagens compromete o ECC das doadoras, o que se reflete negativamente na competência dos oócitos recuperados (Franco *et al.*, 2016).

As condições climáticas impactam a qualidade dos oócitos, sobretudo em regiões tropicais, onde o estresse térmico representa um dos principais desafios para a PIVE, uma vez que a exposição prolongada a altas temperaturas reduz a qualidade oocitária, compromete a taxa de clivagem e diminui a produção de blastocistos, sendo esses efeitos intensificados no verão devido ao aumento do estresse oxidativo (Peixoto, 2010). Além do impacto direto nos oócitos, o estresse térmico também altera o consumo de matéria seca, interfere no metabolismo reprodutivo e prejudica o ambiente folicular, que deixa de oferecer condições adequadas para a maturação nuclear e citoplasmática (Roth, 2017).

3.6. Taxas de sucesso da PIVE em bovinos

A PIVE consolidou-se como uma das principais biotécnicas reprodutivas utilizadas na bovinocultura de elite, especialmente no Brasil, que se destaca como líder mundial nesse segmento (Batistela et al., 2023). Em 2020, cerca de 76% de todos os embriões bovinos transferidos globalmente foram produzidos via PIVE, evidenciando a expressividade da técnica e sua relevância para o avanço genético em larga escala no país (Silva et al., 2022).

Com os avanços técnicos observados principalmente a partir de 2020, houve significativa melhora nos índices de desenvolvimento embrionário *in vitro*. Em condições laboratoriais otimizadas, aproximadamente 90% dos oócitos bovinos atingem a maturação *in vitro*, sendo que cerca de 80% destes apresentam clivagem após a fertilização (Oliveira; Freitas; Barboza, 2023). A taxa de formação de blastocistos, que reflete a proporção de embriões viáveis ao final do cultivo, varia entre 30% e 40%, podendo alcançar até 50% em protocolos altamente eficientes (Oliveira; Freitas; Barboza, 2023). Apesar disso, os embriões produzidos *in vitro* ainda apresentam, em geral, qualidade e desempenho inferiores aos obtidos por fertilização *in vivo*, sobretudo devido às limitações do ambiente artificial de cultivo e à variabilidade genética entre doadoras.

A avaliação final da eficiência da PIVE é determinada pelas taxas de prenhez após a transferência embrionária (Araújo; Dos Santos, 2025). No Brasil, essas taxas oscilam conforme o tipo de embrião (fresco ou criopreservado), qualidade morfológica, raça e condição das receptoras. Programas bem controlados, com embriões frescos e de excelente morfologia, podem alcançar taxas de gestação entre 40% e 50%, com relatos pontuais superiores a 55% (Trenkel et al., 2022). No estudo de Trenkel et al. (2022), realizado no estado do Paraná, os autores identificaram uma taxa média de prenhez de 29% após 419 transferências, tanto em rebanhos de corte quanto leiteiros. Comparativamente, embriões obtidos por PIVE apresentaram taxa de nascimento inferior, cerca de 20 pontos percentuais a menos que embriões produzidos por lavagem uterina, refletindo a necessidade contínua de otimização dessa biotécnica (Luedke, 2018).

Frente aos desafios que ainda limitam a eficiência plena PIVE, diversos avanços laboratoriais vêm sendo incorporados nos últimos anos, com destaque para o período pós-2020. Essas inovações visam aprimorar a qualidade dos embriões gerados, além de aumentar a previsibilidade gestacional, tornando a técnica mais robusta e reprodutível (Maciel; Masquio; Teixeira, 2025). Entre os principais avanços destacam-se os aperfeiçoamentos nos sistemas de cultivo embrionário, que consiste no desenvolvimento

de meios quimicamente definidos e sequenciais, capazes de simular com maior precisão o ambiente fisiológico do trato reprodutivo materno, visando possibilitar um controle mais rigoroso das condições metabólicas ao longo do cultivo (Luedke et al., 2019).

A suplementação desses meios com aminoácidos e antioxidantes específicos tem demonstrado impacto positivo nas taxas de clivagem e formação de blastocistos (Maciel; Masquio; Teixeira, 2025). Além disso, o uso de sistemas de cultivo tridimensionais (3D), baseados em membranas que evitam o achatamento do embrião, mostrou aumento de até 32% na taxa de blastocisto em raças taurinas. Em paralelo, a aplicação da microfluídica no cultivo embrionário, que consiste em uma ferramenta multifuncional que possibilita a manipulação de fluidos em escala micrométrica para análise de células e biomoléculas de alta precisão e reprodutibilidade, tem promovido um ambiente mais dinâmico e semelhante ao *in vivo*, resultando em melhor desempenho embrionário (Gavioli, 2025).

Outro foco de aprimoramento tem sido o combate ao estresse oxidativo, uma das principais causas de danos celulares durante a maturação e o cultivo *in vitro* (Mafrin, 2022). Nesse contexto, compostos antioxidantes como a melatonina e o resveratrol vêm sendo utilizados com sucesso, melhorando a competência dos oócitos e a qualidade embrionária (Maciel; Masquio; Teixeira, 2025). A nanotecnologia, por sua vez, surge como uma fronteira promissora, permitindo a liberação controlada de antioxidantes por meio de nanopartículas, criando microambientes mais protetores e favoráveis ao desenvolvimento embrionário (Cambrussi et al., 2018).

A tecnologia microfluídica, em que por meio de pequenas quantidades de fluídos é possível fazer análises genéticas, reduzindo tamanho, peso e consumo de energia, também tem sido explorada na seleção espermática, por meio de chips que simulam a seleção natural do trato reprodutivo, promovendo a separação passiva de espermatozoides de melhor qualidade (Gavioli, 2025). Resultados recentes demonstram aumentos relevantes nas taxas de clivagem e blastocisto com essa abordagem, além de redução nos índices de apoptose, indicando embriões mais viáveis e com maior potencial de implantação (Silva, 2024).

Simultaneamente, a avaliação embrionária tem evoluído para modelos mais precisos e objetivos. A tradicional análise morfológica tem sido complementada, e em alguns casos substituída, por algoritmos de inteligência artificial e aprendizado de máquina, capazes de identificar padrões visuais associados à viabilidade embrionária com maior acurácia (Costa; Costa; Frajblat, 2025). Além disso, estratégias baseadas em biomarcadores moleculares e metabólitos presentes no meio de cultivo vêm sendo

desenvolvidas como ferramentas não invasivas para aferir a qualidade embrionária, possibilitando a seleção de embriões com maior potencial gestacional (Herrick; Silva; Krisher, 2016).

Por fim, observa-se um ressurgimento do interesse no uso do co-cultivo com células de suporte, como células epiteliais do oviduto e células-tronco mesenquimais (CTMs) (Martins, 2015). Essas células atuam como fontes de sinais bioativos, promovendo um ambiente mais próximo do fisiológico e favorecendo o desenvolvimento embrionário. Estudos recentes indicam que o co-cultivo com CTMs pode elevar significativamente as taxas de clivagem e formação de blastocistos, sobretudo em casos em que a qualidade dos oócitos é limitada (Sousa, 2020).

3.7. Desafios e perspectivas da PIVE no Brasil

No Brasil, a PIVE se consolidou como uma ferramenta indispensável para o aprimoramento genético e para o incremento da eficiência na pecuária (Sartori *et al.*, 2018). O país ocupa posição de liderança mundial na aplicação dessa biotécnica, fruto da predominância de raças zebuínas, da ampla adoção de programas de melhoramento e da evolução das estruturas laboratoriais (Gonçalves; Viana, 2019). Contudo, apesar dos notáveis avanços, persistem desafios relevantes que precisam ser superados, ao mesmo tempo em que se vislumbram perspectivas promissoras para o futuro da técnica (Silva, 2024).

Dentre esses desafios, o mais emergente é em relação ao custo e a acessibilidade, uma vez que a PIVE envolve gastos elevados com hormônios, insumos laboratoriais e mão de obra especializada, desse modo limitando a adoção por pequenos e médios produtores, concentrando a aplicação em rebanhos de maior valor agregado (Babaniyi *et al.*, 2024). Além disso, a infraestrutura necessária e a qualificação profissional atuam como empecilhos notáveis, uma vez que a técnica exige laboratórios de alta precisão, equipamentos específicos e profissionais capacitados para garantir a execução correta dos protocolos e o controle rigoroso em todas as etapas (Zargar; Shakib; Khamseh, 2024).

Outra questão a ser observada quando se fala sobre os desafios relacionados a PIVE é a variabilidade dos resultados, uma vez que as taxas de gestação após a técnica ainda são influenciadas por fatores biológicos e ambientais, como a qualidade dos oócitos, a receptividade uterina das receptoras e o estresse térmico (Capela; Leite; Pereira, 2025). Pinheiro *et al.* (2024) relataram que fatores genéticos também modulam a eficiência

reprodutiva, com diferenças claras entre genótipos zebuínos e taurinos no desempenho da técnica. Nesse contexto, a padronização e o controle de qualidade em todas as etapas surgem como desafios contínuos, essenciais para reduzir a imprevisibilidade e garantir consistência nos resultados (Da Silva *et al.*, 2024).

Limitações adicionais são observadas em espécies específicas, como a bubalina, nas quais a PIVE ainda enfrenta limitações relacionados às características fisiológicas próprias da espécie e à necessidade de adaptar protocolos desenvolvidos inicialmente para bovinos (Rehman *et al.*, 2021). A escolha e a seleção de receptoras configuram um fator determinante, já que alterações endometriais, deficiências hormonais e falhas na sincronização do ciclo estral podem comprometer a taxa de prenhez (Parisi *et al.*, 2023). Estratégias de pré-seleção de receptoras, como a avaliação da presença de corpo lúteo funcional, têm sido estudadas como forma de ampliar a eficiência da técnica (Souza-Fabjan *et al.*, 2023).

Apesar dos obstáculos, as perspectivas para a PIVE no Brasil mostram-se promissoras, uma vez que a integração com biotecnologias emergentes, como a edição gênica, a clonagem e o uso de biomarcadores moleculares, tendem a ampliar a precisão na seleção embrionária e aumentar as taxas de sucesso (Maciel *et al.*, 2025). O desenvolvimento de métodos não invasivos para avaliar a qualidade embrionária, como análises metabólicas do meio de cultivo, também desponta como tendência prósperas, permitindo uma triagem mais eficiente e menos agressiva dos embriões (Meng *et al.*, 2025).

É importante destacar que a técnica ainda se alinha a princípios de sustentabilidade, ao multiplicar fêmeas geneticamente superiores e possibilitar maior produtividade por área sem a necessidade de expansão territorial (Polar *et al.*, 2021). Esse ganho em eficiência contribui para a redução da emissão de gases de efeito estufa por unidade de produto, em consonância com as metas globais de pecuária de baixo carbono (Zhu *et al.*, 2023). Além disso, a combinação da PIVE com outras biotecnologias, como o uso de sêmen sexado e a IATF, potencializa o impacto do melhoramento genético e viabiliza planejamentos produtivos mais estratégicos (Baruselli *et al.*, 2019).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A PIVE representa um marco no avanço das biotecnologias reprodutivas aplicadas à bovinocultura, oferecendo benefícios significativos em termos de ganho genético, aumento da produtividade e sustentabilidade dos sistemas de produção. Entretanto,

conforme ressaltado na revisão, sua eficiência ainda é modulada por fatores complexos, que incluem a idade e a raça das doadoras, a qualidade oocitária, a condição fisiológica das receptoras, além da influência de variáveis ambientais, como o estresse térmico e a sazonalidade.

Apesar dos entraves relacionados ao custo, à infraestrutura e à padronização dos protocolos, o Brasil consolidou-se como líder mundial na aplicação da técnica, beneficiado por uma ampla base genética zebuína e pelo contínuo investimento em pesquisa e inovação. O futuro da PIVE no país tende a ser impulsionado pela integração com outras biotecnologias, como o uso de sêmen sexado, a inseminação artificial em tempo fixo e o desenvolvimento de métodos não invasivos de avaliação embrionária.

Dessa forma, a consolidação de estratégias que considerem a otimização técnica e a acessibilidade econômica e a sustentabilidade ambiental, será determinante para ampliar o alcance da PIVE. Ao alinhar ciência, inovação e gestão zootécnica, a biotecnologia poderá continuar contribuindo de forma decisiva para a competitividade da pecuária nacional e para a construção de um modelo produtivo mais eficiente e sustentável.

5. REFERÊNCIAS

ABADIAS, Ivalmir Mota et al. Identificação dos principais impactos ambientais ocasionados pelo manejo da pecuária no município de Humaitá-AM. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, n. 2, p. 664-682, 2020.

ABEBE, Belete Kuraz et al. A review of emerging technologies, nutritional practices, and management strategies to improve intramuscular fat composition in beef cattle. **Animal Biotechnology**, v. 35, n. 1, p. 2388704, 2024.

ABIEC – Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes. **Beef Report 2024: Brazilian Beef Profile**. São Paulo: ABIEC, 2024.

AKASHA, Mozammel Hoquea; MONDALB, Sukanta; ADUSUMILLIC, Satish. Sustainable livestock production and food security. **Emerging Issues in Climate Smart Livestock Production: Biological Tools Techniques**, v. 71, 2021.

AL-SUHAIMI, Ebtesam A.; KHAN, Firdos Alam; HOMEIDA, A. M. Regulation of male and female reproductive functions. In: **Emerging concepts in endocrine structure and functions**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. p. 287-347.

AMARAL, Hallya Beatriz Sousa. **Uso de antioxidantes na produção in vitro de embriões bovinos**. 2022. 29 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Medicina Veterinária) - Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2022.

ANILKUMAR, C. et al. Advances in integrated genomic selection for rapid genetic gain in crop improvement: a review. **Planta**, v. 256, n. 5, p. 87, 2022.

ARAÚJO, Dayana Silva; DOS SANTOS, Rafael Monteiro. Eventos fisiológicos e etapas de desenvolvimento na produção *in vitro* de embriões bovinos-revisão. **Sinapse Múltipla**, v. 14, n. 1, p. 259-275, 2025.

ARYA, Damini; GOSWAMI, Rashmi; SHARMA, Mridula. Estrous synchronization in cattle, sheep and goat. **Multidisciplinary Reviews**, v. 6, n. 1, p. 2023001-2023001, 2023.

BABANIYI, Gabriel Gbenga *et al.* Reproductive Endocrinology Drug Development: Hormones, Metabolism, and Fertility in Female Reproductive Health. In: **Perspectives of Quorum Quenching in New Drug Development**. CRC Press, p. 187-206, 2024.

BALL, Peter JH; PETERS, Andy R. **Reproduction in cattle**. John Wiley & Sons, 2008.

BARBARESCO, Vinícius Silva. **Avaliação do valor econômico de uma empresa do setor agrícola: o caso da BrasilAgro sob a perspectiva do fluxo de caixa descontado**. 2025. 122 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2025

BARUSELLI, Pietro Sampaio *et al.* Challenges to increase the AI and ET markets in Brazil. **Animal Reproduction**, v. 16, p. 364-375, 2019.

BATISTA, Emiliana de Oliveira Santana *et al.* Hepatic mRNA expression of enzymes associated with progesterone metabolism and its impact on ovarian and endocrine responses in Nelore (*Bos indicus*) and Holstein (*Bos taurus*) heifers with differing feed intakes. **Theriogenology**, v. 143, p. 113-122, 2020.

BATISTELA, Márcio Vinícius Velho *et al.* Produção *in vitro* de embriões e novas estratégias na produção de oócitos em bovinos. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer – Jandaia-GO, v. 20, n. 46, p. 201–219, 2023.

BHATTACHARYA, Indrashis; SEN SHARMA, Souvik; MAJUMDAR, Subeer S. Pubertal orchestration of hormones and testis in primates. **Molecular Reproduction and Development**, v. 86, n. 11, p. 1505-1530, 2019.

BLACKBURN, Harvey D.; AZEVEDO, Hymerson Costa; PURDY, Phillip H. Incorporation of biotechnologies into gene banking strategies to facilitate rapid reconstitution of populations. **Animals**, v. 13, n. 20, p. 3169, 2023.

BOTSAS, George et al. Environmental Influences on Individuals with Autistic Spectrum Disorders with Special Emphasis on Seasonality: An Overview. **Children**, v. 10, n. 12, p. 1851, 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Anuário estatístico da agropecuária brasileira 2022. Brasília: MAPA, 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Relatório anual de exportações brasileiras de carne bovina 2024. Brasília: MAPA, 2024.

CAMBRUSSI, Anallyne Nayara Carvalho Oliveira et al. O papel da nanotecnologia na redução do estresse oxidativo: uma revisão. **Boletim Informativo Geum**, v. 9, n. 2, p. 1, 2018.

CAPELA, Luís; LEITES, Inês; PEREIRA, Rosa MLN. Heat Stress from Calving to Mating: Mechanisms and Impact on Cattle Fertility. **Animals**, v. 15, n. 12, p. 1747, 2025.

CENTERI, Csaba. Effects of grazing on water erosion, compaction and infiltration on grasslands. **Hydrology**, v. 9, n. 2, p. 34, 2022.

CHAGAS, Vanessa M. et al. Fatores anatomofisiológicos que afetam a qualidade oocitária em bovinos. **Pesquisa Veterinária Brasileira**, v. 34, n. Suppl 1, p. 34-38, 2014.

CHANDRA, Vikash; SEJIAN, Veerasamy; SHARMA, G. Taru. Strategies to improve livestock reproduction under the changing climate scenario. In: **Climate change impact on livestock: adaptation and mitigation**. New Delhi: Springer India, p. 425-439, 2015.

CHAVES, Ana Sofia et al. Body condition in small ruminants—Effects of nutrition on the hypothalamic–pituitary–gonad axis and ovarian activity that controls reproduction. **Physiology**, v. 4, n. 2, p. 213-225, 2024.

CHENG, Yi et al. Multidimensional Toxicity of Organophosphate Pesticides and Mitigation Strategies for Agricultural Sustainability. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 73, n. 29, p. 18047-18062, 2025.

CHOPRA, Mani et al. In vitro fertilization and embryo transfer. In: **Biodiversity**. CRC Press, p. 309-324, 2022.

COOKE, Reinaldo F. et al. Cattle adapted to tropical and subtropical environments: genetic and reproductive considerations. **Journal of animal science**, v. 98, n. 2, p. skaa015, 2020.

CORDEIRO, Fábio Athair Ribeiro. **Biotécnicas avançadas da reprodução de bovinos no APL lácteo do oeste goiano**. 2024. 53f. Dissertação (Mestrado em Produção Animal e Forragicultura) – Universidade Estadual de Goiás, São Luís de Montes Belos, GO.

COSTA, Oberdan; COSTA, Mariana Santos; FRAJBLAT, Marcel. Revisão do papel da inteligência artificial nas técnicas de reprodução assistida. **Recisatec-Revista Científica Saúde E Tecnologia**, v. 5, n. 3, p. e53384-e53384, 2025.

COSTA, Thays Correa et al. Inovações tecnológicas no manejo da pastagem e do pastejo frente às perspectivas de mudanças climáticas. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 4, p. e28211426472-e28211426472, 2022.

DA SILVA, Júlio César Leite et al. Excelência em qualidade: transformando processos e resultados. **Revista Tópicos**, v. 2, n. 12, p. 1-15, 2024.

DA SILVA, Luiz Ricardo Mantovani. **Ciência, Tecnologia e Sociedade**. Freitas Bastos, 2024.

DA SILVA, Mery Any Nascimento; DE MELLO, Marco Roberto Bourg; PALHANO, Helcimar Barbosa. Inseminação artificial e inseminação artificial em tempo fixo em bovinos. **Revista Científica do UBM**, p. 79-97, 2021.

DAS, D. N.; PAUL, D.; MONDAL, Sukanta. Role of biotechnology on animal breeding and genetic improvement. In: **Emerging issues in climate smart livestock production**. Academic Press, p. 317-337, 2022.

DAY, Michael L.; NOGUEIRA, Guilherme P. Management of age at puberty in beef heifers to optimize efficiency of beef production. **Animal frontiers**, v. 3, n. 4, p. 6-11, 2013.

DAYOUB, Moammar et al. Enhancing animal production through smart agriculture: Possibilities, hurdles, resolutions, and advantages. **Ruminants**, v. 4, n. 1, p. 22-46, 2024.

DE OLIVEIRA, Edenis Cesar; CARRARO, Nilton Cezar. Análise do comportamento e participação do agronegócio na composição do produto interno bruto (PIB) brasileiro: Um estudo da série temporal de 1996 a 2017. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 11, p. 24042-24064, 2019.

DE SOUZA, Ricardo Menezes; RIBEIRO, Juliana Costa. The Impact of Brazil's Agricultural Export Boom on Domestic Food Security. **Law and Economy**, v. 4, n. 1, p. 38-47, 2025.

DICK, Milene et al. Environmental impacts of Brazilian beef cattle production in the Amazon, Cerrado, Pampa, and Pantanal biomes. **Journal of Cleaner Production**, v. 311, p. 127750, 2021.

DONATO, K. et al. Unleashing the potential of biotechnology for sustainable development. **European Review for Medical and Pharmacological Sciences**, v. 27, n. 6 Suppl, p. 100-113, 2023.

DURU, Michel; THEROND, Olivier. Livestock system sustainability and resilience in intensive production zones: which form of ecological modernization?. **Regional environmental change**, v. 15, n. 8, p. 1651-1665, 2015.

ELLIS, Erle C. Land use and ecological change: A 12,000-year history. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 46, n. 1, p. 1-33, 2021.

ESTILL, Charles T. Initiation of puberty in heifers. **Bovine Reproduction**, p. 258-268, 2021.

FATEMI, Human et al. Dose adjustment of follicle-stimulating hormone (FSH) during ovarian stimulation as part of medically-assisted reproduction in clinical studies: a systematic review covering 10 years (2007–2017). **Reproductive Biology and Endocrinology**, v. 19, n. 1, p. 68, 2021.

FEITOSA, Marlon de Sousa; FERREIRA, Orilene Martins. **Agricultura familiar: desenvolvimento sustentável e os desafios enfrentados na atualidade**. 2024. 34 f. Monografia (Bacharelado de Administração) - Universidade Estadual do Piauí, Uruçuí, 2024.

FERRAZ JR, M. V. C. et al. A combination of nutrition and genetics is able to reduce age at puberty in Nelore heifers to below 18 months. **animal**, v. 12, n. 3, p. 569-574, 2018.

FERRAZ, Marcia de Almeida Monteiro Melo; FERRONATO, Giuliana de Avila. Opportunities involving microfluidics and 3D culture systems to the in vitro embryo production. **Animal Reproduction**, v. 20, n. 2, p. e20230058, 2023.

FERREIRA, Eduarda Queiroz. **Expansão da produção agropecuária no Cerrado Mineiro: análise da mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba a partir da década de 1990**. 2024. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Econômicas) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.

FESKENS, Edith JM *et al.* Women's health: optimal nutrition throughout the lifecycle. **European Journal of Nutrition**, v. 61, n. Suppl 1, p. 1-23, 2022.

GAVIOLI, Victória D'Amario. **Desenvolvimento de dispositivo microfluídico para biópsia líquida de células tumorais circulantes**. 2025. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) - Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2025.

GONÇALVES, Rômany Louise Ribeiro; VIANA, João Henrique Moreira. Situação atual da produção de embriões bovinos no Brasil e no mundo. **Revista Brasileira de Reprodução Animal**, v. 43, n. 2, p. 156-159, 2019.

GRÁZIA, João Gabriel Viana de. **Produção *in vitro* de embriões (PIVE) na bovinocultura de leite e de corte**. 2019. 161 f. Tese (Doutorado em Ciência Animal) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Veterinária, Belo Horizonte, 2019.

HANSEN, Peter J. Some challenges and unrealized opportunities toward widespread use of the in vitro-produced embryo in cattle production. **animal**, v. 17, p. 100745, 2023.

HARFUCH, Leila; LOBO, Gustavo Dantas; CRUZ, Gabriela Mota da. *Sustentabilidade na cadeia da carne: caminhos para o Brasil e os aprendizados do P4F*. 1. ed. São Paulo: Agroicone, 2023. ISBN 978-85-5655-030-9.

HASLER, John F.; BARFIELD, Jennifer P. In vitro fertilization. **Bovine reproduction**, p. 1124-1141, 2021.

HASSAN, Sahar et al. Perceived barriers and opportunities of providing quality family planning services among Palestinian midwives, physicians and nurses in the West Bank: a qualitative study. **BMC Health Services Research**, v. 24, n. 1, p. 786, 2024.

HERRICK, J. R.; SILVA, E.; KRISHER, R. L. Usos de novas ferramentas analíticas para produção de melhores embriões in vitro. **Anais da XXX Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Tecnologia de Embriões**, p. 78, 2016.

HEW, Yaling et al. Artificial Intelligence in IVF Laboratories: Elevating Outcomes Through Precision and Efficiency. **Biology**, v. 13, n. 12, p. 988, 2024.

HOSSAIN, Akbar et al. Agricultural land degradation: processes and problems undermining future food security. In: **Environment, climate, plant and vegetation growth**. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 17-61.

HUNT, Oliver Bugge; TILSTED, Joachim Peter. 'Risk on steroids': Investing in the hydrogen economy. **Environment and Planning A: Economy and Space**, p. 0308518X241255225, 2024.

IBGE – Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. **Pesquisa Pecuária Municipal 2023**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

KANTANEN, Juha et al. Maternal and paternal genealogy of Eurasian taurine cattle (*Bos taurus*). **Heredity**, v. 103, n. 5, p. 404-415, 2009.

KEREILWE, Onalenna. Advances in supplementation strategies for enhancing bovine in vitro embryo production: a review of growth factors and antioxidants. **Journal of Assisted Reproduction and Genetics**, p. 1-15, 2025.

KIDIE, Habtie Arega. Review on growth and development of multiple ovulation and embryo transfer technology in cattle. **World Scientific News**, v. 127, n. 3, 2019.

KOLACHI, Hubdar Ali et al. Fixed-time artificial insemination technology in buffaloes: a review. **Frontiers in Veterinary Science**, v. 12, p. 1586609, 2025.

KUEPPER, Barbara et al. Brazilian beef supply chain under pressure amid worsening ESG impacts. **Chain Reaction Research is a coalition of Aidenvironment, Profundo and Climate Advisers**, 2020.

KUMAR, Pratap; SAIT, Sameer Farouk. Luteinizing hormone and its dilemma in ovulation induction. **Journal of human reproductive sciences**, v. 4, n. 1, p. 2-7, 2011.

LAMB, G. C. et al. Control of the estrous cycle to improve fertility for fixed-time artificial insemination in beef cattle: a review. **Journal of Animal Science**, v. 88, n. suppl_13, p. E181-E192, 2010.

LATAWIEC, Agnieszka E. et al. Intensification of cattle ranching production systems: socioeconomic and environmental synergies and risks in Brazil. **animal**, v. 8, n. 8, p. 1255-1263, 2014.

LAWRENCE, Simon; MUPA, Munashe Naphtali. Innovative approaches to enhancing logistics for adapting to the evolving demands of manufacturing companies in East Africa through improved lean strategies. **World Journal of Advanced Research and Reviews**, v. 23, p. 2179-2198, 2024.

LI, Zhiqiang et al. Retrospect and prospect: reproductive technologies in beef cattle. **Molecular Biology Reports**, v. 52, n. 1, p. 1-11, 2025.

LIMA, Fabio S. et al. Steroidogenic, metabolic, and immunological markers in dairy cows diagnosed with cystic ovarian follicles at early and mid-late lactation. **Frontiers in veterinary science**, v. 6, p. 324, 2019.

LONERGAN, P. Historical and futuristic developments in bovine semen technology. **Animal**, v. 12, n. s1, p. s4-s18, 2018.

LUEDKE, Felipe Eduardo et al. Aspectos da produção in vitro de embriões bovinos no Brasil–revisão. **Pesquisa agropecuária gaúcha**, v. 25, n. 1/2, p. 120-132, 2019.

LUEDKE, Felipe Eduardo. Aspectos técnicos da produção in vitro de embriões bovinos - revisão. 2018. 45 f. Trabalho de Conclusão (Graduação) – Curso de Bacharelado em Zootecnia, Universidade Federal do Pampa, Dom Pedrito, RS.

MACIEL, Kézia Coelho; MASQUIO, Jaqueline Assini; TEIXEIRA, Mayra Meneguelli. Produção in vitro de embriões bovinos: Revisão de literatura. **Research, Society and Development**, v. 14, n. 6, p. e6314649073-e6314649073, 2025.

MALAFIA, Guilherme Cunha et al. A mensuração do produto interno bruto do complexo da bovinocultura de corte no Brasil. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 38, n. 2, p. e26777-e26777, 2021.

MANFRIN, Caroline. **Composição físico-química de frutas, verduras e legumes sob sistemas de cultivo orgânico e convencional e o Programa Nacional de Alimentação Escolar no Paraná, Brasil: uma revisão sistemática de literatura**. 2022. 114 f. Dissertação (Mestrado em Agroecologia) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, 2022.

MARTINS, Sávio S. C. **Desenvolvimento in vitro de embriões bovinos usando células-tronco mesenquimais de rato e fibroblastos embrionárias de camundongos**. 2015. 114 f. Dissertação (Mestrado em Reprodução, Sanidade e Bem-estar Animal) - Universidade José do Rosário Vellano, 2015.

MEBRATU, Biruh; FESSEHA, Haben; GOA, Eyob. Embryo transfer in cattle production and its principle and applications. **International Journal of Pharmacy & Biomedical Research**, v. 7, n. 1, p. 40-54, 2020.

MEDEIROS, Ivo et al. Historical evolution of cattle management and herd health of dairy farms in OECD countries. **Veterinary sciences**, v. 9, n. 3, p. 125, 2022.

MENCHACA, Alejo. Assisted Reproductive Technologies (ART) and genome editing to support a sustainable livestock. **Animal reproduction**, v. 20, n. 2, p. e20230074, 2023.

MENG, Hui et al. Rapid and non-invasive diagnostic techniques for embryonic developmental potential: a metabolomic analysis based on Raman spectroscopy to identify the pregnancy outcomes of IVF-ET. **Frontiers in Cell and Developmental Biology**, v. 11, p. 1164757, 2023.

MIKKOLA, Marja et al. Recent advancements to increase success in assisted reproductive technologies in cattle. **Animal reproduction**, v. 21, n. 3, p. e20240031, 2024.

MISHRA, Harshit. Environmental degradation and impacts on agricultural production: A challenge to urban sustainability. In: **Sustainable urban environment and waste**

management: Theory and practice. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. p. 53-92.

MIYAUCHI, Tochimara Aparecida. **Biological aspects of preimplantation development of parthenogenetic or fertilized in vitro bovine embryos.** 2012. 93 f. Dissertação (Mestrado em Reprodução Animal) - Universidade Jose do Rosario Vellano, Alfenas, 2012.

MOGHADAM, Ali Reza Eftekhari et al. Oocyte quality and aging. **JBRA assisted reproduction**, v. 26, n. 1, p. 105, 2022.

MOORE, S. G.; HASLER, J. F. A 100-Year Review: Reproductive technologies in dairy science. **Journal of dairy science**, v. 100, n. 12, p. 10314-10331, 2017.

MOROTTI, Fábio; LORENZETTI, Elis; SENEDA, Marcelo Marcondes. Artificial Insemination Program in Cattle. In: **Sustainable Agriculture Reviews 54: Animal Biotechnology for Livestock Production 1.** Cham: Springer International Publishing, p. 1-53, 2021.

MOTTA, Jessica CL et al. Advances in synchronization and superstimulation for OPU/IVF: optimizing oocyte quantity and quality. **Reproduction, Fertility and Development**, v. 37, n. 1, 2024.

MUELLER, Maci L.; VAN EENENNAAM, Alison L. Synergistic power of genomic selection, assisted reproductive technologies, and gene editing to drive genetic improvement of cattle. **CABI Agriculture and Bioscience**, v. 3, n. 1, p. 13, 2022.

MURILLO, Julio Mateo Flórez. **Avançando o bem-estar e a sustentabilidade na pecuária: descobrindo mutações causativas para edição gênica visando melhorar a tolerância ao calor.** Tese (Doutorado em Ciências Veterinárias) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2024.

MUSA, Innocent Ojeba et al. Soil erosion, mineral depletion and regeneration. In: **Prospects for soil regeneration and its impact on environmental protection.** Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. p. 159-172.

NONATO JUNIOR, I. *et al.* Produção de embriões em vacas Nelore com a utilização associada de FIV e TE. **Reunião anual da sociedade brasileira de tecnologia de embriões**, v. 18, p. 95, 2004.

OLIVEIRA, Louise H. et al. Follicle superstimulation before ovum pick-up for in vitro embryo production in Holstein cows. **Journal of Dairy Science**, v. 99, n. 11, p. 9307-9312, 2016.

OLIVEIRA, Lucas; SILVA, Carlos Eduardo Cardoso Consentini; SARTORI, Roberto. Por que a IATF é uma ferramenta imprescindível para se otimizar a eficiência reprodutiva em rebanhos leiteiros?. **Rev Bras Reprod Anim**, v. 45, n. 4, p. 335-343, 2021.

OMONTESE, Bobwealth Oakina. Estrus Synchronization and Artificial Insemination in. **Goat Science**, p. 131, 2018.

PAL, Prasanna; DAR, Mohammad Rayees. Induction and Synchronization. **Animal Reproduction in Veterinary Medicine**, p. 133, 2021.

PARISI, Fenizia et al. The pathophysiological role of estrogens in the initial stages of pregnancy: molecular mechanisms and clinical implications for pregnancy outcome from the periconceptional period to end of the first trimester. **Human reproduction update**, v. 29, n. 6, p. 699-720, 2023.

PEIXOTO, Estanislao. The Challenges of Making a Blastocyst-Stage Embryo: Impact of Heat Stress & Technical Factors Associated with IVP Procedures. 2010.

PEREIRA, Mariana de A. et al. From traditionally extensive to sustainably intensive: a review on the path to a sustainable and inclusive beef farming in Brazil. **Animals**, v. 14, n. 16, p. 2340, 2024.

PEREIRA, Pedro A. Arraes et al. The development of Brazilian agriculture: future technological challenges and opportunities. **Agriculture & Food Security**, v. 1, n. 1, p. 4, 2012.

PINHEIRO, Antônia Kaylyanne et al. Parâmetros genéticos da produção in vitro de embriões das raças Nelore e Senepol. **Ciência Animal Brasileira**, v. 25, p. 77620E, 2024.

PINHEIRO, V. G. et al. Effects of temporary calf removal and eCG on pregnancy rates to timed-insemination in progesterone-treated postpartum Nelore cows. **Theriogenology**, v. 71, n. 3, p. 519-524, 2009.

POLAR, Vivian et al. Examining choice to advance gender equality in breeding research. **Advancing gender equality through agricultural and environmental research: past, present, and future**, v. 77, 2021.

RABELO, Delma Machado Cantisani. **Implementação de protocolos de rastreabilidade na Comercialização da carne bovina**. 2024. 28 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Zootecnia) – Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Brasil, 2024

RAMOS, Alexandre Floriani. **Efeito de progesterona e benzoato de estradiol na dinâmica folicular e produção in vitro de embriões bovinos**. 2006.40 f. Tese (Doutorado em Ciência Animal) – Escola de Veterinária, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

RAPIYA, Monde et al. Assessing the Economic Viability of Sustainable Pasture and Rangeland Management Practices: A Review. **Agriculture**, v. 15, n. 7, p. 690, 2025.

REHMAN, Saif Ur et al. Whole-genome sequencing and characterization of buffalo genetic resources: recent advances and future challenges. **Animals**, v. 11, n. 3, p. 904, 2021.

REIS, Adriana Novaes dos et al. Efeito do estradiol e da progesterona no desenvolvimento e na qualidade de embriões bovinos produzidos in vitro. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 62, p. 1375-1380, 2010.

RESENDE, JC de et al. Determinantes de lucratividade em fazendas leiteiras de Minas Gerais. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 68, n. 04, p. 1053-1061, 2016.

RODRIGUES, Geraldo Stachetti et al. Integrated farm sustainability assessment for the environmental management of rural activities. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 30, n. 4, p. 229-239, 2010.

ROTH, Zvi. Effect of heat stress on reproduction in dairy cows: insights into the cellular and molecular responses of the oocyte. **Annual Review of Animal Biosciences**, v. 5, p. 151-170, 2017.

SALAMANCA, Álvaro Enríquez de et al. Environmental impacts of climate change adaptation. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 64, p. 87-96, 2017.

SALES, José Nélío de Sousa et al. Effects of a high-energy diet on oocyte quality and in vitro embryo production in *Bos indicus* and *Bos taurus* cows. **Journal of dairy science**, v. 98, n. 5, p. 3086-3099, 2015.

SALJNIKOV, Elmira et al. Types of physical soil degradation and implications for their prevention and monitoring. In: **Advances in Understanding Soil Degradation**. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 43-73.

SANDS, Don PA. Important issues facing insect conservation in Australia: now and into the future. **Austral Entomology**, v. 57, n. 2, p. 150-172, 2018.

SANTOS, Marília da Silva et al. Produção *in vitro* de embriões bovinos: revisão de literatura. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 10, e6314649073, 2022.

SARTORI, Roberto et al. Update and overview on assisted reproductive technologies (ARTs) in Brazil. **Animal Reproduction (AR)**, v. 13, n. 3, p. 300-312, 2018.

SCANAVEZ, A. L.; CAMPOS, C. C.; SANTOS, R. M. Taxa de prenhez e de perda de gestação em receptoras de embriões bovinos produzidos *in vitro*. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 65, p. 722-728, 2013.

SERRANO, João et al. Sensing and mapping the effects of cow trampling on the soil compaction of the montado Mediterranean ecosystem. **Sensors**, v. 23, n. 2, p. 888, 2023.

SHAH, Farooq; WU, Wei. Soil and crop management strategies to ensure higher crop productivity within sustainable environments. **Sustainability**, v. 11, n. 5, p. 1485, 2019.

SHAHEB, Md Rayhan; VENKATESH, Ramarao; SHEARER, Scott A. A review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production. **Journal of Biosystems Engineering**, v. 46, n. 4, p. 417-439, 2021.

SI, Ruishi; AZIZ, Noshaba; RAZA, Ali. Short and long-run causal effects of agriculture, forestry, and other land use on greenhouse gas emissions: evidence from China using VECM approach. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 45, p. 64419-64430, 2021.

SIEGEL, Karen M.; LIMA, Mairon G. Bastos. When international sustainability frameworks encounter domestic politics: The sustainable development goals and agri-food governance in South America. **World Development**, v. 135, p. 105053, 2020.

SILVA, Marina de Oliveira. **Efeito da idade de fêmeas Nelore na produção in vitro de embriões e taxas de gestação**. Dissertação (Mestrado em Reprodução Animal - Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios, 2021.

SILVA, Ana Laura. **Efeitos de diferentes concentrações de melatonina na maturação oocitária e/ou cultivo embrionário sobre as taxas de produção de embriões bovinos cultivados in vitro**. 2024. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Zootecnia) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Dracena, 2024.

SILVA, Antonio Marcos Miranda; ARAÚJO, Victor Lucas Vieira Prudêncio de; BARROS, Timóteo Herculino da Silva. A Saúde dos solos agrícolas frente às mudanças climáticas globais. **A Sustentabilidade Ambiental da Agricultura e de Florestas Tropicais: Uma Visão Científica, Ecológica, Política e Social**, 2021.

SILVA, Felipe et al. **Soja: do plantio à colheita**. Oficina de Textos, 2022.

SILVA, Henrique da; SANTOS, Leandro de Lima. A contribuição da Tecnologia da Informação na agricultura para o desenvolvimento sustentável. **Ciência & Trópico**, v. 48, n. 2, 2024.

SILVA, R. Reis et al. Is pregnancy failure still a major concern for bovine in vitro-produced embryos?. **Reproduction, Fertility and Development**, v. 35, n. 2, p. 131-132, 2022.

SINGH, K. K. et al. The role of biotechnology in shaping the future of modern agriculture. **Journal of Advances in Biology & Biotechnology**, v. 27, n. 11, p. 621-634, 2024.

SOARES, Lucas Ferreira. **Influência do escore de cio na taxa de concepção observado através do uso do bastão marcador em vacas submetidas à inseminação artificial em tempo fixo (IATF)**. 2021. 46 f. Relatório de Estágio (Bacharelado em Medicina Veterinária) – Centro Universitário Católica do Tocantins, Palmas, 2021.

SOLOMON, Peter Olanrewaju. **Evaluating the numerical abnormalities in human embryos**. 2024. 77 f. Dissertação (Mestrado em Biologia Médica e Genética) – Near East University, Institute of Graduate Studies, Department of Medical Genetics, Nicosia, 2024.

SOUSA, Renata Patrícia. **Sistema de co-cultivo de folículos ovarianos pré-antrais caprinos com células-tronco mesenquimais**. 2020. 93 f. Tese (Doutorado em Biotecnologia) – Uni

SOUZA, Anne Kemmer; SENEDA, Marcelo Marcondes. Principais desafios para a utilização de embriões na pecuária de precisão. **Rev. bras. reprod. anim**, p. 83-94, 2025.

SOUZA, Maurício Novaes. Degradação ambiental pelo fator antrópico: uma breve análise da agropecuária, seus impactos ao meio ambiente e formas de mitigação. **Tópicos em recuperação de áreas degradadas Volume II**, 2021.

SOUZA-FABIAN, Joanna MG et al. Reproductive biotechnologies applied to the female sheep and goat. In: **Sustainable Agriculture Reviews 59: Animal Biotechnology for Livestock Production 3**. Cham: Springer Nature Switzerland, p. 1-57, 2023.

SUN, Cheng-Juan et al. Evaluating the Safety and Efficacy of Intraoperative Cell Salvage in Cesarean Delivery for Placenta Accreta Spectrum: A Propensity Score-Matched Retrospective Study. **International Journal of Women's Health**, p. 1393-1406, 2025.

TEIXEIRA, Juliana Roland. **Transporte e cultivo de embriões bovinos por 24, 48 e 72 horas antes da transferência**. 2013. 52 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Veterinárias – Produção Animal) – Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Medicina Veterinária, Uberlândia, 2013.

TERRY, Stephanie A. et al. Strategies to improve the efficiency of beef cattle production. **Canadian Journal of Animal Science**, v. 101, n. 1, p. 1-19, 2020.

THORNE, Peter; CONROY, Czech. Research on livestock, livelihoods, and innovation. In: **Agricultural systems**. Academic Press, 2017. p. 303-330.

TRENKEL, Camila Keterine Gorzelanski; NETO, Adalgiza Pinto; CICHOSKI, Leandro Francisco; ROSIN, Matheus Ramos; CATTELAM, Jonatas. Taxa de gestação após transferência de embriões bovinos produzidos *in vitro*. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 11, e166111131002, 2022.

VAN LOON, Jelle et al. Scaling agricultural mechanization services in smallholder farming systems: Case studies from sub-Saharan Africa, South Asia, and Latin America. **Agricultural systems**, v. 180, p. 102792, 2020.

VIANA, João Henrique Moreira et al. A historical perspective of embryo-related technologies in South America. **Animal Reproduction**, v. 15, n. Suppl 1, p. 963, 2018.

VIZIACK, Mariana Pallú. **Efeito de diferentes biotécnicas reprodutivas (IA, TE e FIV) no desempenho produtivo e reprodutivo de fêmeas da raça Holandesa**. 2020. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

VOLTOLINI, Tadeu Vinhas et al. Estratégias de mitigação dos efeitos das alterações do clima no Semiárido brasileiro e adaptação dos sistemas produtivos pecuários. **Agricultura de baixa emissão de carbono em regiões semiáridas**, p. 151, 2022.

WASSIE, Simachew Bantigegn. Natural resource degradation tendencies in Ethiopia: a review. **Environmental systems research**, v. 9, n. 1, p. 1-29, 2020.

YADAV, Jay N. et al. Artificial Insemination and Embryo Transfer: Emerging Technologies in the Livestock Industry. **International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology**, v. 10, n. 2, p. 610868, 2025.

YANG, Huixia et al. Factors influencing the in vitro maturation (IVM) of human oocyte. **Biomedicines**, v. 9, n. 12, p. 1904, 2021.

YOUSUF, Mohammed; YUSUF, Abdi; MOHAMMED, Ibsadin. Review on current animal breeding and genetic technologies to increase production and productivity of cattle. **Journal of Animal Scientific Research**, v. 12, n. 1, p. 19-36, 2024.

ZARGAR, Maryam; SHAKIB, Mehrdad Hosseini; KHAMSEH, Abbas. Identification and Prioritization of Key Factors in Blockchain-Based Resilient Supply Chain Risk Management in the Laboratory Equipment Industry. **International Journal of Reliability, Risk and Safety: Theory and Application**, v. 7, n. 2, p. 79-100, 2024.

ZHAO, Cong; SUN, Lanming; ZHAO, Pin. Effects of sperm processing techniques on IVF pregnancy rates: a mini-review. **Therapeutic Advances in Reproductive Health**, v. 17, p. 26334941231188656, 2023.

ZHU, Zhiping et al. Greenhouse gas emissions from livestock in China and mitigation options within the context of carbon neutrality. **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, v. 10, n. 2, p. 226-233, 2023.

ZUAZO, Víctor Hugo Durán; PLEGUEZUELO, Carmen Rocío Rodríguez. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers: a review. **Sustainable agriculture**, p. 785-811, 2009.

CAPÍTULO 2

EFICIÊNCIA REPRODUTIVA EM PROGRAMAS COMERCIAIS DE PIVE: IMPACTO DA SAZONALIDADE, IDADE DA DOADORA E ESTÁDIO EMBRIONÁRIO

Eficiência reprodutiva em programas comerciais de PIVE: impacto da sazonalidade, idade da doadora e estágio embrionário

Reproductive efficiency in commercial IVF programs: impact of seasonality, donor age, and embryonic stage

Resumo

A produção *in vitro* de embriões (PIVE) constitui uma biotecnologia estratégica para o aumento da eficiência reprodutiva e do ganho genético na pecuária de corte brasileira; entretanto, seu desempenho é influenciado por múltiplos fatores ambientais, biológicos e laboratoriais. O presente estudo teve como objetivo avaliar, de forma integrada, o impacto da sazonalidade, da idade da doadora e do estágio embrionário sobre a eficiência oocitária, a produção embrionária e a taxa de prenhez em um programa comercial de PIVE com fêmeas Nelore. Foram analisados dados provenientes de 168 sessões de aspiração folicular (OPU) e 2.019 transferências de embriões realizadas entre 2023 e 2025, utilizando-se uma abordagem analítica híbrida e modelos lineares generalizados mistos (GLMM). Os resultados indicaram que a estação seca promoveu uma redução aproximada de 17% na quantidade de oócitos viáveis, caracterizando um gargalo quantitativo na produção. Contudo, a eficiência de conversão oócito-embrião e a taxa de prenhez não foram significativamente afetadas pela sazonalidade, evidenciando resiliência do sistema produtivo. A idade da doadora apresentou efeito quadrático sobre a produção oocitária e embrionária, com pico na maturidade fisiológica. A taxa de prenhez foi influenciada predominantemente pelo estágio de desenvolvimento embrionário, sendo os blastocistos expandidos, em eclosão e eclodidos associados às maiores chances de gestação. Conclui-se que o sucesso reprodutivo em programas comerciais de PIVE depende mais da qualidade intrínseca do embrião do que de fatores ambientais no momento da transferência, fornecendo subsídios relevantes para o aprimoramento do manejo reprodutivo e da tomada de decisão em sistemas de produção bovina.

Palavras-chave: Produção *in vitro* de embriões, aspiração folicular, eficiência reprodutiva, sazonalidade, estágio embrionário, Nelore.

Abstract

In vitro embryo production (IVP) is a strategic biotechnology for improving reproductive efficiency and accelerating genetic gain in Brazilian beef cattle; however, its performance is influenced by multiple environmental, biological, and laboratory-related factors. This study aimed to evaluate, in an integrated manner, the effects of seasonality, donor age, and embryonic developmental stage on oocyte yield, embryo production, and pregnancy rate in a commercial IVP program using Nelore cows. Data from 168 ovum pick-up (OPU) sessions and 2,019 embryo transfers performed between 2023 and 2025 were analyzed using a hybrid analytical approach and generalized linear mixed models (GLMM). The dry season resulted in an approximately 17% reduction in the number of viable oocytes, representing a quantitative bottleneck in production. Nevertheless, oocyte-to-embryo conversion efficiency and pregnancy rate were not significantly affected by seasonality, indicating resilience of both laboratory performance and recipient cows throughout the year. Donor age showed a quadratic effect on oocyte and embryo

production, with higher efficiency at physiological maturity. Pregnancy rate was predominantly influenced by the embryonic developmental stage, with expanded, hatching, and hatched blastocysts exhibiting the highest likelihood of pregnancy. In conclusion, reproductive success in commercial IVP programs depends more on intrinsic embryo quality than on environmental factors at the time of transfer, providing valuable insights for improving reproductive management and decision-making in cattle production systems.

Keywords: *In vitro* embryo production, ovum pick-up, reproductive efficiency, seasonality, embryonic developmental stage, Nelore.

1 INTRODUÇÃO

A eficiência reprodutiva é um pilar crítico para a sustentabilidade e competitividade dos sistemas de criação de gado de corte, pois tem um efeito multiplicativo no rebanho. Essa eficiência é particularmente importante nas fases pré e pós-parto, especialmente dadas as demandas do mercado internacional de carne bovina. Sendo assim, a melhoria dos índices reprodutivos impacta diretamente a produtividade e a sustentabilidade na pecuária de corte brasileira (Barcelos *et al.*, 2025).

Cumprir destacar que de acordo com o relatório *Beef Report*, publicado pela ABIEC (2024), a indústria de pecuária de corte do Brasil é parte fundamental de sua economia, com um faturamento mais altos da história em 2023, atingindo cerca de US\$ 10,55 bilhões e representando cerca de 8,2% do PIB brasileiro. O rebanho brasileiro chegou a 197 milhões em 2023, sendo considerado o maior rebanho comercial do mundo. Em 2023, 71,3% da produção foi para o mercado interno e 28,5% para exportação, o que tornou o país o maior exportador de carne bovina do mundo, sendo responsável por 18,7% de toda carne comercializada do mundo.

Diante desse contexto, faz-se necessário considerar estratégias para a melhoria da eficiência reprodutiva do animal, de modo a impactar positivamente a produtividade econômica desse setor. Algumas dessas estratégias são citadas por Barcelos *et al.* (2025), dentre elas as biotecnologias reprodutivas. Tecnologias como a inseminação artificial em tempo fixo (IATF) são vitais para otimizar os índices reprodutivos e reduzir as perdas, uma vez que essa tecnologia permite o uso intensivo de genética superior e aumenta consistentemente a eficiência reprodutiva sem a necessidade de mover animais reprodutores, facilitando a disseminação da genética da taurina, especialmente nas regiões tropicais.

Também nesse contexto, os autores citam que alguns desafios devem ser considerados, como o estresse térmico provocado por altas temperaturas e umidade, que

podem prejudicar a produção de espermatozóides em touros, afetando sua fertilidade. Para que esses efeitos sejam diminuídos, os autores citam que a melhoria da infraestrutura de pastagem com sombra natural ou artificial demonstraram ser estratégias eficazes para mitigar o estresse térmico (Barcelos *et al.*, 2025).

Outra importante tecnologia reprodutiva é a produção *in vitro* de embriões (PIVE), em bovinos essa tecnologia melhorou significativamente a seleção genética em rebanhos, pois permite que uma única fêmea de alto valor, ou aquelas incapazes de se reproduzir naturalmente, produza vários filhotes, reduzindo assim os intervalos geracionais. O Brasil é referência nessa técnica, sendo o segundo maior produtor de embriões *in vitro* em 2023, perdendo apenas para os Estados Unidos e sendo responsável por mais de 470 mil inseminações em 2023. No entanto, de acordo com a Viana (2024), esse número é subestimado uma vez que nem todas as inseminações são informadas aos órgãos competentes.

O desempenho desse sistema, no entanto, está sujeito a variáveis complexas que atuam em diferentes etapas do processo reprodutivo. Em relação à dinâmica folicular da fêmea bovina, a atividade transcricional do oócito é descontinuada durante a foliculogênese e pouco detectável nos folículos primordiais, intensamente ativa nos folículos primários e se inativa progressivamente à medida que o oócito atinge seu diâmetro máximo. A configuração da cromatina dentro do oócito evolui durante o crescimento e, em bovinos, a cromatina progride de uma aparência filamentosa para um único grande aglomerado em estágios posteriores. O RNA materno em oócitos está sujeito ao controle pós-transcricional, envolvendo cis-elementos na região 3' não traduzida (UTR) que regulam o armazenamento e a ativação translacional e a poliadenilação citoplasmática, um mecanismo para esse controle, é amplamente conservada em todas as espécies, incluindo mamíferos (Dalbies-Tran *et al.*, 2020).

O oócito desempenha um papel central na condução do desenvolvimento folicular e no controle da taxa de ovulação por meio do diálogo molecular com as células da granulosa e do cumulus e esse diálogo envolve tanto os canais intercelulares (junções comunicantes) quanto a produção de citocinas e fatores de crescimento. Cumpre salientar ainda, que o oócito é uma célula que exige alta energia e seu desenvolvimento é significativamente afetado por mudanças nutricionais e metabolismo lipídico e é este último uma das principais funções moduladas pelas células cumulus ao redor do oócito bovino, afetando sua taxa de maturação. Ademais, os oócitos contêm gotículas lipídicas abundantes, servindo como reserva de energia e essas diferenças influenciam a

sensibilidade do embrião à temperatura, cultura e criopreservação (Dalbies-Tran *et al.*, 2020).

O processo de PIVE bovina envolve várias etapas laboratoriais interconectadas, normalmente realizadas dentro de uma infraestrutura de laboratório de reprodução animal e começa com a coleta de oócitos e culmina na classificação de embriões viáveis. Os oócitos podem ser obtidos de animais vivos por meio de aspiração folicular guiada por ultrassom (OPU) ou de ovários coletados de fêmeas abatidas e permite a utilização intensiva de material genético de fêmeas superiores, mesmo aquelas com problemas reprodutivos ou idade avançada. Os oócitos podem ser coletados dos ovidutos após a ovulação ou dos folículos pré-ovulatórios, muitas vezes imaturos, fazendo-se necessário a maturação oocitária *in vitro* (Luedjke *et al.*, 2019).

A implementação da coleta de óvulo guiada por ultrassom (OPU), juntamente com a genômica quantitativa e a biologia de sistemas, criou novas oportunidades para selecionar doadores de oócitos e embriões para aprimorar as estratégias de reprodução. Quando os oócitos são aspirados usando técnicas como OPU, eles são colhidos de um pool heterogêneo de folículos, normalmente variando de 2 a 8 mm de diâmetro, embora seja comum que nem todos esses oócitos sejam totalmente competentes ou provenientes de folículos dominantes, uma das vantagens do uso desse método é a recuperação em um mesmo ovário de oócitos em diferentes estágios de desenvolvimento (Stroebech *et al.*, 2015).

Para determinar a qualidade oocitária, faz-se necessário a utilização de alguns critérios, como aqueles evidenciados por Gonçalves *et al.* (2008). De acordo com os autores, os oócitos podem ser categorizados em quatro graus de qualidade com base no aspecto das células do cúmulus e na aparência do ooplasma. Os oócitos de Grau I apresentam cúmulus compactos com mais de três camadas de células e ooplasma homogêneo, sendo considerados os de maior viabilidade. Os de Grau II possuem cúmulus igualmente compactos, porém com menos camadas celulares e ooplasma heterogêneo. Já os oócitos de Grau III exibem cúmulus expandido e ooplasma contraído, com formação de espaço entre a membrana plasmática e a zona pelúcida. Por fim, os oócitos de Grau IV encontram-se parcial ou totalmente desnudos, apresentando ooplasma de coloração anormal e baixa competência para o desenvolvimento.

Após a coleta, os oócitos são analisados e classificados com base na presença de células cumulus e nas características do ooplasma e, em seguida, selecionados para maturação *in vitro*. A presença dessas células é considerada essencial para aquisição de

competência oocitária e desenvolvimento embrionário. Após a maturação, os oócitos são movidos para um ambiente apropriado para fertilização com espermatozóides capacitados, alocados de modo a garantir a qualidade oocitária do sêmen por meio de palhetas de sêmen congeladas. Esse processo envolve a fusão dos pronúcleos masculino e feminino para formar um zigoto, iniciando o desenvolvimento de um novo organismo multicelular (Luedjke *et al.*, 2019).

Os oócitos fertilizados são, então, transferidos para um meio de cultura onde se desenvolvem até o estágio de blastocisto. Esse desenvolvimento pré-implantação envolve eventos críticos, como ativação do genoma embrionário, divisão celular e diferenciação e deve-se manter as condições ideais de cultura, incluindo temperatura e atmosfera gasosa, de modo a garantir o sucesso da produção de embriões. Por fim, o desenvolvimento do embrião é avaliado por volta do 6º ou 7º dia de cultura, avaliando a compactação do blastômero e a formação do blastocisto (Luedjke *et al.*, 2019).

De acordo Viana (2009), deve-se observar alguns critérios de classificação morfológica para avaliar a qualidade dos embriões produzidos. Essa classificação baseia-se em um código numérico que, para o estágio de desenvolvimento, vai de 1 (oócito não fecundado) até 9, que diz respeito ao blastocisto eclodido e expandido. Já sobre a qualidade dos embriões, a classificação varia de 1 a 4, sendo Grau 1 correspondente a embriões excelentes ou bons, Grau 2 a embriões regulares, Grau 3 a embriões de baixa qualidade e Grau 4 a embriões degenerados ou inviáveis. Essa classificação padronizada permite avaliar de forma objetiva o potencial de desenvolvimento e implantação embrionária, orientando a seleção para transferência.

A respeito das diferenças morfofuncionais entre os diferentes estágios dos embriões, observa-se que:

Quadro 1 - Classificação embrionária

Estádio	Morfologia
Mórula (MO)	Blastômeros ainda evidentes, porém não é possível determinar número exato. Massa de células ocupa maior parte do espaço dentro da zona pelúcida. Período caracterizado pelo fim da fase de celularização e da transição materno zigótica e início do processo de compactação.
Mórula compacta (MOC)	A compactação torna a massa de células coesa, dificultando individualização dos blastômeros, e causa retração do embrião em relação à zona pelúcida, com aumento do espaço perivitelino. Formação de junções adesão de oclusão entre células, preparando

	o embrião para a formação da blastocele.
Blastocisto inicial (BI)	Blastômeros criam gradiente osmótico que atrai água para o espaço intercelular, iniciando a formação de uma cavidade denominada blastocele. Perda da totipotência, com a formação de duas populações celulares distintas: o trofoblasto, que reveste a blastocele e a massa celular interna (MCI), lateral à blastocele.
Blastocisto (BL)	Blastocele aumenta de tamanho, tornando-se proporcionalmente maior que a massa celular interna e ocupando gradualmente todo o espaço perivitelínico. Trofoblasto sofre diferenciações morfológicas e funcionais associadas à captação de nutrientes, enquanto células MCI mantêm potencialidade.
Blastocisto expandido (BX)	Expansão da blastocele causa aumento de tamanho do embrião e progressiva redução na espessura da zona pelúcida (ZP). Maior desenvolvimento do trofoblasto, a MUI é visível dependendo da posição do embrião.
Blastocisto em eclosão (BN)	O embrião entra no processo de eclosão a partir da ZP desprendida
Blastocisto eclodido (BE)	O rompimento da ZP caracteriza a eclosão, como embrião entrando em contato direto com os tecidos maternos.

Fonte: Viana (1998).

Cumprir destacar que alguns fatores da receptora influenciam no sucesso da gestação. Choi et al. (2023) por meio de um estudo realizado com novilhas e vacas puderam identificar que as taxas de prenhez foram significativamente maiores em novilhas em comparação com vacas em lactação e entre receptoras com corpo lúteo maior que 1,5 cm. Os autores sugerem que as taxas de prenhez podem ser melhoradas selecionando receptoras com tamanhos ideais de CL ($1,5 \text{ cm} < \text{CL} \leq 2,5 \text{ cm}$) e excluindo aquelas com baixos níveis de P4 ($\leq 2,0 \text{ ng/mL}$)

Dayan (2021) também identificou a influência significativa da sincronização do destinatário para as taxas de prenhez. A transferência de embriões nos dias 7, 8 e 9 após o estro (D7, D8, D9) resultou em taxas de prenhez significativamente maiores ($38,01\% \pm 0,79$; $38,01\% \pm 0,79$; $38,78\% \pm 0,79$, respectivamente). As transferências no dia 5 ($15,48\% \pm 0,92$) e no dia 6 ($27,67\% \pm 0,85$) após o estro mostraram taxas de gestação significativamente mais baixas.

A interação entre o estágio embrionário e a sincronização do destinatário também foi um fator determinante observado. Segundo o estudo, blastocistos (BI) e blastocistos expandidos (BX) transferidos para receptores sincronizados D7 e D8 produziram os

melhores resultados, enquanto mórulas (MO) e blastocistos iniciais (BI) mostraram melhores taxas de gestação quando transferidos para receptores sincronizados D6, D7 e D8, com D7 sendo ideal. As transferências para receptores sincronizados D5 resultaram em menores taxas de gestação, indicando condições uterinas desfavoráveis para implantação nesta fase (Dayan, 2021).

Esses resultados contrastam com o observado por Mello *et al.* (2016), que não identificaram nenhum efeito significativo do grau de assincronia na taxa de gestação, uma vez que uma variação de ± 1 dia na assincronia não impactou estatisticamente o sucesso da gestação. De acordo com o estudo, as taxas de prenhez consistentes entre os grupos podem ser atribuídas ao bom manejo nutricional e sanitário das novilhas receptoras, que foram provenientes de um centro comercial de embriões e selecionadas regularmente.

Souza *et al.* (2025) também consideraram a avaliação precisa do CL como um fator considerado relevante para o sucesso da transferência de embriões, especialmente considerando sua função vital de secretar progesterona, um hormônio essencial para preparar o útero para a gestação e manter a gestação. Segundo o estudo, o CL3 alcançou a maior taxa de concepção (50,25%), em sequência, o CL2 apresentou uma taxa de concepção de 38,75% e, por fim, o CL1 teve uma taxa de concepção de 37,25%. Ou seja, foi possível perceber que as receptoras com CL3 tiveram uma taxa de gestação significativamente maior ($P < 0,05$) em comparação com todos os outros grupos de CL. No entanto, não houve diferença significativa nas taxas de concepção entre os próprios grupos CL1 e CL2 ($P > 0,05$).

Por fim, o estudo conclui que, quando possível, vacas receptoras com um corpo lúteo maior (CL3) devem ser preferidas no momento da transferência do embrião para maximizar as taxas de concepção. A análise morfológica do corpo lúteo por meio da ultrassonografia é crucial para selecionar receptores, especialmente na transferência de embriões frescos ou criopreservados, para promover maiores taxas de concepção no rebanho (Souza *et al.*, 2025).

Com base na literatura analisada, percebe-se que poucos estudos analisam, simultaneamente, a eficiência reprodutiva ocasionada pelo uso da OPU e a taxa de prenhez, além de relacionar a outros fatores como variáveis ambientais como a sazonalidade, características biológicas como a idade da doadora, elementos laboratoriais como o estágio embrionário e uterinas, como a classe do CL. Ademais, ainda menos pesquisas aplicam modelagem GLMM para dados de sistemas reais, como dados de campo e grandes rebanhos, o que reforça a originalidade da presente pesquisa.

Deste modo, a investigação buscou questionar quais são os fatores produtivos, ambientais, biológicos e embrionários que influenciam a eficiência oocitária, a produção de embriões e a taxa de prenhez em um programa comercial de PIVE com fêmeas Nelore.

Nesse contexto, torna-se cientificamente relevante a realização de análises a campo, utilizando metodologias estatísticas robustas capazes de considerar a estrutura hierárquica dos dados. Tem-se como objetivo, portanto, propor uma avaliação integrada da eficiência oocitária, da produção embrionária e da taxa de prenhez em um programa comercial de PIVE, contribuindo para o aprimoramento do manejo reprodutivo e para a tomada de decisão em sistemas de produção bovina.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi conduzido a partir de dados de produção provenientes de sessões de aspiração folicular (OPU) e de transferências de embriões de doadoras bovinas da raça Nelore, referentes ao período de 2024 e 2025. Os dados foram disponibilizados pela empresa BRIO EMBRYO, laboratório especializado em produção *in vitro* de embriões (PIVE), localizado em Araguaína, Tocantins.

Foram analisadas informações provenientes de 168 sessões de aspiração folicular realizadas na Fazenda Arco Íris, situada no município de Açailândia, Maranhão. Todas as sessões de OPU foram executadas pelo mesmo técnico, o que assegurou padronização metodológica e minimização da variabilidade operacional. Os animais utilizados nos programas de acasalamento e na produção *in vitro* pertenciam à categoria PO (Puro de Origem) e possuíam registro oficial na Associação Brasileira de Criadores de Zebu (ABCZ), garantindo rastreabilidade e alto padrão genético do plantel.

2.1 Procedimentos da técnica de produção *in vitro* de embriões

Os oócitos foram coletados por meio da técnica de aspiração folicular por via transvaginal guiada por ultrassonografia (Ovum Pick-up – OPU). Esses oócitos foram classificados em quatro graus, de acordo com a qualidade intracelular e a quantidade de células do cúmulus, conforme Gonçalves *et al.* (2008):

Grau I – apresentou células do cúmulus compactas, com mais de três camadas, e ooplasma granulado preenchendo a zona pelúcida;

Grau II – apresentou células do cúmulus compactas, com menos de três camadas, e ooplasma com granulações distribuídas heterogeneamente;

Grau III – apresentou células do cúmulus expandidas, com ooplasma contraído e presença de espaço entre a membrana celular e a zona pelúcida;

Grau IV – os oócitos encontravam-se parcial ou totalmente desnudos de células do cúmulus, com citoplasma de coloração e granulações anormais.

Após a seleção, os oócitos foram encaminhados ao laboratório para maturação *in vitro* e mantidos em incubadora a 38,5 °C, sob atmosfera controlada com 5% de CO₂, por um período de 20 a 22 horas.

Para a fertilização *in vitro*, foi utilizado sêmen convencional obtido de centrais de comercialização, sendo o touro escolhido conforme os critérios de seleção do criador. O protocolo utilizado foi baseado na técnica de centrifugação por gradiente descontínuo de Percoll. A concentração espermática foi ajustada para 5×10^6 espermatozoides/mL. A incubação de oócitos e espermatozoides foi realizada em estufa de cultivo intracelular, sob atmosfera de 5% de CO₂ e temperatura de 38,5 °C, por 18 a 21 horas.

Para o cultivo *in vitro*, as células do cúmulus foram removidas dos zigotos, que então foram mantidos em incubadora a 38,5 °C e 5% de CO₂. No dia três (D3) após a fertilização, foi realizada a avaliação da taxa de clivagem, e no dia sete (D7) foi efetuada a classificação dos embriões conforme o estágio de desenvolvimento, seguindo o manual da Sociedade Internacional de Transferência de Embriões (Viana, 2009), exceto para o estágio Blastocisto em Eclosão (BN), classificado segundo metodologia específica do laboratório:

Estádio 1 – Mórula (MO): estrutura com blastômeros ainda evidentes;

Estádio 2 – Blastocisto Inicial (BI): início de formação da blastocèle;

Estádio 3 – Blastocisto (BL): aumento da blastocèle ocupando maior parte da zona pelúcida;

Estádio 4 – Blastocisto Expandido (BX): maior expansão da blastocèle, com redução da espessura da zona pelúcida;

Estádio 5 – Blastocisto em Eclosão (BN): início do rompimento da zona pelúcida;

Estádio 6 – Blastocisto Eclodido (BE): zona pelúcida rompida, permitindo contato direto do embrião com tecidos maternos.

Simultaneamente às etapas da PIVE, ocorreu a preparação das receptoras para inovulação, seguindo o protocolo descrito nas figuras abaixo. O protocolo foi iniciado no:

- Dia zero (D0): inserção do dispositivo intravaginal contendo 1 g de progesterona (P4, CRONIPRES®, Biogénesis Bagó) e aplicação de 2 mL de benzoato de estradiol (BE, BIOESTROGEN®, Biogénesis Bagó);
- Dia oito (D8): retirada do implante e aplicação de 2 mL de prostaglandina (PGF₂α, CRONIBEN®, Biogénesis Bagó), 300 UI (1,5 mL) de gonadotrofina coriônica equina (eCG, ECEGON®, Biogénesis Bagó) e 2 mL de cipionato de estradiol (CI, CRONI-CIP®, Biogénesis Bagó);
- Dia dezessete (D17): foi realizada a inovulação dos embriões.

O diagnóstico de gestação foi efetuado aos 30 e 60 dias após a transferência. Em todas as fases, foram registradas as informações em banco de dados referente a cada etapa do processo.

2.2 Estrutura experimental

Para garantir a integridade da avaliação de eficiência oocitária e eliminar vieses decorrentes da ausência de rastreabilidade de lotes de congelamento, adotou-se uma Abordagem Analítica Híbrida, estratificada em duas etapas distintas:

Análise de Eficiência de Produção (Oócito → Embrião): para esta etapa, foi aplicado um algoritmo de data linkage rigoroso para parear as sessões de aspiração com seus respectivos resultados de produção embrionária. Foram incluídas na análise apenas as sessões que atenderam simultaneamente a três critérios de inclusão ("Tripla Confirmação"):

- Identificação inequívoca da Doadora;
- Identificação inequívoca do Touro utilizado na fertilização;
- Intervalo temporal entre OPU e TE de 7 a 9 dias (transferência a fresco).

Este critério restritivo foi adotado para isolar o efeito das variáveis ambientais e fisiológicas sobre a competência oocitária imediata, excluindo variáveis de confusão associadas aos processos de criopreservação e descongelamento, bem como erros de imputação de lotes (Bó e Mapletoft, 2013). Sessões de aspiração sem correspondência de

transferência na janela de 7-9 dias foram contabilizadas como "produção zero" ou "falha total de conversão" para fins de cálculo de eficiência a fresco.

Análise de Taxa de Prenhez: para a avaliação da taxa de prenhez, utilizou-se a totalidade do banco de dados de transferências (N=2.215), incluindo embriões frescos e descongelados. Nesta etapa, a unidade experimental foi a receptora, assumindo-se que a variável resposta (gestação confirmada aos 30-60 dias) é primariamente dependente das condições uterinas e da qualidade intrínseca do embrião, independentemente do intervalo temporal desde a aspiração.

2.3 Variáveis analisadas

As variáveis dependentes foram modeladas de acordo com sua natureza distributiva:

- Contagens (Discretas): Número de Oócitos Viáveis, Oócitos em Maturação (MIV) e Embriões Produzidos;
- Binária (Dicotômica): Diagnóstico de Gestação (0 = Vazia, 1 = Prenhe).

As variáveis explicativas (fixas) incluíram:

- Sazonalidade: Categorizada em "Chuva/Verde" (Jan-Mai) e "Seca/Seco" (Jun-Dez), baseada nos índices pluviométricos da região;
- Estágio do Embrião: Classificado detalhadamente em Blastocisto Eclodido (BE), Blastocisto em Eclosão (BN), Blastocisto Expandido (BX), Blastocisto (BL) e Blastocisto Inicial (BI). O estágio "Mórula" foi excluído das análises de prenhez devido à ausência de eventos positivos (separação completa). O estágio "Blastocisto Expandido" (BX) foi definido como nível de referência por apresentar a maior frequência amostral;
- Idade da Doadora: Modelada como termo polinomial de segunda ordem ($\text{Idade} + \text{Idade}^2$) para capturar a curva biológica de fertilidade;
- Ano: Para controle de variações anuais de manejo.

Para garantir a consistência dos dados categóricos, foi aplicado um pré-processamento de padronização de strings (remoção de espaços excedentes e conversão para maiúsculas) nas variáveis de identificação (Doadora, Touro, Receptora) e raça, eliminando duplicidades decorrentes de erros de digitação.

2.4 Análise estatística

As análises foram realizadas no ambiente estatístico R (R Core Team, 2024), utilizando a abordagem de Modelos Lineares Generalizados Mistos (GLMM).

Para as variáveis de contagem (Oócitos e Embriões), verificou-se a presença de superdispersão (variância superior à média), o que inviabilizou o uso da distribuição de Poisson. Consequentemente, ajustaram-se modelos baseados na distribuição Binomial Negativa (tipo 2), utilizando o pacote glmmTMB (Brooks *et al.*, 2017). A estrutura do modelo pode ser descrita como:

$$\text{logit}(\mu_{ijk}) = \alpha + X\beta + u_{\text{touro}} + u_{\text{receptora}}$$

Onde μ_{ijk} é a média esperada, β são os coeficientes fixos, e u_{doadora} representa o efeito aleatório da doadora (intercepto randômico), controlando a pseudorréplica decorrente de múltiplas aspirações do mesmo animal.

A taxa de prenhez foi analisada via regressão logística mista (família Binomial, função de ligação logit). O modelo incluiu efeitos aleatórios cruzados para Touro e Receptora:

$$\text{logit}(\mu_{ijk}) = \alpha + X\beta + u_{\text{touro}} + u_{\text{receptora}}$$

A qualidade do ajuste dos modelos foi verificada utilizando o pacote DHARMA (Hartig, 2022), através da análise de resíduos simulados baseados em quantis (Q-Q plots, testes de uniformidade KS e testes de dispersão). A significância dos efeitos fixos foi determinada por testes de Wald (Anova tipo III). As médias marginais estimadas (*Estimated Marginal Means*) foram calculadas e comparadas pelo método de Tukey utilizando o pacote emmeans. O nível de significância adotado foi de 5% ($P < 0.05$).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A integridade do banco de dados foi assegurada através da abordagem híbrida descrita na metodologia. Para a análise de eficiência produtiva, o cruzamento rigoroso entre as planilhas de Aspiração e Transferência resultou em 301 sessões validadas (com intervalo de 7 a 9 dias), garantindo que apenas embriões frescos com rastreabilidade inequívoca fossem contabilizados. Para a análise de prenhez, a utilização do dataset expandido permitiu avaliar 2.019 transferências, maximizando o poder estatístico.

A escolha da distribuição Binomial Negativa para os dados de contagem (oócitos e embriões) mostrou-se superior à distribuição de Poisson. O critério de informação de Akaike (AIC) reduziu de 3126.9 (Poisson) para 2326.4 (Binomial Negativa), confirmando o melhor ajuste aos dados que apresentavam superdispersão.

A análise de resíduos via pacote DHARMA confirmou a robustez dos modelos finais. Não foram detectados problemas significativos de dispersão ($P > 0.05$) ou inflação de zeros para as variáveis de oócitos viáveis e embriões produzidos. Para o modelo de prenhez, o teste de Kolmogorov-Smirnov nos resíduos indicou ajuste excelente ($D=0.012, P=0.98$).

3.1 Dinâmica da Produção Oocitária

A análise das sessões de aspiração revelou que a produção de oócitos viáveis foi significativamente influenciada pela sazonalidade ($P=0.013$) e pela idade da doadora ($P=0.008$), conforme detalhado na Tabela 1.

Tabela 1 - Estimativas dos modelos GLMM (Binomial Negativa) para produção *in vitro*

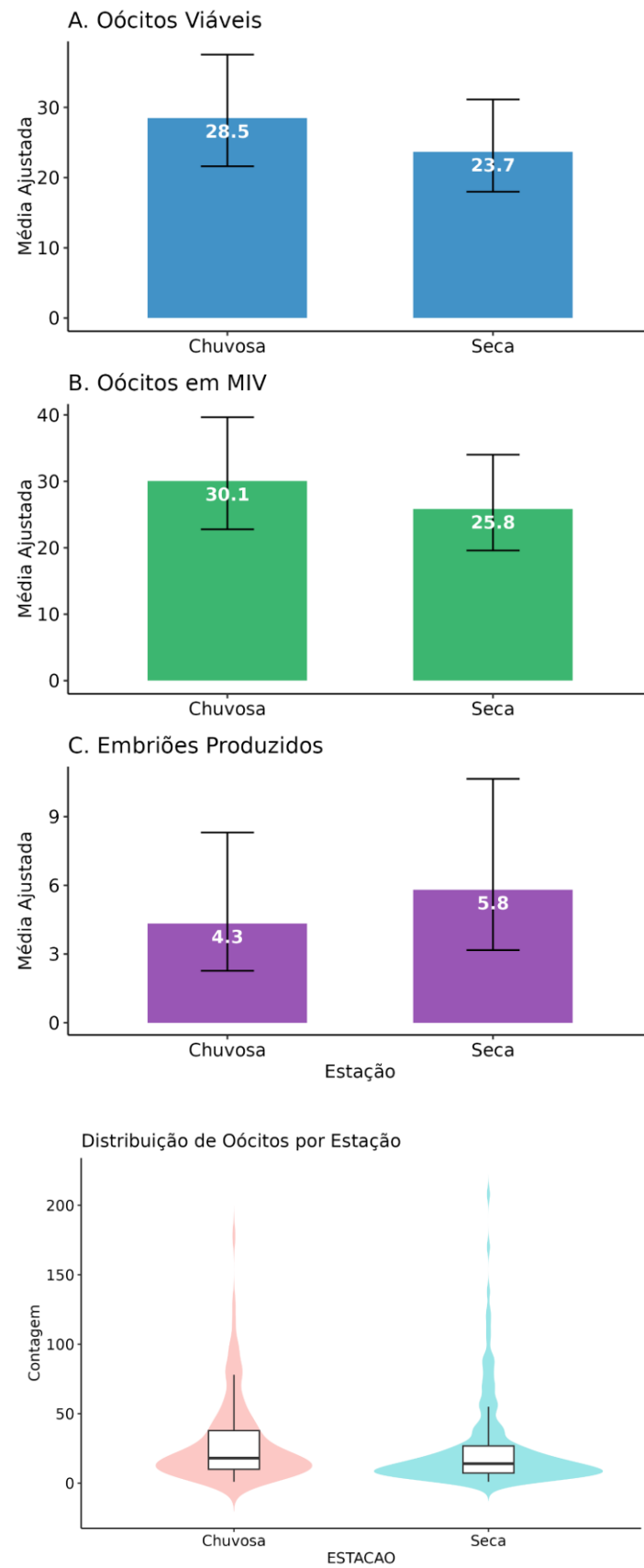
<i>Variáveis</i>	Oócitos Viáveis		Oócitos em MIV		Embriões Produzidos	
	<i>Razão de Taxas de Incidência</i>	<i>Intervalo de confiança</i>	<i>Razão de Taxas de Incidência</i>	<i>Intervalo de confiança</i>	<i>Razão de Taxas de Incidência</i>	<i>Intervalo de confiança</i>
(Intercepto)	44.57 ***	26.68 – 74.44	44.91 ***	26.83 – 75.15	0.42	0.09 – 2.01
ESTACAO [Seca]	0.83 *	0.72 – 0.96	0.86 *	0.74 – 0.99	1.34	0.78 – 2.30
ANO [2024]	0.92	0.78 – 1.09	0.93	0.79 – 1.10	0.55 *	0.31 – 0.97
ANO [2025]	1.02	0.75 – 1.40	1.02	0.75 – 1.39	1.41	0.47 – 4.22
IDADE ANOS	1.06	0.90 – 1.25	1.07	0.91 – 1.27	1.97 **	1.26 – 3.07
IDADE ANOS ²	0.99 **	0.97 – 1.00	0.98 **	0.97 – 1.00	0.95 **	0.93 – 0.98

* $p < 0.05$ ** $p < 0.01$ *** $p < 0.001$

Fonte: as autoras (2025).

Observou-se que a estação Chuvosa (Jan-Mai) é superior em termos quantitativos. Durante a estação Seca, houve uma redução estimada de 17% na contagem de oócitos viáveis (IRR = 0.83; IC 95%: 0.72 – 0.96). A Figura 1 ilustra essa diferença, corroborando a literatura que associa o estresse térmico e nutricional da seca à menor foliculogênese.

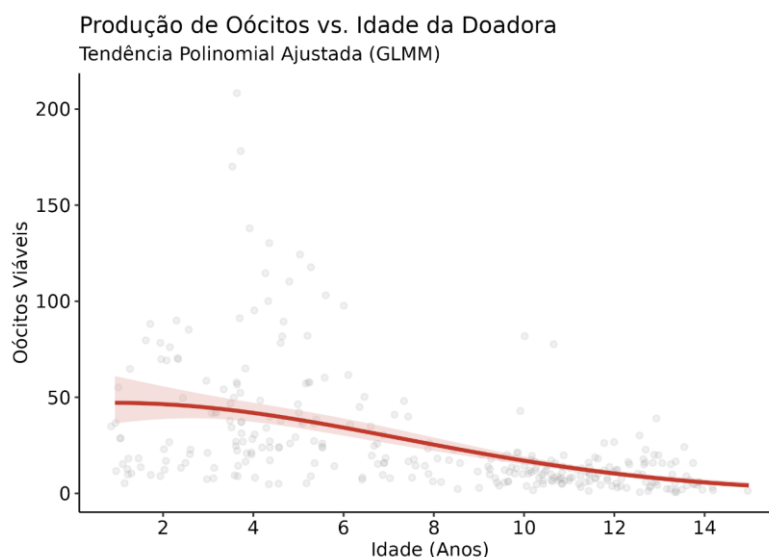
Figura 1 - Distribuição de oócitos por estação



Fonte: as autoras (2025).

A curva de idade apresentou comportamento quadrático significativo (Figura 2), indicando um pico de produção na maturidade fisiológica seguido de declínio senescente, padrão clássico em doadoras bovinas.

Figura 02 - Produção de oócitos vs idade da doadora



Fonte: as autoras (2025).

3.2 Eficiência de Conversão em Embriões (Fresco)

Um dado surpreendente e de alto valor zootécnico foi a ausência de efeito sazonal significativo na produção final de embriões ($P=0.29$, Tabela 1). Embora a estação Seca produza menos oócitos (como visto no item 3.1), a eficiência de conversão desses oócitos em embriões não foi estatisticamente inferior à das águas ($IRR = 1.34$; IC 95%: 0.78 – 2.30).

Isso sugere um fenômeno de compensação biológica ou técnica. É possível que, apesar de em menor número, os oócitos da seca possuam competência de desenvolvimento preservada, ou que o sistema de MIV (Maturação *In Vitro*) esteja corrigindo eventuais deficiências. Para o produtor, isso significa que aspirar na seca ainda é viável, pois a "perda" ocorre na coleta, mas não se agrava no laboratório.

3.3 Taxa de Prenhez

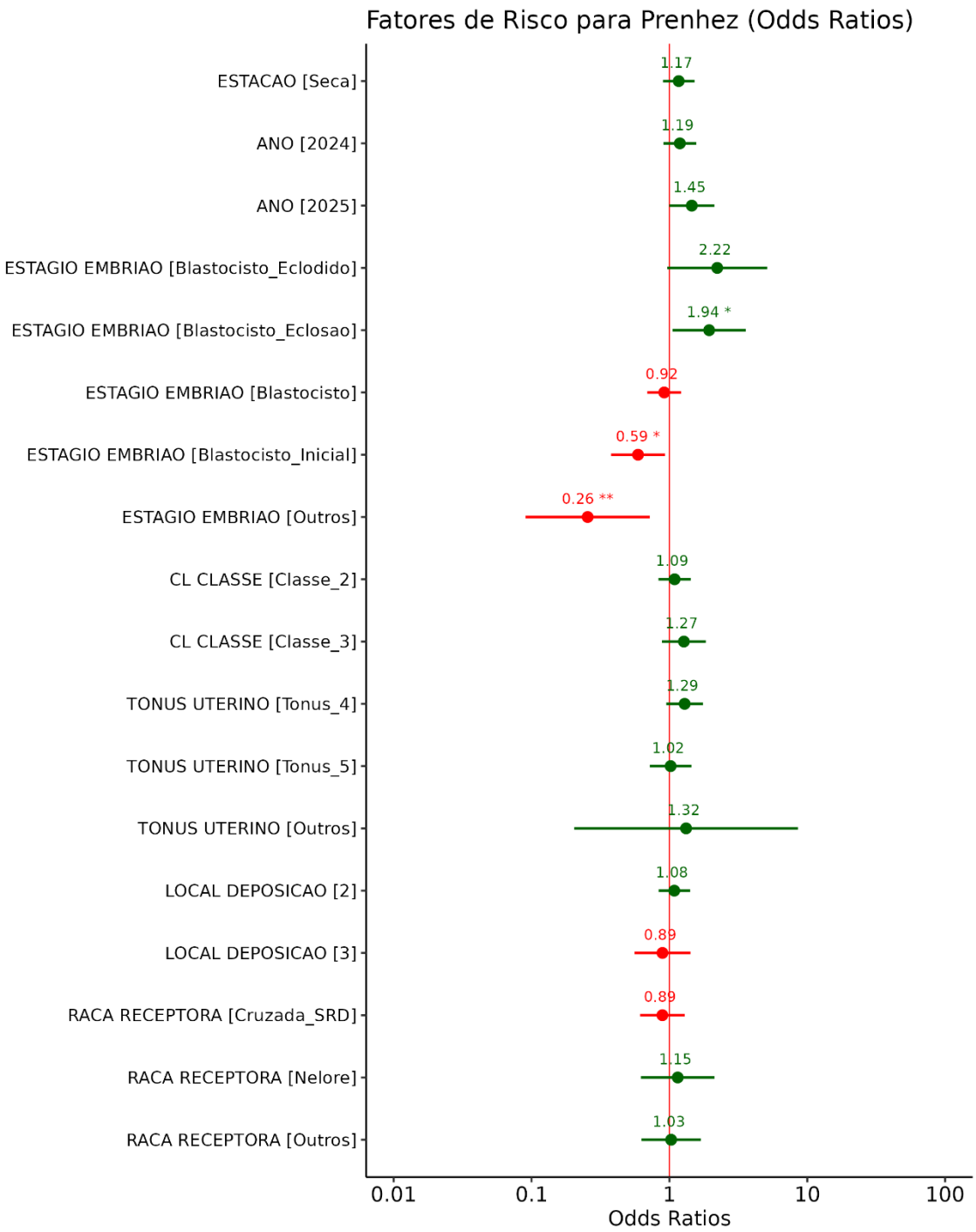
A análise global de 2.019 transferências resultou em uma taxa de prenhez média de 36.8%.

O modelo de regressão logística mista (Figura 3) demonstrou que a Sazonalidade não influenciou a taxa de prenhez ($P=0.32$). Uma vez que o embrião é produzido e transferido, a estação do ano (na data da TE) não alterou a chance de concepção.

O fator determinante para o sucesso da gestação foi o Estágio do Embrião ($P=0.022$). A análise detalhada dos estágios de desenvolvimento (BE, BN, BX, BL, BI) revelou nuances importantes quando comparados ao Blastocisto Expandido (BX), utilizado como referência devido à sua alta representatividade amostral ($N>1000$).

Conforme visualizado na Figura 3, embriões em estágios mais precoces, especificamente o Blastocisto Inicial (BI), apresentaram chances significativamente menores de prenhez (Odds Ratio < 1) em comparação aos Blastocistos Expandidos. Os estágios de eclosão (BE e BN) apresentaram taxas estatisticamente similares ao BX. Vale ressaltar que o estágio de "Mórula" foi removido da modelagem estatística devido à ausência total de prenhez neste grupo ($N=4$, 0 prenhez), o que inviabilizaria a estimativa dos parâmetros (erro de separação completa).

Figura 3 - Fatores de risco para prenhez



Fonte: as autoras (2025).

4 DISCUSSÃO

Por meio dos resultados desse estudo, foi possível evidenciar que a garantia de eficiência reprodutiva em programas comerciais de OPU-PIVE resulta de uma interação

eficaz entre diferentes elementos, como fatores quantitativos, qualitativos e biológicos, que atuam de forma distinta e complementar ao longo das diferentes fases do processo, garantindo assim o sucesso da operação. Uma importante observação verificada nos resultados é a redução significativa no número de oócitos viáveis que pôde ser verificada durante a estação seca.

Esse dado confirma a influência da sazonalidade sobre a dinâmica folicular em fêmeas bovinas criadas em ambiente tropical, o que também foi evidenciado por estudos prévios que associaram períodos de restrição nutricional e estresse térmico à diminuição da atividade ovariana (Dalbies-Tran *et al.*, 2020; Barcelos *et al.*, 2025). Diante desse cenário, é possível inferir que a seca representa um obstáculo quantitativo na produção oocitária, afetando a matéria-prima inicial do sistema.

Em pesquisas realizadas por Silva (2020) também identificou-se que o período mais quente do ano afeta negativamente a taxa de concepção quando inovulados devido ao estresse térmico. A autora justifica que, conforme observado pela literatura da área, animais nessas condições estão propícios a sofrer alterações comportamentais e fisiológicas como um mecanismo para manter a temperatura corporal neutra, de modo a reduzir os efeitos do aumento da temperatura e produzindo um maior nível de cortisol e a diminuição do estradiol.

Sakatami (2017) também identificou que o estresse térmico, particularmente durante o verão, reduz significativamente a produtividade do gado, com um impacto notável na reprodutividade do gado e esse efeito adverso é atribuído principalmente à temperatura corporal materna elevada, que interrompe as funções ovarianas e uterinas e induz a mortalidade embrionária.

Estudos mostram que a exposição dos complexos cumulus-oócitos (COCs) no estágio da vesícula germinativa (GV) a altas temperaturas (40,0° C a 41,0° C) prejudica a maturação nuclear e citoplasmática, levando ao aumento da formação anormal do fuso e à diminuição da competência de desenvolvimento. O estresse térmico também induz estresse oxidativo nos oócitos, aumentando os níveis de espécies reativas de oxigênio (ROS), que podem danificar o DNA e as organelas celulares, levando à apoptose (Sakatami, 2017).

A despeito da redução na disponibilidade de oócitos, também foi possível observar que a eficiência de conversão oócito-embrião não apresentou variação significativa entre as estações, indicando que a qualidade oocitária e o desempenho laboratorial foram preservados ao longo do ano. Esse fator pode indicar que, embora a

sazonalidade impacte a quantidade de oócitos aspirados, ela não compromete necessariamente sua competência de desenvolvimento quando são utilizados protocolos adequados de seleção, maturação e cultivo *in vitro*.

Esses elementos também corroboram com estudos anteriores, que já apontavam que melhorias nos meios de cultivo e no controle das condições laboratoriais podem mitigar efeitos ambientais indiretos sobre o desenvolvimento embrionário (Viana, 2009; Luedjke *et al.*, 2019), o que pode ser confirmado pelos resultados deste trabalho. Cadima (2022) também observou que o P/TE em si não mostrou uma diferença significativa entre as estações chuvosa e seca e isso pode ser justificado por práticas de manejo, como confinamento de animais, podem diminuir a influência da disponibilidade de chuva e forragem no desempenho reprodutivo.

De modo semelhante, a taxa de prenhez manteve-se estável independentemente da estação do ano, evidenciando a resiliência das receptoras e a eficácia dos protocolos de sincronização hormonal empregados. Esse resultado está em consonância com a literatura que destaca que, quando o manejo nutricional e reprodutivo das receptoras é adequadamente controlado, a influência de fatores ambientais externos sobre o estabelecimento da gestação tende a ser reduzida (Mello *et al.*, 2016; Souza *et al.*, 2025). Assim, os dados indicam que as etapas finais do sistema OPU–PIVE são menos sensíveis à sazonalidade do que a fase de produção oocitária.

Também de acordo com os achados de Mello *et al.* (2016) e Souza *et al.* (2025), percebeu-se a idade da doadora exerceu efeito significativo sobre a produção de oócitos e embriões, apresentando comportamento quadrático, com maior eficiência observada em fêmeas em idade reprodutiva intermediária. Esse padrão reflete a maturidade do eixo endócrino-reprodutivo, bem como a maior competência oocitária em animais que já ultrapassaram a fase de imaturidade fisiológica, mas ainda não apresentam declínio reprodutivo associado ao avanço da idade. Esses achados reforçam a importância da seleção criteriosa de doadoras para maximizar a eficiência dos programas de PIVE.

Entre os fatores avaliados, o estágio de desenvolvimento embrionário destacou-se como o principal determinante da taxa de prenhez, sendo os blastocistos expandidos, em eclosão e eclodidos associados às maiores probabilidades de estabelecimento gestacional, conforme já evidenciado pelo Manual da Sociedade Internacional de Transferência de Embriões (Viana, 2009).

Nesse contexto, Nogueira (2018) observou uma maior taxa de prenhez em embriões no estádios de blastocisto, blastocisto expandido e eclodido, o que pode ser

justificado pelo fato de que quanto mais maduro o embrião está, maior é sua tolerância térmica e o que também demonstra a transferência de embriões como uma importante técnica para manter a taxa de concepção de vacas durante o período de alto estresse térmico, pois nos estádios mais intensos o embrião está conservado na incubadora com temperatura controlada.

Diante disso, é possível inferir a partir dos achados da presente pesquisa em conformidade com outras semelhantes que a qualidade intrínseca do embrião supera a influência de fatores ambientais no momento da transferência.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos por meio da abordagem analítica híbrida permitiram delinear o cenário produtivo da Fazenda Arco-Íris. Foi possível observar que o principal gargalo qualitativo diz respeito ao período de estação seca, em que há uma redução aproximada de 17% na disponibilidade de oócitos, evidenciando a sensibilidade da produção oocitária às condições ambientais adversas.

Apesar dessa diminuição na matéria-prima inicial, verificou-se que a qualidade do processo reprodutivo se mantém estável ao longo do ano: tanto a eficiência laboratorial na conversão oócito-embrião quanto o desempenho das receptoras na taxa de prenhez não sofreram influência significativa da sazonalidade.

Por fim, os achados reforçam que o fator determinante para o sucesso reprodutivo final reside principalmente na qualidade intrínseca do embrião, especialmente no seu estágio de desenvolvimento no momento da transferência, e não em variáveis ambientais externas. Esses resultados fornecem subsídios importantes para o aprimoramento estratégico do manejo reprodutivo em sistemas comerciais de produção *in vitro*.

5. REFERÊNCIAS

ABIEC. **Beef Report 2024**. Disponível em: <https://abiec.com.br/publicacoes/beef-report-2024-perfil-da-pecuaria-no-brasil/>. Acesso em 13 dez. 2025.

ANDRADE, G. A. *et al.* Fatores que afetam a taxa de prenhez de receptoras de embriões bovinos produzidos *in vitro*. **Revista Brasileira de Reprodução Animal**, Belo Horizonte, v.36, n.1, p. 66-69, 2012. Disponível em: <http://www.cbpa.org.br/pages/publicacoes/rbra/v36n1/pag66-69.pdf>. Acesso em 13 dez. 2025.

BARCELLOS, J. O. J. *et al.* O papel da eficiência reprodutiva dos rebanhos e a inserção da carne bovina brasileira no mercado internacional. **Anais do XXVI Congresso Brasileiro de Reprodução Animal**, Curitiba, 2025. Disponível em: <http://www.cbra.org.br/portal/downloads/publicacoes/rbra/v49/n1/p.50-65.pdf>. Acesso em 13 dez. 2025.

CADIMA, G. P. **Efeito da sazonalidade e da raça sobre a produção de ovócitos, blastocistos e taxa de prenhez em fêmeas bovinas leiteiras**. 2022. 33 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Veterinárias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/44520>. Acesso em 07 jan. 2026.

CHOI, W. *et al.* Evaluation of Corpus Luteum and Plasma Progesterone the Day before Embryo Transfer as an Index for Recipient Selection in Dairy Cows. **Veterinary Sciences**, v. 10, n. 4, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2306-7381/10/4/262>. Acesso em 07 jan. 2026.

DALBIES-TRAN, R. *et al.* A Comparative Analysis of Oocyte Development in Mammals. **Cells**, v. 9, n. 1002, 2020. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32316494/>. Acesso em 13 dez. 2025.

DAYAN, André. **Fatores que interferem na produção de embriões bovinos mediante aspiração folicular e fecundação *in vitro***. Dissertação (Mestrado em Medicina Veterinária) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/8db7ae23-8c60-469e-9605-0a0e0ee2986d>. Acesso em 13 dez. 2025.

GONÇALVES, P. B. D. *et al.* **Biotécnicas aplicadas à reprodução animal**. São Paulo: Roca, 2008

LUEDJKE, F. E. *et al.* Aspectos da produção in vitro de embriões bovinos no Brasil – revisão. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v.25, n.1/2, p. 120-132, 2019. Disponível em: <https://revistapag.agricultura.rs.gov.br/ojs/index.php/revistapag/article/view/41>. Acesso em 13 dez. 2025.

MELLO, R. R. C. *et al.* Taxa de prenhez em receptoras bovinas com diferentes graus de assincronia embrião-útero. **B. Indústr. Anim.**, Nova Odessa, v.73, n.1, p.88-93, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17523/bia.v73n1p88>. Acesso em 13 dez. 2025.

NOGUEIRA, B. G. R. **Fatores que influenciam a produção comercial de embriões *in vitro***. 2018. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal) - Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente, 2018. Disponível em: <http://bdtd.unoeste.br:8080/tede/handle/jspui/1253>. Acesso em 07 jan. 2026.

SAKATANI, M. Effects of heat stress on bovine preimplantation embryos produced in vitro. **Journal of Reproduction and Development**, v. 63, n. 4, 2017. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5593085/pdf/jrd-63-347.pdf>. Acesso em 07 jan. 2026.

SILVA, N. A. **Influência da estação do ano, do desenvolvimento embrionário e raça do embrião na taxa de concepção de embriões produzidos *in vitro* em vacas leiteiras de alta produção.** 47 f. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal) - Universidade de Vila Velha, Vila Velha, 2019. Disponível em: <https://repositorio.uvv.br/server/api/core/bitstreams/6c7dda0f-3e5c-456e-a98c-7afc4473da74/content>. Acesso em 07 jan. 2026.

SOUZA, L. C. C. de *et al.* Influência do tamanho do corpo lúteo sobre a taxa de concepção de vacas receptoras inovuladas com embrião de fecundação *in vitro*. **Revista Delos**, Curitiba, v.18, n.68, p. 01-12, 2025. Disponível em: <https://ojs.revistadelos.com/ojs/index.php/delos/article/view/5392/2986>. Acesso em 13 dez. 2025.

STROEBECH, L. *et al.* In vitro production of bovine embryos: revisiting oocyte development and application of systems biology. **Anim. Reprod.**, v.12, n.3, p.465-472, 2015. Disponível em: [http://www.cbpa.org.br/pages/publicacoes/animalreproduction/issues/download/v12/v12n3/pag465-472%20\(AR749\).pdf](http://www.cbpa.org.br/pages/publicacoes/animalreproduction/issues/download/v12/v12n3/pag465-472%20(AR749).pdf). Acesso em 13 dez. 2025.

VIANA, J. H. M. Classificação de embriões bovinos produzidos *in vivo*. **Comunicado Técnico**, Juiz de Fora, v. 59, 2009. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/853312/1/COT59Classificacaodeembrioes.pdf>. Acesso em 13 dez. 2025.

VIANA, J. H. M. 2023 Statistics of embryo production and transfer in domestic farm animals. **Embryo Technology Newsletter**, v. 42, n.4, 2024. Disponível em: https://www.iets.org/Portals/0/Documents/Public/Committees/DRC/IETS_Data_Retrieval_Report_2023.pdf. Acesso em 13 dez. 2025.