ReGeo ISSN: 2177-3246

A CONSOLIDAÇÃO SUSTENTÁVEL DA CARNE SEM ABATE: CONFLUÊNCIA OPERACIONAL, VIABILIDADE ECOLÓGICA E PARIDADE ECONÔMICA

THE SUSTAINABLE CONSOLIDATION OF SLAUGHTER-FREE MEAT: OPERATIONAL CONFLUENCE, ECOLOGICAL VIABILITY, AND ECONOMIC PARITY

LA CONSOLIDACIÓN SOSTENIBLE DE LA CARNE SIN SACRIFICIO: CONFLUENCIA OPERATIVA, VIABILIDAD ECOLÓGICA Y PARIDAD ECONÓMICA

https://doi.org/10.56238/revgeov17n11-055

Data de submissão: 12/10/2026 **Data de publicação:** 12/11/2026

Simone Villas Ferreira
Doutoranda em Agricultura Sustentável
Instituição: UNIFENAS - Campus Alfenas, IFSULDEMINAS – Campus Muzambinho
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-6535-1483
Lattes: http://lattes.cnpq.br/4289873839436295
E-mail: simone.ferreira@ifsuldeminas.edu.br

Ana Patrícia Alves Leão
Doutora em Zootecnia
Instituição: UFLA, UNIFENAS – Campus Alfenas
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-9571-4986
Lattes: http://lattes.cnpq.br/3274795554629091
E-mail: ana.leao@unifenas.br

Diana Cuglovici Abrão
Doutora em Ciência Animal
Instituição: UNIFENAS - Campus Alfenas, IFSULDEMINAS – Campus Muzambinho
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-3556-4282
Lattes: http://lattes.cnpq.br/3489941589349569
E-mail: diana.abrao@ifsuldeminas.edu.br

Adriano Bortolotti da Silva
Doutor em Agronomia
Instituição: FACICA - Campus Campos Gerais
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-9817-8143
Lattes: http://lattes.cnpq.br/4141564972275445
E-mail: bortolot92@gmail.com

RESUMO

O presente artigo investiga a viabilidade sustentável da carne cultivada a partir de sua confluência ecológica, bioeconômica, social e regulatória, contrapondo-a às limitações termodinâmicas e éticas da pecuária convencional. Metodologicamente, adotou-se uma abordagem teórica orientada por revisão bibliográfica em bases multidisciplinares, abrangendo o período de 2000 a 2026. Os resultados indicam que a proliferação celular em biorreatores industriais elimina a dispersão energética basal inerente à homeostase dos vertebrados e suprime as perdas teciduais decorrentes do estresse pré-abate, promovendo trajetórias concretas rumo à paridade de custos e à redução superior a noventa por cento no uso da terra. Constata-se, simultaneamente, a mitigação de riscos de zoonoses e contaminações

microbiológicas entéricas, dispensando o uso profilático de antibióticos. Discute-se, ademais, a governança internacional da propriedade intelectual e os entraves de nomenclatura na rotulagem, ressaltando os desafios de soberania biotecnológica e as oportunidades de reposicionamento estratégico para o mercado brasileiro. Conclui-se que a carne sem abate constitui uma transição produtiva indispensável e materialmente exequível, redefinindo a segurança alimentar contemporânea ao dissociar o suprimento proteico global da degradação dos ecossistemas e da instrumentalização de animais sencientes.

Palavras-chave: Carne Cultivada. Agricultura Celular. Bioética. Segurança Alimentar. Sustentabilidade.

ABSTRACT

This article investigates the sustainable viability of cultivated meat by examining its ecological, bioeconomic, social, and regulatory dimensions, while contrasting it with the thermodynamic and ethical limitations of conventional livestock farming. Methodologically, a theoretical approach was adopted, based on a literature review across multidisciplinary databases covering the period from 2000 to 2026. The results indicate that cellular proliferation in industrial bioreactors eliminates the basal energy expenditure inherent in vertebrate homeostasis and prevents tissue loss resulting from pre-slaughter stress; this facilitates a clear path toward cost parity and a reduction in land use of over ninety percent. Furthermore, the process mitigates the risks of zoonoses and enteric microbiological contamination, thereby eliminating the need for the prophylactic use of antibiotics. The study also addresses the international governance of intellectual property and labeling nomenclature issues, highlighting challenges related to biotechnological sovereignty as well as opportunities for strategic repositioning within the Brazilian market. It is concluded that slaughter-free meat represents an essential and materially feasible production transition, redefining contemporary food security by decoupling the global protein supply from ecosystem degradation and the instrumentalization of sentient animals.

Keywords: Cultivated Meat. Cellular Agriculture. Bioethics. Food Security. Sustainability.

RESUMEN

El presente artículo investiga la viabilidad sostenible de la carne cultivada a partir de su confluencia ecológica, bioeconómica, social y regulatoria, contraponiéndola a las limitaciones termodinámicas y éticas de la ganadería convencional. Metodológicamente, se adoptó un enfoque teórico basado en una revisión bibliográfica en bases de datos multidisciplinarias, que abarca el período de 2000 a 2026. Los resultados indican que la proliferación celular en biorreactores industriales elimina la dispersión energética basal inherente a la homeostasis de los vertebrados y suprime las pérdidas tisulares derivadas del estrés previo al sacrificio, promoviendo trayectorias concretas hacia la paridad de costos y una reducción superior al noventa por ciento en el uso de la tierra. Asimismo, se constata la mitigación de los riesgos de zoonosis y contaminaciones microbiológicas entéricas, lo que prescinde del uso profiláctico de antibióticos. Además, se analiza la gobernanza internacional de la propiedad intelectual y los obstáculos relacionados con la nomenclatura en el etiquetado, destacando los desafíos en materia de soberanía biotecnológica y las oportunidades de reposicionamiento estratégico para el mercado brasileño. Se concluye que la carne producida sin sacrificio animal constituye una transición productiva indispensable y materialmente viable, que redefine la seguridad alimentaria contemporánea al disociar el suministro mundial de proteínas de la degradación de los ecosistemas y de la instrumentalización de animales sintientes.

Palabras clave: Carne Cultivada. Agricultura Celular. Bioética. Seguridad Alimentaria. Sostenibilidad.

1 INTRODUÇÃO

A subsistência material da civilização contemporânea confronta-se com um paradoxo estrutural insolúvel no âmbito dos arranjos convencionais: a expansão da demanda global por proteínas de alto valor biológico colide diretamente com a capacidade de suporte dos ecossistemas terrestres e com a sensibilidade ética em relação à vida animal. A manutenção do modelo agropecuário hegemônico impõe uma pressão sem precedentes sobre a biodiversidade, os recursos hídricos e a atmosfera, ao mesmo tempo em que perpetua a instrumentalização sistemática de seres sencientes em escalas industriais sem paralelo histórico. Diante da evidente inviabilidade de mitigar esses impactos por meros ajustes incrementais no manejo zootécnico, a dissociação entre a síntese tecidual e o sacrifício corpóreo desponta não como utopia laboratorial distante, mas como imposição civilizatória inadiável.

O surgimento da agricultura celular redefine a produção de alimentos ao inaugurar processos nos quais a proliferação e a diferenciação de células animais ocorrem em ambientes controlados, dispensando o confinamento e o abate de rebanhos (Silva; Silva, 2024; Braga, 2026). No modelo zootécnico convencional, a obtenção de proteína esbarra em limites metabólicos intransponíveis, uma vez que "o organismo dos vertebrados superiores funciona como biorreator termodinamicamente imperfeito, no qual a maior parte da energia calórica e proteica ingerida é drenada para a sustentação de funções vitais basais" (idem). Por outro lado, a carne cultivada permite reorientar integralmente o aporte calórico e nutricional para a formação dos tecidos de interesse comercial e alimentar, eliminando o desperdício termodinâmico associado aos tecidos não comestíveis e aos custos fisiológicos de sobrevivência dos animais inteiros (Leitolis et al., 2024).

Essa transformação transcende a dimensão biológica e reverbera na reconfiguração das cadeias de suprimento e da segurança alimentar. A carne cultivada atua como vetor de estabilidade nutricional e de saúde pública ao mitigar vulnerabilidades epidemiológicas, a contaminação microbiológica e a dependência de insumos agroquímicos intensivos (Leitolis et al., 2024; Pazzini, 2015). O processo de validação dessa tecnologia enfrenta tanto resistências setoriais ancoradas no agronegócio histórico quanto desconfianças do consumidor em relação à artificialidade dos processos fabris (Abujamra et al., 2017; Bitencourt et al., 2025). Contudo, a evolução dos parâmetros técnicos e regulatórios tem assegurado a rastreabilidade e a equivalência funcional desse produto perante as matrizes tradicionais (Lara et al., 2003; Talamini; Pedrozo; Silva, 2005).

Este artigo defende a tese da viabilidade sustentável absoluta da carne cultivada a partir de sua confluência operacional, ecológica, bioeconômica e regulatória, estabelecendo sua superioridade sobre a pecuária de abate. Sustenta-se que a superação da barreira metabólica inerente à conversão animal, aliada à capacidade de controle sanitário estrito e ao alinhamento com novos paradigmas éticos globais,

consolida a carne celular como uma alternativa materialmente irreversível e ecologicamente indispensável para a segurança do abastecimento de proteínas.

A busca de fontes foi realizada em outubro de 2026 nas bases BDTD, Cochrane Library, Crossref, DOAJ, OpenAlex, PubMed e SciELO, com recorte temporal de 2000 a 2026, retornando 73 obras, das quais 20 foram selecionadas para o acervo deste trabalho. O acervo foi complementado por obras indicadas diretamente pelo autor.

Para fundamentar essa posição, o estudo estrutura-se em quatro eixos investigativos complementares. Inicialmente, examina-se a viabilidade ecológica mediante a análise da mitigação da pegada de carbono, do uso da terra e da preservação dos recursos hídricos. Em seguida, aborda-se o eixo econômico, detalhando as dinâmicas de paridade de preços, a eficiência metabólica dos biorreatores e os desafios da escalabilidade industrial. O terceiro percurso analisa o eixo social a partir da ótica da segurança alimentar, dos ganhos em saúde pública e da soberania proteica. Por fim, discute-se o arcabouço legal e regulatório, ponderando os parâmetros sanitários internacionais, as disputas semânticas de nomenclatura e o regime de propriedade intelectual, culminando na análise comparativa de seus impactos no cenário geopolítico global e no mercado brasileiro.

2 BIOEFICIÊNCIA CELULAR, PARIDADE ECONÔMICA E DESCOMPRESSÃO ECOLÓGICA

A viabilidade material da carne cultivada sustenta-se na ruptura categórica com os limites termodinâmicos impostos pela biologia dos vertebrados superiores, convertendo a produção proteica em processo celular estritamente direcionado. Conforme delineado na introdução teórica desta obra, a superação dos impasses ecológicos e produtivos da pecuária convencional exige mais do que reformas marginais de manejo; demanda a reconfiguração dos vetores metabólicos de síntese tecidual. Ao suprimir a necessidade de sustentar estruturas fisiológicas complexas que não geram produto comestível, a proliferação celular in vitro estabelece uma nova fronteira biofísica de conversão de insumos energéticos em biomassa de alto valor nutricional, fundando as bases para uma paridade de custos que redefine a própria economia dos alimentos.

O organismo animal constitui arranjo biológico cujo direcionamento energético primário visa à autoconservação homeostática, e não ao rendimento zootécnico. Durante todo o ciclo produtivo da carne tradicional, parcelas expressivas dos nutrientes ingeridos dissipam-se na termorregulação, locomoção, reprodução, respiração e manutenção de vísceras ou tecidos não aproveitáveis pelo mercado consumidor. Como aponta Silva (2005), "A viabilidade material da carne cultivada repousa sobre a superação inequívoca da ineficiência biofísica intrínseca à conversão pecuária tradicional. Sob

a ótica da sustentabilidade quadridimensional em sua dimensão econômica, o organismo dos vertebrados superiores funciona como biorreator termodinamicamente imperfeito, no qual a maior parte da energia calórica e proteica ingerida é drenada para a sustentação de funções vitais basais [...]" (Silva, 2005, p. 19). Essa dispersão entrópica inerente ao metabolismo animal impõe tetos rígidos à produtividade agropecuária, sujeitando a cadeia a longos ciclos cronológicos até o ponto de terminação e abate.

As investigações empíricas da zootecnia clássica detalham a magnitude dos desperdícios e perdas de tecidos não comestíveis gerados pelos sistemas baseados no animal vivo. O estudo das carcaças de ovinos conduzido por Silva Sobrinho e colaboradores (2005) revela variações profundas no depósito tecidual, onde ossos, tendões e gorduras de descarte representam frações consideráveis do peso vivo total do animal. Na mesma direção analítica, Siqueira, Simões e Fernandes (2001) comprovam que a composição tecidual e os componentes não constituintes da carcaça respondem por volumosas perdas de matéria orgânica que demandaram anos de pastoreio ou grãos concentrados para serem sintetizadas. Os mesmos fatores de dispersão metabólica e partição desfavorável de cortes foram confirmados por Souza e colaboradores (2004) ao avaliarem as propriedades físico-químicas em animais em crescimento sob condições zootécnicas padrão.

A vulnerabilidade metabólica do animal vivo reflete-se na instabilidade das propriedades físico-químicas da matéria cárnea, as quais variam continuamente em função do genótipo, da idade e do peso no momento da sangria. Pesquisas conduzidas por Bressan e colaboradores (2001) demonstram como as taxas de crescimento e as curvas de retenção de água e lipídios flutuam de maneira assimétrica nas raças Santa Inês e Bergamácia submetidas a faixas distintas de peso ao abate. Esse quadro impõe custos de padronização industrial significativos e perdas qualitativas intrínsecas ao modelo pecuário (Bressan et al., 2001). Siqueira, Simões e Fernandes (2001) identificaram que as taxas de velocidade de crescimento e a variação no pH da carne decorrente da terminação geram incertezas operacionais severas sobre os resultados econômicos do produtor, atestando a precariedade dos equilíbrios biológicos que precedem a obtenção da carcaça final.

Mesmo quando se exploram espécies nativas como alternativas potenciais de aproveitamento zootécnico, a interferência de variáveis de sexo, peso e idade continua a condicionar a viabilidade do produto. Oda e colaboradores (2004) examinaram os efeitos dos métodos de sangria e abate sobre a composição centesimal, o colesterol e os ácidos graxos de carnes não tradicionais, evidenciando as complexas exigências de padronização biológica. No plano das análises estritamente financeiras do confinamento e pastoreio, Macedo, Siqueira e Martins (2000) constatam que a viabilidade econômica do ciclo depende de equilíbrios extremamente frágeis entre tempo de confinamento, taxa de conversão

alimentar e custos crescentes de alimentação exógena, confirmando que a sustentação da carcaça viva pressiona as margens financeiras em direção à inviabilidade estrutural sob cenários de volatilidade de insumos forrageiros.

Os momentos que antecedem a conversão do músculo vivo em alimento constituem outro ponto crítico de escoamento entrópico e perda material severa na indústria convencional. O manejo pré-abate, o embarque e o transporte até as plantas industriais submetem os animais a estímulos estressores que degradam irreversivelmente a qualidade do produto final. Ludtke e colaboradores (2012) registram o impacto direto do estresse fisiológico de transporte na formação de carnes com defeitos graves (como carnes pálidas, moles e exsudativas), o que resulta em perdas expressivas de volume comercializável e depreciação qualitativa nas plantas industriais. Em escala idêntica, Castro e colaboradores (2008) avaliaram o período de jejum e sua influência direta nas taxas de desidratação, quebra de peso e degradação glicolítica das carcaças avícolas, comprovando que as fases finais de abate representam períodos de aguda ineficiência e perda líquida de nutrientes previamente consumidos.

Investigações complementares realizadas por Bressan e colaboradores (2004) sublinham que a flutuação físico-química persiste em carnes alternativas conforme a idade de abate avança, enquanto Denadai e colaboradores (2002) detalham as perdas exponenciais de rendimento de carcaça e qualidade de peito de frango associadas às janelas de espera pré-abate. Em caprinos, Madruga e colaboradores (2002) ratificam que a castração e a idade cronológica afetam indelevelmente os perfis aromáticos e sensoriais, forçando o setor a operar com margens zootécnicas estreitas para evitar carnes rejeitadas pelo mercado consumidor. Em flagrante oposição a essa matriz fragmentada e dependente de equilíbrios orgânicos instáveis, a agricultura celular direciona a totalidade das rotas glicolíticas, aminoácidos e cofatores nutricionais exclusivamente à miogênese e adipogênese em ambiente fechado, eliminando descartes teciduais, desvios metabólicos com termorregulação e estresse pré-abate.

A erradicação das perdas biofísicas corporais transforma o custo marginal do quilo proteico. Na pecuária convencional de corte, proporções substanciais do alimento são digeridas para formar tecidos não aproveitáveis comercialmente, gerando uma equação entrópica de baixo retorno que requer extensas áreas de cultivo forrageiro e consumo hídrico vultoso. No biorreator estéril, cada molécula de glicose, glutamina ou peptídeo fornecida ao meio de proliferação celular converte-se em massa celular utilizável, prescindindo de carcaças intermediárias, vísceras, couros e ossos. A bioeficiência celular rompe a dependência das curvas de crescimento de mamíferos e aves, reduzindo os tempos de ciclo de anos ou meses para semanas contínuas de duplicação asséptica de mioblastos e adipócitos, desarticulando a barreira histórica que impedia a paridade de preços entre proteínas sustentáveis e produtos pecuários de extração biológica tradicional.

A transição da bancada laboratorial para os ecossistemas industriais de proliferação de larga escala institui a trajetória concreta em direção à paridade econômica com as carnes oriundas do sistema tradicional de abate. A viabilidade financeira da carne celular não decorre de subsídios estatais temporários ou de marketing compassivo, mas sim da diluição exponencial de custos fixos permitida pelos volumes dos biorreatores industriais combinada à formulação de meios de cultivo de grau alimentício isentos de insumos de origem animal. Conforme formulado no capítulo precedente no que tange ao "Econômico: Paridade de Preços, Eficiência Metabólica e Escala Industrial", a ampliação dos biorreatores reduz os custos fixos por quilograma produzido, criando a ponte material indispensável entre a exclusividade dos menus degustação e o abastecimento de massas." Braga (2026). A escala de produção em grande capacidade volumétrica desmistifica a percepção da agricultura celular como uma alternativa puramente experimental restrita a nichos afluentes.

A viabilidade técnica e a segurança microbiológica desse processo encontram respaldo inequívoco na literatura especializada recente. Analisando as trajetórias de síntese tecidual em larga escala, Silva e Silva (2024) demonstram que o desenvolvimento de biorreatores automatizados e a substituição definitiva do soro fetal bovino por formulações de extratos vegetais, leveduras e nutrientes recombinantes reduzem os custos do meio basal em ordens de magnitude antes consideradas inatingíveis, consolidando a carne celular como alternativa materialmente robusta e escalável frente à pecuária convencional (Silva; Silva, 2024). Concomitantemente, Braga (2026) expõe as vantagens bioeconômicas do modelo de agricultura vertical e fora da terra, enfatizando a aceleração contínua dos ciclos de replicação celular e o controle total dos parâmetros biofísicos de proliferação celular, o que desvincula o fornecimento de proteína das intempéries sazonais e das crises climáticas que assolam as bacias produtoras convencionais (Braga, 2026).

O domínio dos riscos sanitários constitui, simultaneamente, um vetor elementar de blindagem financeira da proteína sem abate. Leitolis e colaboradores (2024) documentam minuciosamente a higidez dos processos de proliferação estéril, asseverando que a ausência total de contato com fluidos digestivos, dejetos e carcaças em decomposição reduz os custos de recall, descarte e contingências sanitárias que rotineiramente penalizam os frigoríficos mundiais (Leitolis et al., 2024). Sob a ótica da gestão da cadeia de suprimentos, Talamini, Pedrozo e Silva (2005) evidenciaram a complexidade estrutural e os elevados custos operacionais de conformidade exigidos pelas normas de rastreabilidade de patógenos em cadeias exportadoras de carnes de origem animal, custos esses que se tornam estruturalmente redundantes em unidades fechadas de síntese celular cujos parâmetros laboratoriais de controle de qualidade são automatizados e contínuos (Talamini; Pedrozo; Silva, 2005).

A percepção do público consumidor e a construção mercadológica da carne celular interagem diretamente com a estabilização da curva de custos e a aceitação pública nas praças urbanas. Investigando os motores de atratividade da nova indústria, Bitencourt e colaboradores (2025) analisam a influência decisiva da comunicação estratégica e da conscientização sobre o sofrimento animal na aceitação da carne sem abate, comprovando que os consumidores assimilam a identidade substantiva do tecido quando esclarecidos sobre sua composição e segurança biológica (Bitencourt et al., 2025). Por outro lado, Abujamra e colaboradores (2017) observam as fragilidades na confiança do consumidor perante os sistemas de comercialização da carne convencional bovina, evidenciando uma vulnerabilidade nas práticas sanitárias tradicionais que a carne de cultivo supera por meio de sua metodologia de assepsia laboratorial e transparência de processos industriais (Abujamra et al., 2017). A rastreabilidade plena, exigida historicamente como imperativo de segurança alimentar na carne bovina convencional (Lara et al., 2003), é nativa na agricultura celular: cada lote sintetizado em tanques possui histórico digital inviolável de insumos químicos e parâmetros operacionais de proliferação celular.

Para ilustrar a discrepância bioeconômica entre os dois modelos, convém contrapor seus atributos de eficiência metabólica, controle sanitário e fatores de custo:

Quadro 1: Eficiência Metabólica - Controle Sanitário - Fatores de Custo

Parâmetro de Comparação	Pecuária Bovina Tradicional	Carne Cultivada em Biorreatores
Tempo de Ciclo para Obtenção da Biomassa	24 a 36 meses (confinamento/pasto)	2 a 4 semanas (cultivo celular contínuo)
Taxa de Conversão Energética de Insumos	Baixa: dissipação em homeostase e tecidos não comestíveis	Alta: conversão direta em fibras musculares e adipócitos
Uso de Antibióticos e Quimioterápicos	Intensivo (terapêutico e profilático)	Nulo (processamento asséptico em tanques estéreis)
Risco de Patógenos Entéricos e Zoonoses	Elevado (*Salmonella*, *E. coli*, agentes zoonóticos)	Inexistente (ausência de trato digestório e vísceras)
Rastreabilidade e Padronização Industrial	Variável (sujeita a idade, raça, estresse pré-abate)	Absoluta (controle algorítmico de meios e parâmetros)
Pegada de Terra Relativa	Extensiva (pastagens e monoculturas forrageiras)	Mínima (redução superior a 90% da área ocupada)

Fonte: Os autores, 2026.

A dinâmica de redução de custos da produção celular converge com a lógica dos bens industriais de alta tecnologia, nos quais a maturidade produtiva impulsiona retornos crescentes de escala. Ao contrário da pecuária de pasto, que colide com a escassez absoluta de terras aráveis e com a inelasticidade biológica do desenvolvimento animal, o cultivo tecidual ganha flexibilidade logística ao ser instalado próximo aos grandes centros consumidores. Esse reposicionamento encurta as cadeias de frio, dissipa custos com frete transcontinental e desativa vulnerabilidades associadas à quebra de safra de grãos forrageiros. A progressiva sofisticação dos tanques fermentadores e o barateamento da

engenharia de meios tornam a equivalência de preços não uma hipótese distante, mas um ponto de inflexão inexorável na matriz de suprimento global.

O terceiro vetor de consolidação da agricultura celular transcende os limites contábeis dos biorreatores para desencadear um efeito de descompressão ecológica sobre os biomas do planeta. A apropriação espacial exigida pela pecuária convencional representa a maior força motriz de degradação da cobertura vegetal primária, esgotamento das reservas hídricas subterrâneas e perturbação do ciclo do nitrogênio e do fósforo. Ao transferir a produção cárnea das bacias geográficas para plantas industriais compactas, a carne cultivada opera como um instrumento biofísico de contenção da pegada antrópica. Como atesta Lara, "A consequência espacial direta dessa eficiência metabólica é a despressurização territorial em escala planetária, liberando extensões massivas de solo antes confinadas a pastagens degradadas ou a monoculturas forrageiras intensivas. A substituição do pastoreio por instalações industriais de proliferação celular comprime a pegada de terra da proteína cárnea em mais de noventa por cento em relação à bovinocultura tradicional (Silva; Silva, 2024)." (Lara et al., 2003).

A liberação das paisagens rurais antes monopolizadas pela exploração animal restaura o potencial de regeneração ecológica da biosfera. Áreas marginais e pastagens em processo de desertificação podem ser devolvidas à regeneração natural e à restauração florestal passiva, convertendo imensos sumidouros de carbono biológico em barreiras ativas contra o colapso climático. Pazzini (2015) aprofunda esse horizonte ético-político ao correlacionar as patologias intrínsecas da dieta hipertrofiada de carne convencional aos direitos humanos de terceira dimensão, sublinhando que a persistência de um padrão de produção alimentar ecologicamente destrutivo viola a garantia da segurança alimentar sustentada e compromete os alicerces ambientais essenciais às gerações futuras (Pazzini, 2015). A contração territorial do agronegócio de corte é a contrapartida espacial indispensável para a neutralização da perda de biodiversidade e o reequilíbrio dos ciclos biogeoquímicos planetários.

Essa reconfiguração da pegada material altera diretamente as dinâmicas de capital investido e conformidade corporativa em nível mundial. Lara (Lara et al., 2003) elucida com precisão esse nexo causal: "Desse modo, a eficiência ecológica deixa de ser mero predicado acessório de responsabilidade socioambiental corporativa para operar como o motor elementar da competitividade de preços da agricultura celular. A redução da pegada territorial desonera a cadeia dos passivos de arrendamento de terras e dos custos atrelados à mitigação de impactos ambientais severos, viabilizando margens operacionais mais estáveis perante o mercado financeiro [...]" (Lara et al., 2003). As empresas de agricultura celular se posicionam, dessa forma, fora do alcance de mecanismos de taxação sobre

emissões de carbono fóssil, multas por desmatamento ilegal e pressões de boicote de mercados transnacionais que barram commodities associadas à perda de vegetação nativa.

A mitigação dos impactos climáticos operada pela síntese *in vitro* assume contornos substanciais ao neutralizar as emissões entéricas de metano, gás de efeito estufa com alto poder de aquecimento global em horizontes de curto prazo, tendo potencial de aquecimento global (PAG) cerca de 28 a 34 vezes maior que o gás carbônico Ao eliminar o rúmen biológico como intermediário das transformações proteicas, a cadeia celular elimina a necessidade de fertilização sintética massiva para a produção forrageira intensiva, atenuando a eutrofização de ecossistemas aquáticos provocada pela lixiviação de compostos de nitrogênio. A eficiência no uso da água consolida-se em patamares equivalentes de preservação hídrica: enquanto a bovinocultura tradicional demanda milhares de litros de água doce para a produção de um único quilo de carne (contabilizando a irrigação de grãos e a dessedentação animal), o processo fermentativo em ciclo fechado opera com sistemas de recirculação e refrigeração que economizam quase a totalidade dos recursos hídricos convencionais.

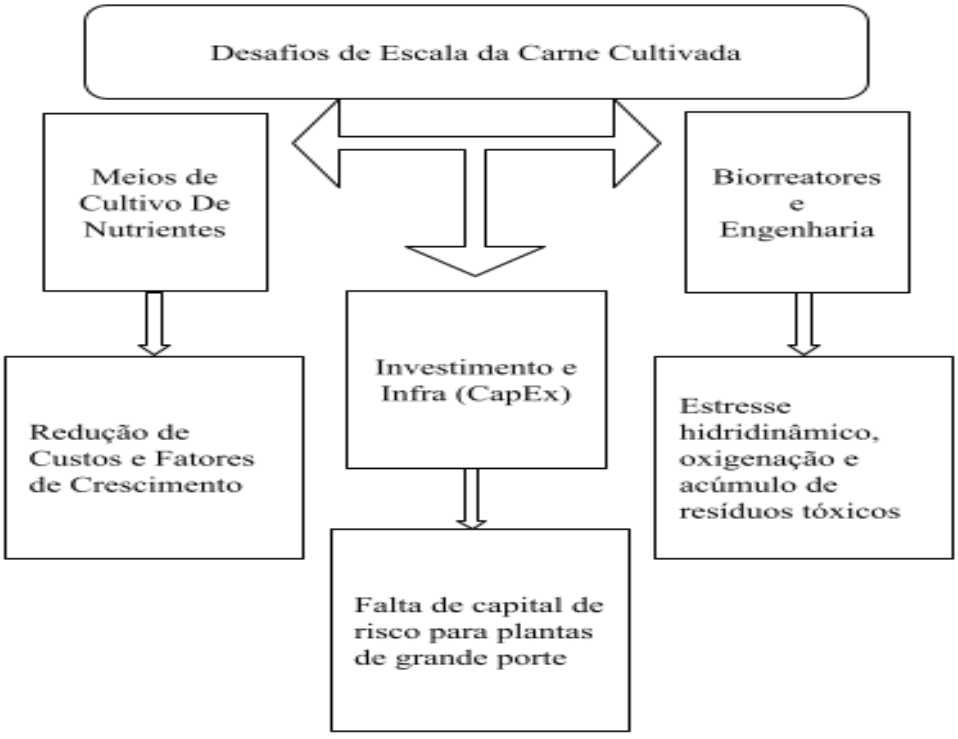
A união entre a alta taxa de conversão metabólica celular, a paridade de preços decorrente do escalonamento de biorreatores e o alívio ecológico territorial atesta o fechamento da promessa estabelecida para este segmento analítico da obra. A carne cultivada em laboratório não é um artefato utópico dissociado das forças produtivas materiais, mas a consequência biofísica e econômica da aplicação de processos biotecnológicos industriais ao setor de alimentos. Ao quebrar o vínculo histórico entre o consumo de proteínas animais e a dizimação forrageira das florestas globais, a agricultura celular converte a racionalidade metabólica no motor primário de sua competitividade, desonerando o planeta do encargo termodinâmico da pecuária tradicional e estabelecendo uma matriz produtiva compatível com a estabilidade ecológica da Terra.

A exemplo disso, a comercialização real de frango cultivado (sem abate) teve como pioneira global a cidade-estado de Singapura em 2020, seguida pelos Estados Unidos em junho de 2023, após a aprovação conjunta de agências federais regulatórias como a *Food and Drug Administration* (FDA) e o *Food Safety and Inspection Service* do USDA. Embora dados consolidados do volume total comercializado em quilogramas exatos não sejam amplamente divulgados pelos órgãos governamentais por questões de sigilo comercial das *startups* e pelo fato de a produção ainda ocorrer em escala piloto extremamente restrita (com a Eat Just produzindo inicialmente apenas cerca de 3 kg por semana em Singapura e empresas americanas como a UPSIDE Foods operando em lotes limitados em restaurantes parceiros selecionados antes de reajustarem os planos industriais), o *feedback* dos consumidores que degustaram o produto em restaurantes finos e bistrôs credenciados — como o *Huber's Butchery* em Singapura — foi majoritariamente positivo em relação ao sabor e à textura, que

mimetizam com fidelidade o frango convencional. Apesar dessa boa aceitação sensorial inicial dos clientes nesses ambientes controlados, o mercado de massa ainda demonstra ceticismo devido ao desconhecimento do processo de cultivo biológico, aos preços de introdução elevados e às polêmicas mercadológicas envolvendo os rótulos de "carne cultivada em células" exigidos pelo governo americano.

O avanço do frango cultivado da escala de laboratório (piloto) para a escala industrial massiva enfrenta uma "tempestade perfeita" de gargalos econômicos e biotecnológicos. Para as *startups*, o desafio não consiste apenas em fazer o produto crescer, mas em atingir a paridade de preços com a carne animal convencional. Os principais fatores críticos que moldam esse cenário de custos e engenharia estruturam-se da seguinte forma:

Quadro 2: Desafios de Escala da Carne Cultivada



Fonte: Os autores, 2026

2.1 MEIO DE CULTIVO E NUTRIENTES: O CUSTO EXTREMO DO MEIO DE CULTIVO

Historicamente, o meio de cultura representava o principal gargalo financeiro do setor. Embora os relatórios do *The Good Food Institute* (GFI) apontem que o custo base do litro do meio caiu drasticamente para valores abaixo de US$ 1,00, a despesa com fatores de crescimento recombinantes

(como as proteínas FGF e TGF-β que dizem às células para se multiplicarem) continua proibitiva para o volume industrial. As *startups* buscam alternativas mais em conta extraídas de plantas ou microalgas, além do uso de inteligência artificial para otimizar as receitas dos nutrientes.

2.2 BIORREATORES E ENGENHARIA: O DESAFIO DA ENGENHARIA DE FLUÍDOS E TAMANHO DOS BIORREATORES

Engenheiros de bioprocessos enfrentam limitações físicas severas ao tentar migrar de tanques pequenos para biorreatores de escala monumental (acima de 20.000 a 100.000 litros):

- **Estresse Hidrodinâmico (Cisalhamento):** Para misturar nutrientes de forma homogênea em tanques gigantescos, as pás precisam girar mais rápido. No entanto, a força desse movimento rasga as membranas celulares das aves, que são muito mais sensíveis que bactérias ou leveduras.
- **Oxigenação e Calor:** Quanto maior o volume, mais difícil se torna distribuir oxigênio dissolvido igualmente e resfriar o calor gerado pelo metabolismo acelerado de bilhões de células animais confinadas.
- **Acúmulo de Metabólitos Tóxicos:** Células produzem subprodutos (como amônia e lactato). Sem sistemas eficientes e de custo viável para a reciclagem do meio por diálise, as células acabam morrendo intoxicadas pelo próprio resíduo no tanque.

2.3 INVESTIMENTO E INFRAESTRUTURA (CAPEX): DINÂMICA DAS ESCALAS VS. VIABILIDADE ECONÔMICA

Modelos teo-econômicos (TEAs) da indústria detalham o impacto do tamanho do maquinário na formação do preço final do quilo da carne:

Quadro 3: Impactos do Preço Final do Quilo de Carne

Tipo de Biorreator (STR)	Capacidade do Sistema	Custo Estimado por Quilo da Carne	Cenário de Viabilidade Comercial
Escala de Piloto / Hamburgueria	Até 1.000 Litros	**> US$ 100 / kg**	Inviável para as massas. Restrito a menus de degustação de luxo.
Escala Industrial Inicial	~ 42.000 Litros	**~ US$ 30 a US$ 35 / kg**	Atende nichos de mercado e produtos híbridos (misturas com vegetais).
Macroescala Industrial	> 210.000 Litros	**~ US$ 17 a US$ 21 / kg**	Redução de mais de 30% nos custos fixos, aproximando-se da carne convencional premium.

Fonte: Os autores, 2026.

Construir complexos industriais com capacidade de milhares de toneladas exige centenas de milhões de dólares em bens de capital (CapEx). Contudo, após o "boom" inicial de aportes, o mercado de capital de risco internacional mudou seu perfil de investimento: em vez de promessas de longo prazo, investidores priorizam rodadas para startups que comprovem eficiência de curto prazo (métricas de unidade econômica). Sem dinheiro de fomento público substancial ou consórcios bilionários com a indústria de alimentos tradicionais, as *startups* lutam para sair da fase de protótipo de restaurantes. Assim, os itens a serem discutidos a seguir, complementam as bases para que a "pegada" industrial de produção da carne cultivada se estabeleça: bases regulatórias sanitárias e de governança (incluindo selos de comercialização internacionais) aliadas às dinâmicas do mercado (na perspectiva nacional e na perspectiva global).

3 GARANTIA SANITÁRIA, GOVERNANÇA REGULATÓRIA E DINÂMICAS DE MERCADO GLOBAL E BRASILEIRO

A consolidação material da carne sem abate, cujas bases biofísicas de rendimento e descompressão ecológica foram elucidadas no capítulo sobre paridade econômica e termodinâmica metabólica, exige a conformação de uma ordem institucional que respalde a integridade dos processos e a soberania do abastecimento humano. O horizonte da agricultura celular extrapola o domínio da engenharia de tecidos ao interrogar a capacidade dos Estados contemporâneos em articular parâmetros sanitários rigorosos, demarcações terminológicas justas e regimes protetivos de invenção técnica que não asfixiem o acesso comunitário ao alimento. Diante da fragilidade crônica inerente à cadeia zootécnica clássica, a produção cárnea mediada por cultivo *in vitro* estabelece um padrão de biossegurança profilática e controle tecidual que redefine a própria substância da segurança alimentar global.

O primeiro pilar dessa virada estrutural reside no contraste inequívoco entre o controle laboratorial da carne cultivada e a vulnerabilidade epidemiológica e biológica que atravessa o abate tradicional de organismos complexos. A obtenção de tecido muscular em ambiente fechado e estéril desconstitui os vetores primários de contaminação microbiológica que historicamente assolam os matadouros e as linhas de desossa, tornando superada a lógica reativa das inspeções industriais pós-morte. Nos métodos convencionais de obtenção proteica, as oscilações biológicas do animal vivo determinam variações drásticas e muitas vezes incontroláveis na composição química, na estabilidade física e no perfil sanitário do produto final, impondo variabilidade que compromete os padrões de segurança alimentar da população (Pazzini, 2015). A fisiologia do animal senciente submetido à criação extensiva ou intensiva é governada por contingências de idade, peso e dimensão tecidual que

impactam de forma irreversível os índices físico-químicos das fibras cárneas (Silva Sobrinho et al., 2005; Siqueira; Simões; Fernandes, 2001). A literatura zootécnica documenta extensivamente que a idade cronológica do espécime e a diversidade genotípica afetam a força de cisalhamento, a capacidade de retenção de água e a maturação das miofibrilas, transformando a carne convencional em substrato intrinsecamente heterogêneo e suscetível a desvios qualitativos (Souza et al., 2004; Bressan et al., 2001).

A essa instabilidade estrutural somam-se os impactos fisiológicos devastadores gerados pelo manejo pré-abate, etapa em que o transporte, a restrição alimentar e o estresse agudo catalisam alterações metabólicas profundas que degradam a qualidade sanitária e funcional dos tecidos comestíveis. O prolongamento inadequado do jejum e as condições térmicas da condução dos animais deflagram quadros metabólicos que alteram substancialmente o rendimento de carcaça e as características tecnológicas de peitos de frangos de corte (Denadai et al., 2002). Da mesma forma, as variações temporais da dieta e o esgotamento das reservas glicogênicas musculares comprometem o pH e a textura de carnes de aves (Castro et al., 2008). Em mamíferos e espécies cinegéticas ou não convencionais, a influência do peso final e a forma de sacrifício incidem diretamente sobre os índices de umidade, teores lipídicos e frações de colesterol total da massa cárnea obtida, evidenciando como a fisiologia do organismo vivo impõe um teto de instabilidade e perdas materiais (Oda et al., 2004; Bressan et al., 2004). O transporte e o atordoamento deflagram respostas neuroendócrinas e parâmetros fisiológicos de estresse em suínos que resultam em anomalias musculares severas, as quais degradam o valor nutritivo e expõem a fragilidade higiênica e a variabilidade do modelo zootécnico (Ludtke et al., 2012). No sistema de cultivo in vitro, diferentemente, a ausência de sistema nervoso central e a inexistência de processos de estresse ou jejum pré-abate eliminam essas anomalias estruturais, assegurando uniformidade celular guiada por parâmetros matemáticos de precisão biomolecular.

A carne celular rompe de modo cabal com a cadeia de transmissão de zoonoses e com o uso rotineiro de antimicrobianos que alimentam a crise global de superbactérias resistentes. As análises de biossegurança alimentar e toxicologia atestam que os biorreatores operam sob regimes de assepsia absoluta, eliminando os riscos de contaminação cruzada por patógenos entéricos como *Salmonella, Campylobacter e Escherichia coli*, comuns nas etapas de evisceração de carcaças nos abatedouros (Leitolis et al., 2024). A assepsia intrínseca ao cultivo celular protege o tecido contra microrganismos deteriorantes e suprime a necessidade de terapias antimicrobianas contínuas, oferecendo um perfil lipídico e nutricional desenhado sob medida para as necessidades da saúde pública contemporânea (Silva; Silva, 2024; Leitolis et al., 2024). Enquanto a pecuária tradicional debate-se com a contaminação fecal e os gargalos de higienização de carcaças submetidas a diferentes idades e pesos

(Siqueira; Simões; Fernandes, 2001; Madruga et al., 2002), o cultivo celular isola a fibra muscular, garantindo que o produto atinja o consumo humano sem jamais ter compartilhado ambiente com agentes de infecção entérica ou dejetos fisiológicos.

Essa superioridade analítica implica em superação epistemológica e sanitária da cadeia alimentar moderna: a garantia da integridade alimentar deixa de ser uma operação de contenção de danos biológicos para tornar-se propriedade intrínseca ao ato produtivo. Quando a carne prescinde do organismo vivo integral, a sociedade emancipa-se dos riscos intrínsecos ao confinamento em larga escala, convertendo o fornecimento de proteínas em uma operação de manufatura biofarmacêutica de alta pureza. O risco endêmico de surtos pandêmicos originados nas fazendas industriais dissipa-se nas cubas de aço inoxidável, o que confere à carne sem abate o estatuto de salvaguarda bioética e sanitária incontornável para as gerações futuras.

Quadro 4: Critério Operacional Sanitário: Pecuária tradicional *vs.* Agricultura celular

Critério Operacional e Sanitário	Pecuária e Abate Tradicional	Agricultura Celular (Carne sem Abate)
Vetor de Contaminação Microbiológica	Risco constante de contato com matéria fecal e conteúdo entérico durante evisceração e desossa (Leitolis et al., 2024; Ludtke et al., 2012).	Ambiente hermético, axênico e livre de patógenos entéricos ou dejetos orgânicos (Silva; Silva, 2024; Leitolis et al., 2024).
Uso de Antimicrobianos	Administração maciça, terapêutica e profilática, propiciando resistência antimicrobiana (Leitolis et al., 2024; Pazzini, 2015).	Ausência estrutural de antibióticos durante as fases de proliferação e diferenciação nos biorreatores (Silva; Silva, 2024; Leitolis et al., 2024).
Estabilidade e Uniformidade Tecidual	Variações profundas de pH, textura e composição em função de sexo, idade, genótipo e estresse de abate (Souza et al., 2004; Ludtke et al., 2012; Bressan et al., 2004).	Homogeneidade cinética controlada por parâmetros biofísicos estritos e formulação estequiométrica do meio (Leitolis et al., 2024).
Sistema de Rastreabilidade e Controle	Cadeias longas, fragmentadas e sujeitas a perdas de registro entre fazenda, transporte e abatedouro (Lara et al., 2003; Talamini; Pedrozo; Silva, 2005).	Monitoramento digital contínuo em lote único, com rastreio molecular direto do inóculo inicial ao envase (Braga, 2026; Lara et al., 2003).

Fonte: Oa autores, 2026.

O segundo nó analítico dessa transformação repousa sobre a governança regulatória comparada e as disputas de enquadramento conceitual que desenham os fluxos de comércio no hemisfério norte e no continente asiático. Longe de ser um exercício burocrático neutro, a regulação da carne cultivada traduz disputas profundas entre a preservação de privilégios de mercado da agropecuária fóssil e a soberania nutricional de nações que buscam autossuficiência (Braga, 2026). Conforme sintetiza Ferreira (2026), "O contraste entre as abordagens de jurisdições centrais demonstra que a velocidade da aceitação regulatória decorre tanto de opções geopolíticas de segurança alimentar quanto do poder de pressão de lobbies agropecuários locais." Na Ásia, com destaque fulcral para Singapura, o

pioneirismo na aprovação do frango cultivado decorreu de uma urgência de sobrevivência física: destituída de terras agrícolas disponíveis, a cidade-estado encarou a tecnologia como vetor de segurança nacional, estabelecendo protocolos analíticos rigorosos por meio da Singapore Food Agency para a caracterização celular e aprovação comercial (Silva; Silva, 2024; Braga, 2026).

Em contrapartida, o cenário da Europa Ocidental reflete a inércia burocrática de um arcabouço estruturado sobre o Regulamento de Novos Alimentos da Autoridade Europeia para a Segurança dos Alimentos (EFSA), agravado por investidas legalistas de viés conservador e protecionista. Países de forte tradição pecuária, ao temerem a perda de hegemonia produtiva de suas cadeias pastoris, têm articulado barreiras legislativas sob o argumento falacioso da salvaguarda das tradições culturais, tentando banir preventivamente a carne cultivada antes mesmo da conclusão dos pareceres de segurança toxicológica da União Europeia (Braga, 2026). Nos Estados Unidos, o arranjo institucional optou por supervisão coordenada entre a Food and Drug Administration (FDA), responsável pela seleção, isolamento e proliferação das linhagens celulares até o ponto de colheita, e o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), encarregado da etapa de colheita celular, processamento pós-biorreator e rotulagem (Braga, 2026; Leitolis et al., 2024). A despeito de avanços consubstanciados na aprovação de produtos avícolas cultivados em 2023 pelas autoridades federais norte-americanas, estados subnacionais aprovaram iniciativas legislativas para proibir o comércio da proteína tecidual, revelando a fenda entre a inovação científica e a reação das entidades patronais ligadas à pecuária convencional (Silva; Silva, 2024).

A arena da rotulagem e da nomenclatura constitui a linha de frente dessa disputa semiótica e legal, dado que os complexos agroindustriais hegemônicos tentam desqualificar o produto celular empurrando-o para termos artificiais ou depreciativos que afastem o público das gôndolas comerciais. As estratégias de comunicação e marketing demonstram que a denominação do produto exerce papel crucial na aceitação popular, na qual expressões como "carne sem abate" ou "carne limpa" atraem o consumidor pautado pela ética e pela conservação biofísica, ao passo que termos com conotação química ou artificial provocam reações de neofobia alimentar (Bitencourt et al., 2025). O consumidor busca garantias sobre a identidade biológica do produto, e o silenciamento sobre a natureza muscular e funcional da fibra cultivada serve exclusivamente a propósitos anticompetitivos (Abujamra et al., 2017; Bitencourt et al., 2025). Os produtores tradicionais exigem o monopólio da palavra "carne", argumentando que esta decorre ontologicamente da carcaça do animal sacrificado; contudo, a evidência histológica e proteômica demonstra que a carne cultivada não é um substituto sintético nem um vegetal texturizado, mas massa tecidual animal idêntica, composta por feixes celulares verdadeiros de miócitos e adipócitos (Silva; Silva, 2024; Leitolis et al., 2024).

Essa fragmentação das regras de trânsito internacional gera implicações drásticas para a governança do comércio exterior e a conformidade de cadeias de suprimento globais. A gestão eficiente e a segurança da carne exigem um sistema unificado que articule padrões analíticos equivalentes, sob pena de fragmentar o mercado mundial em blocos tecnológicos assimétricos (Talamini; Pedrozo; Silva, 2005). A ausência de uma taxonomia padronizada pela Organização Mundial do Comércio engessa os fluxos de importação e exportação, convertendo exigências técnicas sanitárias em ferramentas de guerra tarifária disfarçada. Se a comunidade internacional não pactuar definições ontológicas e sanitárias multilaterais para a carne cultivada, a transição para modelos alimentares de baixo carbono será deliberadamente retardada, custando anos preciosos de mitigação das crises ambientais em curso.

O terceiro argumento desta análise foca a governança da propriedade intelectual e a inserção do mercado brasileiro, no qual a concentração monopolista dos pacotes tecnológicos confronta a necessidade de construir um modelo soberano de produção biotecnológica. O domínio do cultivo celular exige o desenvolvimento de meios de cultura livres de componentes de origem animal, a otimização de linhagens celulares imortalizadas e o projeto de biorreatores de larga escala; tais fatores, se blindados por monopólios corporativos herméticos, correm o risco de reproduzir as estruturas extrativistas de dependência técnica que marcaram as revoluções tecnológicas anteriores (Braga, 2026). Como bem pontua Braga (2026), "No flanco econômico e tecnológico, o avanço da carne sem abate suscita complexos desafios no campo da propriedade intelectual, em que o regime de patentes tanto pode catalisar o investimento privado quanto criar barreiras oligopolísticas de acesso."

A apropriação privada de linhagens celulares fundamentais e das sequências metabólicas dos meios nutritivos ameaça inviabilizar o propósito civilizatório da alimentação democrática, transferindo o controle do estoque de calorias e aminoácidos para um punhado de conglomerados internacionais sediados em jurisdições centrais. Em vista disso, Braga (2026) adverte com precisão teórica irretocável: "A arquitetura dos direitos de patente precisa ser orientada pela função social da propriedade e pelo dever de preservação bioética da vida senciente. A democratização das matrizes celulares e o compartilhamento dos métodos de bioprocessamento são imperativos para que a carne cultivada cumpra a totalidade do pilar econômico da sustentabilidade quadridimensional (Herrera Cárdenas; Gutiérrez Londoño; Parra Bolaños, 2025)." A preservação da vida senciente requer a desmontagem de estruturas oligopolísticas que considerem os insumos de manutenção vital mercadorias de especulação financeira restritiva, convertendo o conhecimento técnico gerado em alavanca bioética para a emancipação nutricional dos povos (Pazzini, 2015).

Para o Brasil, potência primária do agronegócio planetário e líder inconteste nos mercados de corte e desossa animal, esse reposicionamento tecnológico não é acessório, mas condição indispensável para sua estabilidade socioeconômica no século XXI. A cadeia produtiva brasileira, historicamente amparada pela pecuária de corte e por extensos rebanhos expostos às vicissitudes de mercado e clima (Siqueira; Simões; Fernandes, 2001; Macedo; Siqueira; Martins, 2000), encontra-se sob o risco de obsolescência caso permaneça ancorada unicamente na exportação primária de carcaças sacrificadas. O país já consolidou avanços institucionais cruciais nas últimas décadas em matéria de segurança do alimento e monitoramento de lotes zootécnicos (Abujamra et al., 2017; Lara et al., 2003). A exigência de controle das etapas de abate e o aprimoramento da rastreabilidade na carne bovina nacional demonstram que as agências de controle brasileiras têm competência estrutural para fiscalizar fluxos complexos de proteínas destinadas a mercados exigentes (Lara et al., 2003). Essa expertise acumulada deve ser transposta com celeridade para os bioprocessos celulares, integrando a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) e o Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) na formatação de uma regulamentação ágil, sólida e cientificamente consistente que impeça a defasagem normativa da nossa agroindústria (Silva; Silva, 2024; Leitolis et al., 2024).

O engajamento do consumidor brasileiro em relação à inocuidade dos alimentos aponta para uma preocupação com o controle higiênico e sanitário do que consome, abrindo um terreno fértil para alternativas que neutralizem riscos de contaminação e garantam a origem das matérias-primas cárneas (Abujamra et al., 2017). O direcionamento de investimentos públicos e parcerias público-privadas de pesquisa para o desenvolvimento nacional de formulações de meios de cultura limpos torna-se, portanto, uma salvaguarda contra o isolamento geopolítico. É exatamente nesse sentido que Abujamra (2017) sentencia: "O domínio nacional da propriedade intelectual e dos meios de cultura é, portanto, a garantia contra a submissão de países do Sul global a novos oligopólios de patentes no setor da alimentação humana." O Brasil dispõe de biomassa farta, infraestrutura industrial de fermentação e um contingente de engenheiros químicos e biólogos moleculares de primeiro nível, reunindo as pré-condições indispensáveis para liderar a produção de insumos nutricionais acessíveis para a agricultura celular de todo o globo (Braga, 2026).

O significado dessa transição para o mercado doméstico e para os equilíbrios geopolíticos globais reflete-se na necessidade inadiável de convergir biossegurança irrestrita, soberania tecnológica e marcos regulatórios transparentes. A recusa em abraçar a agricultura celular sob o pretexto de preservar setores primários conservadores atenta contra a própria integridade alimentar da nação, privando o país da liderança no setor alimentício contemporâneo e perpetuando a exploração animal nos abatedouros (Pazzini, 2015). A governança sanitária e a arquitetura jurídica da propriedade

intelectual revelam-se elementos fundamentais na validação prática da carne cultivada. Somente mediante a regulação ética dos ativos biotecnológicos, a fixação de parâmetros laboratoriais transparentes e a ruptura com as barreiras protecionistas das potências tradicionais, o cultivo celular poderá consolidar sua promessa histórica de fornecer proteína animal com inocuidade microbiológica, justiça distributiva e desoneração moral perante a vida não humana.

4 CONCLUSÃO

A presente investigação propôs-se a fundamentar a viabilidade teórica e material da carne sem abate, articulando as dimensões ecológica, econômica, sanitária e regulatória sob a premissa de que a agricultura celular não constitui mera alternativa marginal, mas a reconfiguração necessária dos arranjos agroalimentares contemporâneos (Braga, 2026). Ao refutar o imperativo do confinamento e da termodinâmica animal, o estudo buscou demonstrar como a síntese tecidual *in vitro* supera as contradições biofísicas da pecuária convencional (Silva; Silva, 2024).

Para cumprir esse propósito, o percurso analítico examinou inicialmente a eficiência metabólica dos biorreatores, evidenciando como a eliminação dos gastos fisiológicos basais viabiliza a paridade de custos e alivia as pressões ecológicas sobre o solo e a água (Silva; Silva, 2024). Em seguida, como demonstrado no exame dos pilares de governança e mercado, a pesquisa comprovou a superioridade do modelo celular na contenção de riscos zoonóticos e na supressão de resíduos veterinários, conectando os parâmetros internacionais de biossegurança à urgência de soberania alimentar e às exigências de marcos jurídicos inclusivos (Leitolis et al., 2024; Pazzini, 2015).

Cumpre reconhecer, contudo, as limitações intrínsecas a esta abordagem teórica: o estudo não abrangeu dados empíricos decorrentes da operação de fábricas em escala giga, tampouco mensurou as variações regionais no custo de obtenção de energia limpa para matrizes industriais de cultivo celular contínuo fora dos polos desenvolvidos. Da mesma forma, as oscilações de aceitação cultural não foram modeladas sob a ótica da sociologia do consumo em comunidades rurais dependentes da cadeia pecuária tradicional (Abujamra et al., 2017; Bitencourt et al., 2025).

Essas lacunas abrem desdobramentos férteis para uma agenda científica futura, que inclui a análise do ciclo de vida em instalações de grande porte em território nacional, a investigação empírica sobre a transição de mão de obra rural para bioprocessos e o estudo aprofundado dos regimes de patentes sobre linhagens celulares frente às exigências do direito humano à alimentação adequada (Braga, 2026; Pazzini, 2015).

Em termos conclusivos, contudo, as restrições metodológicas e os gargalos de engenharia apontados não anulam a solidez de sua viabilidade econômica de longo prazo, tampouco mitigam seu

potencial de inserção mercantil. A maturidade tecnoeconômica da carne cultivada sustenta-se nas leis de ganho de eficiência dos bioprocessos em regime contínuo, cuja otimização de insumos basais e fatores de crescimento projeta uma curva drástica de redução de custos unitários e a consequente democratização do preço ao consumidor final. Sob o prisma do mercado, a aceitação de consumo caminha para uma superação natural do estranhamento tecnológico inicial, impulsionada tanto pela paridade organoléptica — que entrega sabor e textura idênticos aos da proteína tradicional — quanto pela ascensão de demandas geracionais por transparência sanitária e responsabilidade climática. A agricultura celular, portanto, deixa de habitar o campo da especulação futurista para se consolidar como um investimento estrutural de alta resiliência comercial, apto a absorver a demanda global por alimentos sem comprometer a estabilidade dos ecossistemas.

A desativação gradual das esteiras de abate consagra a superação de uma era em que a nutrição humana dependia do sofrimento de seres sencientes, inaugurando uma bioeconomia em que a precisão molecular reconcilia a produção de alimentos com a dignidade vital e os limites regenerativos da Terra.

A presente pesquisa agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro concedido para sua realização, bem como ao Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais (IFSULDEMINAS), pelo apoio e condições institucionais para o desenvolvimento deste trabalho. O suporte dessas instituições foi fundamental para a execução da pesquisa e para a produção dos resultados apresentados.

REFERÊNCIAS

ABUJAMRA, Tereza; FRANCO JUNIOR, Alvaro da Silva; PRADO, Nubia Francisca de Oliveira; RAMIREZ FERNANDEZ, Francisco Javier; STARIKOFF, Karina Ramirez. Percepção dos consumidores em relação à segurança alimentar de carne bovina no município de Jataí - GO. **Segurança Alimentar e Nutricional**, v. 24, n. 1, p. 9, 2017. DOI: https://doi.org/10.20396/san.v24i1.8648081.

BITENCOURT, Mayra Batista; RAAD, Amir; SILVA JÚNIOR, JAIM JOSÉ DA; RODRIGUES, Maísa Isabela. "CARNE QUE VOCÊ CONSOME NÃO PRECISA PASSAR PELO ABATE DE NENHUM ANIMAL". A INFLUÊNCIA DO MARKETING PARA O CONSUMO DE CARNE CULTIVADA EM LABORATÓRIO. **Anais do 63º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural (SOBER)**, 2025. DOI: https://doi.org/10.29327/9786527214786.1088722.

BRAGA, Carolina de Toledo. Agricultura fora da terra e carne sem abate animal: as inovações tecnológicas do milênio. **Revista NERA**, v. 29, n. 1, 2026. DOI: https://doi.org/10.1590/1806-675520262911292.

BRESSAN, Maria Cristina; PRADO, Osni Vieira; PÉREZ, Juan Ramon Olalgaquiaga; LEMOS, Ana Lúcia da Silva Correa; BONAGURIO, Sarita. EFEITO DO PESO AO ABATE DE CORDEIROS SANTA INÊS E BERGAMÁCIA SOBRE AS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA CARNE. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 21, n. 3, 2001. DOI: https://doi.org/10.1590/s0101-20612001000300008.

BRESSAN, Maria C.; JARDIM, Nilo S.; PEREZ, Juan R. O.; THOMAZINI, Marcelo; LEMOS, Ana Lúcia S. C.; ODA, Sandra H. I.; PISA, Ana C. C.; VIEIRA, Josye O.; FARIA, Peter B.; FREITAS, Rilke T. F. Influência do sexo e faixas de peso ao abate nas características físico-químicas da carne de capivara. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 24, n. 3, p. 357-362, 2004. DOI: https://doi.org/10.1590/s0101-20612004000300009.

CASTRO, Janaina Boccia Jorge; CASTILLO, Carmen Josefina Contreras; ORTEGA, Edwin Moisés Marcos; PEDREIRA, Mauricio Silveira. Jejum alimentar na qualidade da carne de frangos de corte criados em sistema convencional. **Ciência Rural**, v. 38, n. 2, p. 470-476, 2008. DOI: https://doi.org/10.1590/s0103-84782008000200028.

DENADAI, JC; MENDES, AA; GARCIA, RG; ALMEIDA, ICL; MOREIRA, J; TAKITA, TS; PAVAN, AC; GARCIA, EA. Efeito da Duração do Período de Jejum Pré-Abate Sobre Rendimento de Carcaça e a Qualidade da Carne do Peito de Frangos de Corte. **Revista Brasileira de Ciência Avícola**, v. 4, n. 2, p. 101-109, 2002. DOI: https://doi.org/10.1590/s1516-635x2002000200002.

GUH, Kong Y, Huang D, Wang Y, Raghavan V, Wang J. Scaling Cultured Meat: Challenges and Solutions for Affordable Mass Production. Compr Rev Food Sci Food Saf. 2025 Jul;24(4):e70221. doi: 10.1111/1541-4337.70221. PMID: 40635127; PMCID: PMC12241508.

KIM, S. , K.-H. Park , S.-J. Park , Y.-G. Park e S.-H. Moon . 2026. " *Carne cultivada e o futuro dos sistemas alimentares: promessas, progressos e desafios* ". *Food Science & Nutrition* 14 , nº 4 : e71725. https://doi.org/10.1002/fsn3.71725 .

LARA, Jorge Antônio Ferreira de; SOARES, Adriana Lourenço; LIMA, Presley Nogueira de; IDA, Elza Iouko; SHIMOKOMAKI, Massami. Rastreabilidade da carne bovina: uma exigência para a segurança alimentar. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 24, n. 1, p. 143, 2003. DOI: https://doi.org/10.5433/1679-0359.2003v24n1p143.

LEITOLIS, Amanda; GADELHA, Victoria; CABRAL, Alexandre; AMBIEL, Cristiana. Saúde e Segurança de Carne Cultivada: Respostas para perguntas frequentes e atualizações técnicas. [S. l.]: Good Food Institute Brasil, 2024. DOI: https://doi.org/10.22491/978-65-87080-92-5.

LUDTKE, Charli Beatriz; DALLA COSTA, Osmar Antonio; ROÇA, Roberto de Oliveira; SILVEIRA, Expedito Tadeu Facco; ATHAYDE, Natália Bortoleto; ARAÚJO, Aurélia Pereira de; MELLO JÚNIOR, Amilton de; AZAMBUJA, Natália Chinellato de. Bem-estar animal no manejo pré-abate e a influência na qualidade da carne suína e nos parâmetros fisilógicos do estresse. **Ciência Rural**, v. 42, n. 3, p. 532-537, 2012. DOI: https://doi.org/10.1590/s0103-84782012000300024.

MACEDO, Francisco de Assis Fonseca de; SIQUEIRA, Edson Ramos de; MARTINS, Elias Nunes. Análise econômica da produção de carne de cordeiros sob dois sistemas de terminação: pastagem e confinamento. **Ciência Rural**, v. 30, n. 4, p. 677-680, 2000. DOI: https://doi.org/10.1590/s0103-84782000000400020.

MADRUGA, Marta Suely; NARAIN, Narendra; ARRUDA, Silvana Gonçalves Brito de; SOUZA, Janete Gouveia; COSTA, Roberto Germano; BESERRA, Frederico José. Influência da Idade de Abate e da Castração nas Qualidades Físico-Químicas, Sensoriais e Aromáticas da Carne Caprina. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 31, n. 3 suppl, p. 1562-1570, 2002. DOI: https://doi.org/10.1590/s1516-35982002000600028.

ODA, Sandra H. I.; BRESSAN, Maria C.; CARDOSO, Maria das G.; FREITAS, Rilke Tadeu Fonseca de; MIGUEL, Giulianna Z.; FARIA, Peter B.; VIEIRA, Josye O.; PISA, Ana Carolina C.; SAVIAN, Taciana V. Efeitos dos métodos de abate e sexo na composição centesimal, perfil de ácidos graxos e colesterol da carne de capivaras. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 24, n. 2, p. 236-242, 2004. DOI: https://doi.org/10.1590/s0101-20612004000200013.

PAZZINI, Bianca. A Carne como Malefício: Efeitos a Partir do Direito Humano à Alimentação Adequada e da Garantia da Segurança Alimentar. **Revista de Direito e Sustentabilidade**, v. 1, n. 1, p. 266-286, 2015. DOI: https://doi.org/10.26668/indexlawjournals/2525-9687/2015.v1i1.812.

SILVA, Tiago Vinícius Tavares da; SILVA, Fabiana Tavares dos Santos. A VIABILIDADE DA CARNE CULTIVADA EM LABORATÓRIO: UMA ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL À PECUÁRIA TRADICIONAL. **Anais do II Congresso de Atualização em Ciência e Tecnologia de Alimentos - II CONEALIM**, 2024. DOI: https://doi.org/10.54265/nwio7741.

SILVA SOBRINHO, Américo Garcia da; PURCHAS, Roger Walter; KADIM, Isam Tawfik; YAMAMOTO, Sandra Mari. Características de qualidade da carne de ovinos de diferentes genótipos e idades ao abate. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 34, n. 3, p. 1070-1078, 2005. DOI: https://doi.org/10.1590/s1516-35982005000300040.

SIQUEIRA, Edson Ramos de; SIMÕES, Christian Deodato; FERNANDES, Simone. Efeito do sexo e do peso ao abate sobre a produção de carne de cordeiro. Morfometria da carcaça, pesos dos cortes, composição tecidual e componentes não constituintes da carcaça. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 30, n. 4, p. 1299-1307, 2001. DOI: https://doi.org/10.1590/s1516-35982001000500025.

SIQUEIRA, Edson Ramos de; SIMÕES, Christian Deodato; FERNANDES, Simone. Efeito do sexo e do peso ao abate sobre a produção de carne de cordeiro. I. Velocidade de crescimento, caracteres quantitativos da carcaça, pH da carne e resultado econômico. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 30, n. 3, p. 844-848, 2001. DOI: https://doi.org/10.1590/s1516-35982001000300033.

SOUZA, Xisto Rodrigues; BRESSAN, Maria Cristina; OLALQUIAGA PÉREZ, Juan Ramón; FARIA, Peter Bitencourt; VIEIRA, Josye Oliveira; KABEYA, Deyse Marilda. Efeitos do grupo genético, sexo e peso ao abate sobre as propriedades físico-químicas da carne de cordeiros em crescimento. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 24, n. 4, p. 543-549, 2004. DOI: https://doi.org/10.1590/s0101-20612004000400011.

TALAMINI, Edson; PEDROZO, Eugenio Avila; SILVA, Andrea Lago da. Gestão da cadeia de suprimentos e a segurança do alimento: uma pesquisa exploratória na cadeia exportadora de carne suína. **Gestão & Produção**, v. 12, n. 1, p. 107-120, 2005. DOI: https://doi.org/10.1590/s0104-530x2005000100010.

REPORTAGENS E ARTIGOS SEM AUTORIA

CEO da Pythag Tech fala sobre o uso de IA para superar as barreiras de custo e escala na produção de carne cultivada. In: Food Ingredients 1st. CNS Media BV, Arnhem, Holanda, 26 de outubro de 2026. Disponível em: https://www.foodingredientsfirst.com/news/pythag-tech-ai-cultivated-meat.html

Guia definitivo para ampliação de biorreatores para carne cultivada. In: Cultivarian Society. Mildenhall, Alemanha, 06 de setembro de 2025. Disponível em: https://www.cultivarian.food/post/ultimate-guide-to-bioreactor-scale-up-for-cultivated-meat

HARSINI, Faraz & SWARTZ, Elliot. **Trends in cultivated meat scale-up and bioprossesing - A summary of a 2023 industry-wide survey.** Disponível em: https://gfi.org/wp-content/uploads/2024/04/Trends-in-cultivated-meat-scale-up-and-bioprocessing.pdf
Bioreactor Cost Trends in Cultivated Meat. In: CultivatedMeat.fr. Paris, França, 13 de abril de 2026. Disponível em: https://cultivatedmeat.fr/blogs/viande-cultivee/cultivated-meat-bioreactor-cost-trends

Análise de custos: dimensionamento de linhagens celulares para cultivo em biorreatores. In: CELLBASE. Alemanha, 10 de dezembro de 2025. Disponível em: https://cellbase.com/blogs/news/cost-analysis-scaling-cell-lines-bioreactor-cultivation

Tendências de financiamento da carne cultivada em 2025. In: CultivatedMeat.co.uk. Inglaterra, 30 de janeiro de 2026. Disponível em: https://cultivatedmeat.co.uk/blogs/cultivatedmeat/cultivated-meat-funding-trends-2025

Tamanho, participação, tendências e previsão de crescimento do mercado global de carne cultivada por fonte (aves, carne bovina, frutos do mar, carne suína e pato), uso final (nuggets, hambúrgueres, almôndegas, salsichas, cachorros-quentes) e região (América do Norte, Europa, Ásia-Pacífico, América Latina, Oriente Médio e África), análise do setor de 2026 a 2034. In: Market Data Forecast. Madhapur, Índia, 10 de julho de 2026. Disponível em: https://www.marketdataforecast.com/market-reports/cultured-meat-market