

ANÁLISE PATENTÁRIA DO USO DE 2,3-BUTANODIOL COMO UM BIOINSUMO AGRÍCOLA

Y. S. L. Braga¹, D. Tinôco²

¹Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil
(yasmimbraga@gmail.com)

²Departamento de Engenharia Bioquímica, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

Este estudo analisou o uso de 2,3-butanodiol como bioinsumo agrícola a partir de um levantamento patentário entre 2000 e 2025. Foram examinados os requerentes (país e instituições), escritórios de depósito, aplicações bioestimulantes e bioprotetoras, e níveis de maturidade tecnológica, de manufatura e comercial do bioproduto. Os resultados indicaram uma tecnologia promissora, porém ainda em estágio experimental e de validação inicial de mercado, demandando avanços para efetiva comercialização.

Palavras-chave: Insumos biológicos; Bioestimulação; Bioproteção; Maturidade tecnológica; Propriedade intelectual.

INTRODUÇÃO

Os bioinsumos agrícolas consistem em tecnologias de origem animal, vegetal e microbiana, advindos de processos biotecnológicos, usados na produção, proteção, armazenamento e beneficiamento de culturas vegetais. Esses produtos são capazes de promover o crescimento, desenvolvimento e mecanismos de resposta em plantas submetidas à sua ação físico-química e biológica (MAPA, 2025a). O Brasil, enquanto uma potência agrícola global, tem demandado, cada vez mais, insumos biológicos para o aumento da produtividade de suas culturas estratégicas. Como resultado, o mercado brasileiro de bioinsumos movimentou, somente em 2025, cerca de US\$ 914,2 milhões, com previsão de alcançar aproximadamente US\$ 1,3 bilhões até 2034 (Imarc, 2026).

Iniciativas governamentais de apoio à agricultura baseada em insumos biológicos como o Programa Nacional de Bioinsumos (PNB) têm simplificado a regulação desses produtos e oferecido incentivos financeiros para ampliar e fortalecer o seu uso na agropecuária brasileira (Brasil, 2020). Instituído pelo Decreto Nº 10.375, de 26 de maio de 2020, o PNB é responsável por criar e consolidar o catálogo nacional de bioinsumos, ação voltada para o acesso rápido e gratuito de informações sobre produtos registrados para controle de pragas e inoculantes microbianos destinados ao desenvolvimento de plantas (MAPA, 2025a).

Em 2025, o Brasil concedeu cerca de 912 registros de agrotóxicos e bioinsumos, dos quais 162 produtos foram classificados como insumos biológicos. Além

disso, 6 novos produtos técnicos inéditos e 19 formulações baseadas em ingredientes ativos novos foram registrados (MAPA, 2025b). A introdução dessas novas tecnologias no mercado brasileiro tem reforçado o compromisso com a defesa fitossanitária e a competitividade agrícola nacionais, além de estimular a investigação científica de novos candidatos a bioinsumos, como o 2,3-butanodiol (2,3-BDO). Produzido por via química ou biológica, o 2,3-BDO é um composto orgânico volátil (COV), encontrado sob três formas isoméricas distintas (levo, dextro e meso), que apresenta propriedades bioestimulantes e bioprotetoras, sendo, por isso, um potencial candidato a substituir fertilizantes e pesticidas químicos. Atuando como uma molécula sinalizadora, é capaz de induzir resistência e tolerância sistêmicas em plantas, e promover o crescimento vegetal (Silva Dias *et al.*, 2021; Tinôco *et al.*, 2023).

Primeiramente reportadas por Ryu *et al.* (2003), essas propriedades de 2,3-BDO têm motivado o desenvolvimento de tecnologias de interesse agrícola, especialmente de caráter sustentável, que, aliados aos incentivos governamentais, tem impulsionado as pesquisas na área e, por consequência, o desenvolvimento de títulos de propriedade intelectual para proteção industrial. A partir da análise do depósito de patentes, principalmente daquelas que fazem uso de 2,3-BDO exógeno, tem sido possível avaliar o nível de maturidade tecnológica da inovação, visando à sua comercialização em larga escala.

O objetivo deste estudo foi investigar o nível de desenvolvimento tecnológico, produtivo e comercial

do uso exclusivo de 2,3-BDO como um bioinsumo agrícola, alternativo aos tradicionais fertilizantes e pesticidas químicos, em termos de publicações patentárias. Uma análise da evolução temporal, requerentes e escritórios de depósitos de patentes, aplicação na agricultura, e nível de desenvolvimento tecnológico, de manufatura e comercial segundo as escalas TRL (*Technology Readiness Level*), MRL (*Manufacturing Readiness Level*) e CRL (*Customer Readiness Level* ou *Commercial Readiness Level*), respectivamente, permitiu traçar um panorama geral do estado de aplicação efetiva de 2,3-BDO na indústria agrícola, o que indicou um uso potencial, embora limitado ao ambiente laboratorial, requerendo maiores investigações em ambiente real (aplicação no campo) antes de sua efetiva comercialização. Em geral, este estudo poderá contribuir para a tomada de decisão futura sobre o direcionamento de investimentos em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) de novos bioinsumos como 2,3-BDO, especialmente às luzes do PNB e de políticas internacionais de desenvolvimento sustentável.

MATERIAL E MÉTODOS

Mapeamento patentário

Um levantamento de patentes sobre o uso exclusivo de 2,3-BDO como um bioestimulante e bioprotetor de plantas foi realizado na plataforma Espacenet da EPO (do inglês, Escritório Europeu de Patentes) no período 2000-2025, usando um conjunto de palavras-chave correlacionadas por conectores Booleanos (AND e OR) e caracteres especiais (aspas e asterisco), como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Estratégias de seleção de documentos de patentes sobre o uso exclusivo de 2,3-BDO como bioinsumo agrícola no período 2000-2025, usando a plataforma Espacenet da EPO.

Foco da busca		Estratégia de busca
Bioestimulação	Crescimento vegetal	"2,3-butanediol" AND "plant growth"
	TSI	"2,3-butanediol" AND (tolerance OR salinity OR salt OR drought OR metal*) AND plant
	RSI	"2,3-butanediol" AND (resist* OR defense) AND plant

TSI= Tolerância Sistêmica Induzida; RSI= Resistência Sistêmica Induzida.

A plataforma Espacenet (www.worldwide.espacenet.com) foi escolhida por apresentar um banco de dados gratuito, contendo mais de 150 milhões de documentos de patentes, atualizado diariamente. Com uma cobertura mundial, informações sobre invenções e desenvolvimentos tecnológicos podem ser facilmente acessadas de forma remota. Além disso, os documentos de patentes solicitadas e concedidas são disponibilizados na íntegra, o que possibilita a sua leitura e análise completas.

A busca de patentes foi realizada nos campos títulos, resumos e reivindicações, considerando apenas documentos publicados abordando o uso exclusivo de 2,3-BDO (isolado ou exógeno) como bioinsumo agrícola. Isso garantiu a obtenção de informações precisas sobre os reais efeitos de 2,3-BDO sobre as plantas, uma vez que as ações sinérgicas com outros compostos foram desconsideradas.

Análise das patentes

Uma análise Macro das patentes selecionadas foi realizada a partir da leitura da ficha técnica dos documentos publicados. As informações coletadas foram organizadas em evolução histórica dos pedidos e concessões de patentes no período 2000-2025, principais requerentes (países e natureza das instituições) e principais jurisprudências onde os depósitos de patentes foram realizados.

Em seguida, as patentes selecionadas foram analisadas de acordo com a abordagem de suas reivindicações, sendo categorizadas segundo as aplicações bioestimulantes e bioprotetoras de 2,3-BDO exógeno. Processos como crescimento vegetal, tolerância sistêmica induzida (TSI) e resistência sistêmica induzida (RSI) foram identificados e quantificados, o que permitiu traçar um perfil tecnológico das patentes.

O grau de maturidade tecnológica, de manufatura e comercial do uso de 2,3-BDO como bioinsumo agrícola foi determinado pelas escalas TRL (do inglês, Nível de Prontidão Tecnológica), MRL (do inglês, Nível de Prontidão de Fabricação) e CRL (do inglês, Nível de Prontidão Comercial), respectivamente. A escala TRL, desenvolvida pela NASA (do inglês, Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço dos Estados Unidos da América), avalia a viabilidade técnico-científica de uma inovação, classificando-a em 9 níveis, agrupados nas faixas 1-3 (pesquisa básica e prova de conceito), 4-6 (validação experimental em laboratório e ambiente relevante) e 7-9 (demonstração em ambiente real e tecnologia pronta para comercialização) (Mankins, 1995). Por sua vez, a escala MRL, desenvolvida pelo Departamento de Defesa Americano, avalia a fabricação de um

produto em larga escala, fornecendo parâmetros sobre a cadeia de fornecedores e processos de fabricação em massa. Uma tecnologia pode ser classificada em 10 níveis, agrupados nas faixas 1-3 (pesquisa básica e prova de conceito de fabricação), 4-7 (desenvolvimento e fabricação de protótipos), 8-9 (escalamento da produção) e 10 (produção plena) (United States, 2017). Por fim, a escala CRL, desenvolvida pela Agência de Projetos Avançados dos EUA, em complementação à escala TRL, avalia a maturidade e viabilidade de mercado de uma inovação. Essa escala é estruturada em 9 níveis, agrupados nas faixas 1-3 (fase de hipótese – identificação da realidade do mercado, segmento de clientes e análise de concorrência), 4-6 (validação – testes de mercado) e 7-9 (escalamento – modelo de

negócios, estratégias de *marketing*, canais de distribuição e expansão sustentável) (Maybury, 2026).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Panorama global

A Figura 1 apresenta a evolução temporal das publicações das patentes relacionadas a 2,3-BDO como um bioinsumo agrícola identificadas nos últimos 25 anos. Ao todo, 11 patentes foram selecionadas e analisadas, tendo sido categorizadas em patentes solicitadas e patentes concedidas, conforme estágio de tramitação legal.

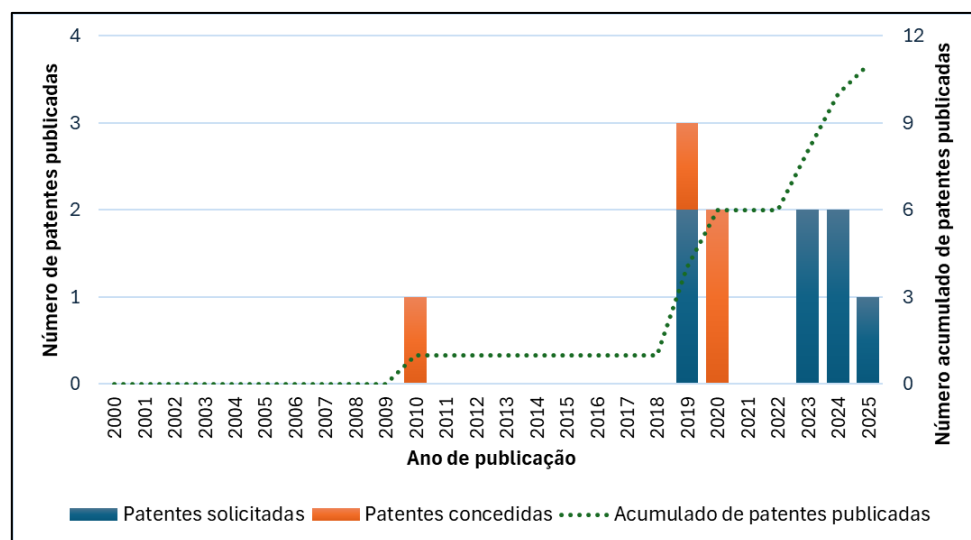


Figura 1. Distribuição anual e acumulada de patentes solicitadas e concedidas relacionadas ao uso exclusivo de 2,3-BDO como bioinsumo agrícola no período 2000-2025, de acordo com o Espacenet da EPO.

Um aumento no número de solicitações foi observado a partir de 2019, conforme verificado na Figura 1, o que pode ser justificado pelo crescente interesse em produtos biológicos agrícolas para a agricultura sustentável no período. Segundo o relatório mercadológico da *Roots Analysis (Business Research and Consulting)*, mais de 1300 patentes reivindicando produtos biológicos agrícolas foram depositadas desde 2019, revelando os esforços da indústria e da academia em alcançar soluções biológicas para as culturas agrícolas (Roots Analysis, 2026). Além disso, o incentivo a tecnologias sustentáveis a partir de 2015 com o Acordo de Paris e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos na Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) pode ter contribuído para o aumento no interesse e investigação de 2,3-BDO como um potencial substituto aos tradicionais fertilizantes e pesticidas químicos (Bioökonomie.de, 2021; European Commission, 2018).

Apesar desse cenário, apenas 4 pedidos de patentes sobre o uso exclusivo de 2,3-BDO como bioinsumo agrícola foram concedidos desde 2010 (Fig. 1). Isso sugere que, embora esse COV apresente comprovadamente propriedades bioprotetoras e bioestimulantes (Ryu *et al.*, 2003), ainda se trata de uma tecnologia em desenvolvimento, fortemente ligada à escala de bancada, o que requer mais estudos e investimentos para a sua efetiva comercialização.

Em relação aos requerentes das patentes analisadas, a Figura 2A destaca os quatro principais países e a natureza das instituições solicitantes. Cerca de 54,5% das patentes encontradas foram reivindicadas por instituições da Coreia do Sul, seguida da China com quase 27,3%, e Estados Unidos da América (EUA) e Reino Unido (Escócia), com aproximadamente 9,1% cada.

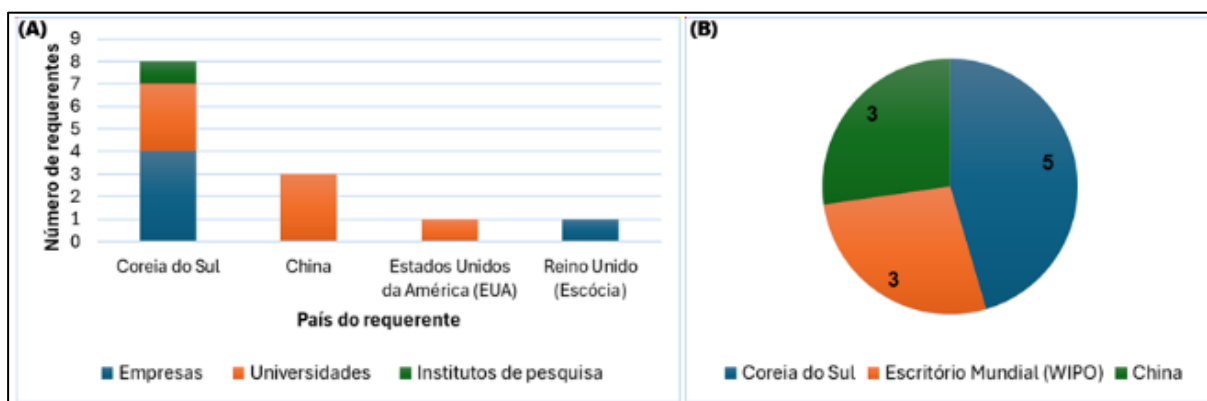
O predomínio da Coreia do Sul pode ser justificado pelos elevados investimentos nas áreas de

biotecnologia industrial e bioeconomia nos últimos anos, se consolidando como um dos países que mais têm investido em pesquisa e desenvolvimento, direcionando cerca de 5% de seu PIB para esse fim (Yonhap News Agency, 2025). Seu destaque também se deve à sua legislação, que têm priorizado a área de biotecnologia desde 1980 por meio do *Biotechnology Support Act*, criado com o intuito de incentivar pesquisas na área, além da aplicação de diversos planos governamentais e estratégias nacionais para promover o desenvolvimento de tecnologias de base biológica (Kotra, 2023).

Quanto ao perfil institucional dos requerentes, as universidades e empresas se destacaram (Fig. 2A), sendo também identificadas parcerias entre elas nos documentos analisados. A significativa presença de instituições de ensino e pesquisa dentre os requerentes, em cerca de 61,5% das patentes analisadas, novamente sugere uma tecnologia ainda em seus estágios iniciais de desenvolvimento, necessitando de aprimoramento antes da aplicação em larga escala. Esse resultado se alinha às observações feitas sobre a baixa quantidade de patentes concedidas nos últimos 25 anos. Apesar dessa realidade, a comercialização de 2,3-BDO como um bioinsumo agrícola já tem sido realizada, por

exemplo, pela empresa sul-coreana GS Caltex Corporation. O 2,3-BDO é produzido por fermentação microbiana, usando agentes biológicos selvagens (não modificados geneticamente por bioengenharia), a partir de matérias-primas naturais como mandioca e cana-de-açúcar. Além disso, nenhum produto químico nocivo é adicionado ao processo para purificação de 2,3-BDO. A empresa se destaca como requerente de 3 das 11 patentes analisadas, que reivindicam o uso exclusivo de 2,3-BDO para o controle de doenças vegetais e pragas, alcançado mediante aumento da imunidade das plantas (GS CALTEX, 2020).

Por fim, as patentes identificadas neste estudo foram depositadas nos escritórios sul-coreano (*Korean Intellectual Property Office*), chinês (*China Nation Intellectual Property Administration*) e mundial (WIPO - *World Intellectual Property Organization*), conforme observado na Figura 2B. Novamente, a Coreia do Sul se destacou no uso de 2,3-BDO como bioestimulante e bioprotetor de plantas, tendo a sua propriedade intelectual garantida não somente no mercado externo, mas também, no mercado interno, com o depósito de 5 das 11 patentes analisadas.



RSI= Resistência Sistêmica Induzida; TSI= Tolerância Sistêmica Induzida.

Figura 2. Distribuição dos requerentes de patentes por país e natureza das instituições (A) e dos escritórios de depósito de patentes (B) relacionadas ao uso exclusivo de 2,3-BDO como bioinsumo agrícola no período 2000-2025, de acordo com o Espacenet da EPO.

Aplicações tecnológicas

A Figura 3A apresenta as principais aplicações de 2,3-BDO como bioinsumo agrícola identificadas nas patentes analisadas. Aproximadamente 55% dos documentos reportaram reivindicações relacionadas à otimização de processos fisiológicos das plantas resultantes do tratamento com 2,3-BDO, especialmente, a melhoria do metabolismo vegetal e a tolerância ao estresse ambiental. O restante das patentes, cerca de 45%, abordou a defesa agrícola,

em que 2,3-BDO tem atuado como um agente de controle de doenças microbianas e pragas.

A propriedade bioestimulante de 2,3-BDO foi retratada pela promoção do crescimento vegetal, expresso principalmente em termos do aumento de tecidos radiculares (83% dos documentos reivindicando a bioestimulação de 2,3-BDO) e TSI contra fatores abióticos como condições ambientais adversas, incluindo seca, salinidade, temperatura, pH e metais pesados (17% dos documentos reivindicando a bioestimulação de 2,3-BDO), enquanto a bioproteção foi representada pelo

processo de RSI contra fitopatógenos microbianos, especialmente de origem bacteriana e viral (80% dos documentos reivindicando a bioproteção de 2,3-BDO) e ação herbicida contra ervas daninhas (20% dos documentos reivindicando a bioproteção de 2,3-BDO), conforme observado na Fig. 3B. A Tabela 1

sumariza as principais informações encontradas nas patentes analisadas sobre essas propriedades de 2,3-BDO, destacando, ainda, o tipo de planta tratada, estresses combatidos (bióticos e abióticos), e efeitos vegetais observados.

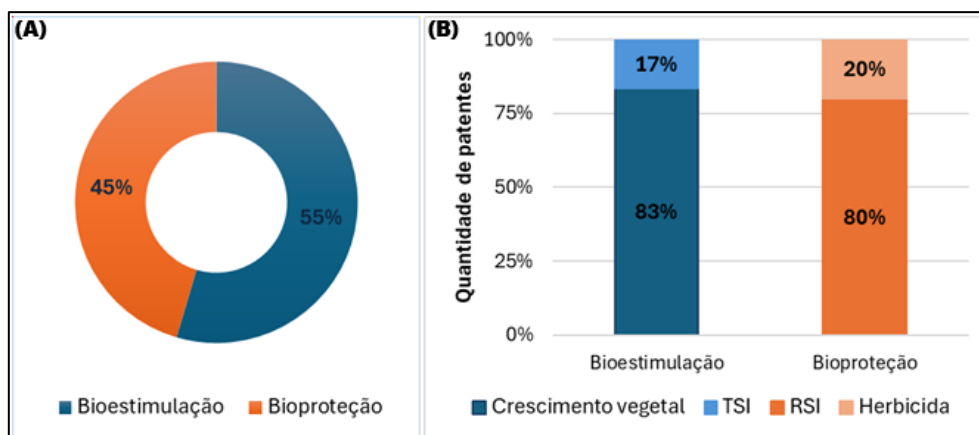


Figura 3. Principais aplicações agrícolas (A) e tipos de efeitos vegetais promovidos por 2,3-BDO exógeno, reportados nas patentes publicadas no período 2000-2025, de acordo com o Espacenet da EPO.

No pedido internacional da patente WO2023283183A1, requerida pelo Conselho de Regentes do Arizona em nome da Universidade do Estado do Arizona - EUA, a promoção do crescimento de *Arabidopsis thaliana*, uma planta herbácea nativa da Europa e Ásia, após tratamento com 2,3-BDO, foi reivindicada. Os requerentes reportaram maior desenvolvimento de raízes, aumento da biomassa aérea com ênfase nas folhas e caule, e melhoria na produtividade agrícola e qualidade da rizosfera, ao aplicarem cerca de 250 mM de 2,3-BDO de origem biológica (caldo de fermentação) no solo de plantas crescidas em vasos em ambiente laboratorial.

Por sua vez, a redução nos danos causados pelo estresse hídrico e osmótico em plantas dessa mesma espécie, tratadas com 2,3-BDO e crescidas em placas de cultura de tecidos em laboratório, foi reivindicada na patente coreana KR100943414B1 pela Fundação de Cooperação Acadêmica-Indústria da Universidade Nacional de Chonnam da Coreia do Sul (do inglês, CNU R&BD Foundation). Os requerentes solicitaram proteção intelectual ao uso do isômero *levo*-2,3-BDO de base biológica, por injeção foliar ou radicular, que demonstrou induzir o fechamento dos estômatos de *A. thaliana* sob condições extremas de seca e salinidade. Taxas de sobrevivência vegetal de 60% e 90% foram verificadas a partir do tratamento das folhas com 100 µg/mL (diluição 1:10) e raízes com 50 ng de 2,3-BDO, respectivamente.

Estudos científicos têm demonstrado que o 2,3-BDO é também capaz de induzir tolerância vegetal contra

o estresse térmico e acúmulo de metais pesados no solo, embora nenhum desses efeitos tenham sido reportados nas patentes analisadas (Park *et al.*, 2022; Sá *et al.*, 2022).

A patente KR102178512B1, requerida pela empresa GS Caltex em parceria com a CNU R&BD Foundation, apresentou como reivindicação o uso de uma mistura de *levo*-2,3-BDO (94,3%) e *meso*-2,3-BDO (5,7%) como agente de controle dos sintomas infecciosos da murcha verde em tomates, causada pela bactéria *Ralstonia solanacearum*. Considerada um dos fitopatógenos mais relevantes da agricultura global, essa bactéria é capaz de afetar uma ampla gama de hospedeiros (Mansfield *et al.*, 2012). Os inventores testaram cerca de 1-300 µg/mL da mistura isomérica de 2,3-BDO por pulverização foliar ou irrigação do solo, em ambiente controlado (estufa). Mais de 75% dos sintomas foram reduzidos ao empregarem cerca de 9 µg/mL de 2,3-BDO.

O controle de doenças virais também foi identificado no levantamento realizado neste estudo. A patente WO2019054840A2 da empresa sul-coreana FarmHannong Co., Ltd. apresentou como reivindicação o controle das doenças causadas pelos vírus do mosaico do pepino, mosaico do tabaco, mosaico de pimenta e pimentão, mancha-branca do tomateiro e enrolamento amarelo das folhas do tomateiro acometidos por plantas de pimenta vermelha. Os inventores aplicaram cerca de 100 ppm de 2,3-BDO, por injeção direta nas plantas cultivadas em campo, o que contribuiu para um controle de 59 a 100% dos sintomas infecciosos dessas doenças.

Por fim, 2,3-BDO foi reivindicado na patente KR20190047858A da empresa GS Caltex para o controle de ervas daninhas em culturas de arroz, crescidas sob condições de campo em ambiente controlado. Uma solução de meso-2,3-BDO de base biológica apresentou uma atividade herbicida média

de 80% após pulverização foliar e injeção direta no solo.

Tabela 1. Principais informações sobre o uso exclusivo de 2,3-BDO na agricultura, reportadas nas patentes publicadas no período 2000-2025, de acordo com o Espacenet da EPO.

Código da patente	Requerentes	Planta tratada	Aplicação agrícola	Doença/estresse combatido	Efeitos sobre as plantas
KR102044161B1	<i>Korea Research Institute of Bioscience & BioTechnology Chonnam National University Industry-Academic Cooperation Foundation</i>	Batata e <i>Arabidopsis</i>	Bioproteção (RSI)	Podridão-mole	Controle dos sintomas infecciosos
KR100943414B1	<i>Korea Research Institute of Bioscience & BioTechnology Chonnam National University Industry-Academic Cooperation Foundation</i>	<i>Arabidopsis thaliana</i> (planta herbácea)	Bioestimulação (TSI)	Seca e salinidade	Fechamento de estômatos e aumento da taxa de sobrevivência vegetal
KR102157851B1	<i>GS Caltex Co. e Chonnam National University Industry-Academic Cooperation Foundation</i>	Pimenta, tomate, grama, gramado, repolho e tangerina	Bioproteção (RSI)	Antracnose (pimenta), murcha verde ou bacteriana (tomate), murcha (grama), mancha marrom (gramado), podridão negra (repolho) e úlcera cítrica (tangerina)	Controle dos sintomas infecciosos
KR102178512B1	<i>GS Caltex Co. e Chonnam National University Industry-Academic Cooperation Foundation</i>	Tomate	Bioproteção (RSI)	Murcha verde ou bacteriana	Controle dos sintomas infecciosos
KR20190047858A	<i>GS Caltex Co. (empresa)</i>	Arroz	Bioproteção (Herbicida)	Ervas daninhas	Controle do crescimento de plantas indesejadas
WO2019054840A2	<i>FarmHannong Co., Ltd. (empresa)</i>	Pimenta, pimentão e pepino	Bioproteção (RSI)	Mosaico do pepino, mosaico do tabaco, mosaico de pimenta e pimentão, mancha-branca do tomateiro e enrolamento amarelo das folhas do tomateiro	Controle dos sintomas infecciosos

Código da patente	Requerentes	Planta tratada	Aplicação agrícola	Doença/estresse combatido	Efeitos sobre as plantas
WO2023283183A1	Arizona Board of Regents on behalf of Arizona State University	<i>A. thaliana</i>	Bioestimulação (crescimento vegetal)	-	Desenvolvimento de raízes e folhagem
WO2023214041A1	Epigenetica Ltd. (empresa)	Manjerição	Bioestimulação (crescimento vegetal)	-	Aumento da biomassa aérea
CN120574903A	Dalian University of Technology	Arroz e milho	Bioestimulação (crescimento vegetal)	-	Desenvolvimento radicular
CN118077690A	Dalian University of Technology	<i>Dendrobium officinale</i> (orquídea)	Bioestimulação (crescimento vegetal)	-	Aumento da biomassa vegetal e acumulação de ingredientes ativos e antioxidantes
CN117778228A	Nanjing Agricultural University	<i>A. thaliana</i>	Bioestimulação (crescimento vegetal)	-	Desenvolvimento radicular e produção de sementes

RSI= Resistência Sistêmica Induzida; TSI= Tolerância Sistêmica Induzida.

Desenvolvimento tecnológico, produtivo e comercial

As patentes identificadas neste estudo apresentaram um TRL na faixa 3-7, conforme observado na Figura 4. Esse nível classificatório corresponde a um grau de desenvolvimento tecnológico majoritariamente

experimental, em que trabalhos sistemáticos delineados a partir de conhecimentos prévios sobre 2,3-BDO têm sido usados para demonstrar a viabilidade técnica desse produto enquanto um potencial bioinsumo agrícola.

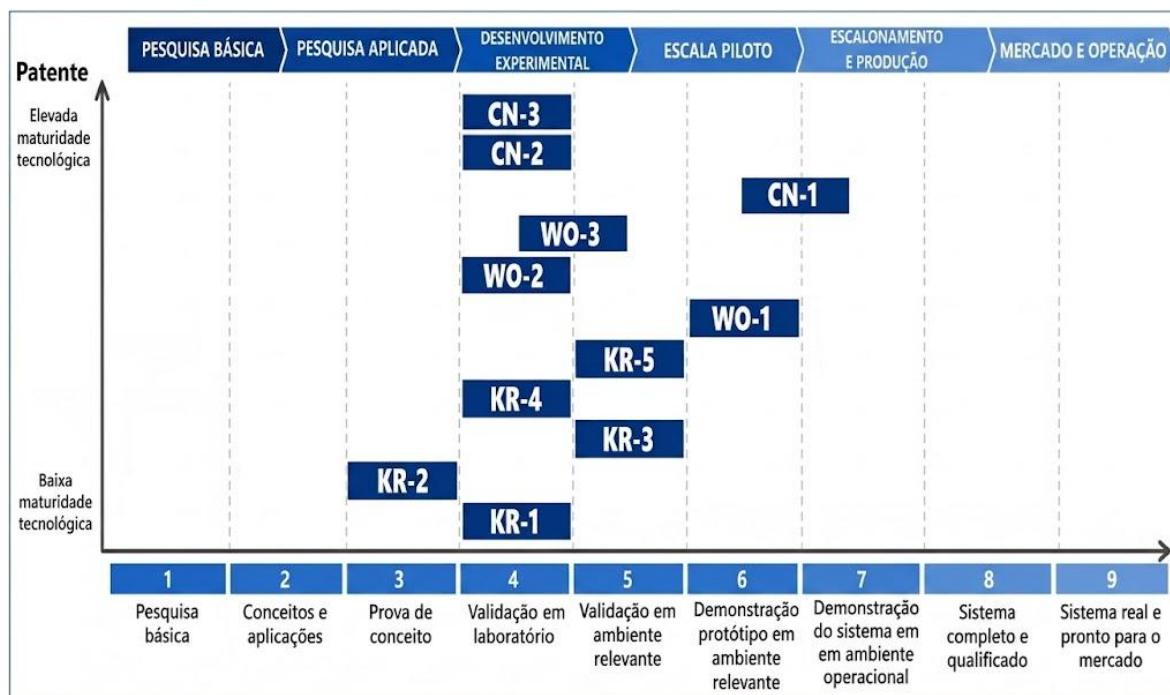


Figura 4. Nível de desenvolvimento tecnológico de 2,3-BDO como bioinsumo agrícola reportado nas patentes publicadas no período 2000-2025 no Espacenet da EPO, segundo escala TRL. As patentes foram identificadas por códigos, sendo KR (Coreia do Sul), WO (Escritório Mundial de Patentes), e CH (China).

Cerca de 72,7% dos documentos foram classificados nos níveis 4 e 5, o que indica que a aplicação agrícola de 2,3-BDO ainda se concentra em escala de laboratório e ambiente controlado, como estufas e casas de vegetação, respectivamente. Apenas a patente CN120574903A, requerida pela Universidade Tecnológica de Dalian da China, apresentou uma tecnologia classificada como TRL 6-7. Os inventores reportaram um aumento do tamanho dos grãos e um reduzido número de grãos murchos de arroz após tratamento com 0,1 mM de uma mistura isomérica de 2,3-BDO de base biológica (levo e meso) por pulverização. Os inventores reportaram também um aumento do peso seco das raízes de mudas de milho de cerca de 42%, crescidas em vasos experimentais cilíndricos de plástico, após tratamento com 1 mM da mesma mistura isomérica de 2,3-BDO.

As patentes também apresentaram níveis relativamente baixos de MRL e CRL, conforme verificado nas Figuras 5 e 6. Na escala MRL, as patentes se distribuíram na faixa 3-5 (Fig. 5), o que

indica uma fabricação de bioinsumos baseados exclusivamente em 2,3-BDO fisicamente possível, com testes iniciais em ambiente relevante para identificação de possíveis gargalos na produção em massa. No entanto, a tecnologia ainda requer o desenvolvimento de processos industriais que sejam escalonáveis para a sua efetiva comercialização. A patentes KR102157851B1 e WO2023214041A1, apesar de terem sido requeridas pelas empresas GS Caltex (em parceria com a CNU R&BD Foundation), e Epigenetica Ltd., respectivamente, foram classificadas com um MRL de 4, uma vez que suas reivindicações tecnológicas envolveram validações da ação bioestimulante (crescimento vegetal) e bioprotetora (RSI) de 2,3-BDO em ambiente controlado (estufa) e sistemas de cultivo hidropônico (condições controladas em estufas ou ao ar livre). Nessas condições, é possível identificar os principais riscos de fabricação e a viabilidade de replicação prática de processos básicos.

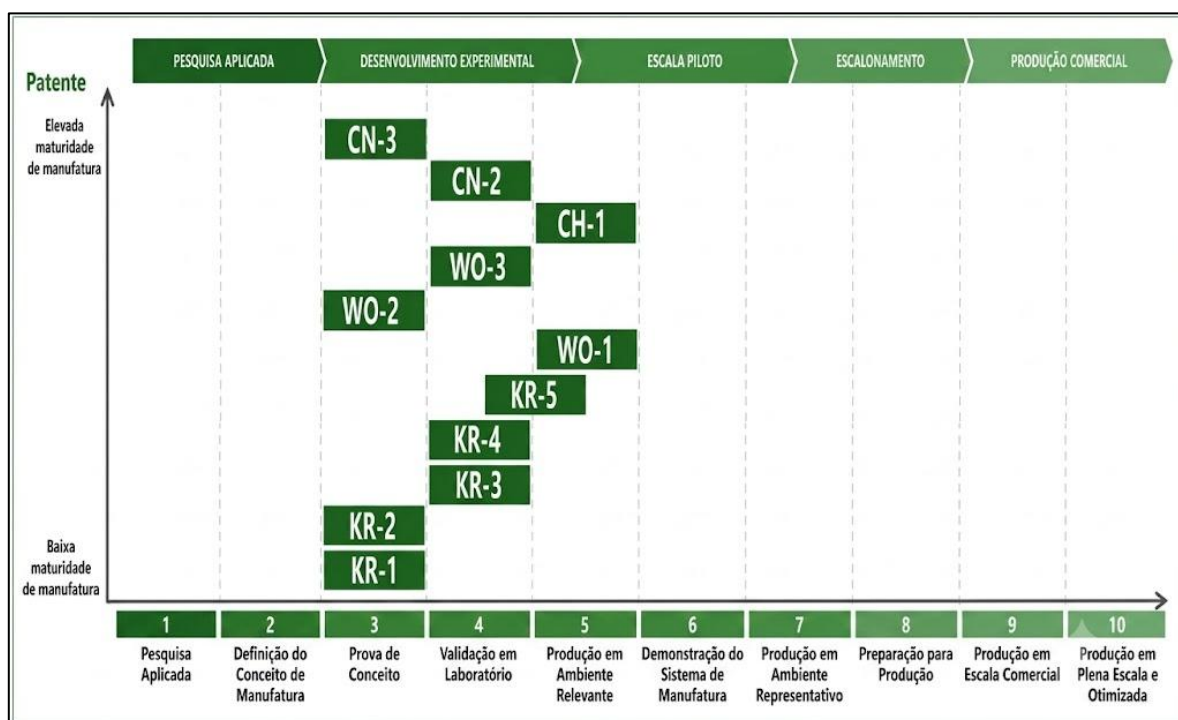


Figura 5. Nível de desenvolvimento de manufatura de 2,3-BDO como bioinsumo agrícola reportado nas patentes publicadas no período 2000-2025 no Espacenet da EPO, segundo escala MRL. As patentes foram identificadas por códigos, sendo KR (Coreia do Sul), WO (Escritório Mundial de Patentes), e CH (China).

Por fim, na escala CRL, as patentes foram classificadas na faixa 1-5, com predominância no nível 3 (Fig. 6). Nesse estágio, as oportunidades de negócio podem ser identificadas e as hipóteses comerciais formuladas. A inovação técnica apresenta viabilidade exploratória, mas ainda depende da

validação de mercado. A patente CN118077690A, solicitada pela Universidade Tecnológica de Dalian (China), reivindicou a utilização de 2,3-BDO de base biológica (caldo de fermentação) para a proliferação de protocormos de *Dendrobium officinale* (orquídea). Os inventores reportaram ganhos de produtividade e redução de custos com o uso de 2,3-BDO,

demonstrando haver uma proposta de valor economicamente atraente para produção em maiores escalas. Contudo, nenhuma evidência de validação junto ao mercado ou adoção por usuários industriais

foi identificada, o que conferiu à tecnologia uma classificação corresponde a modelos de negócio em fase inicial.

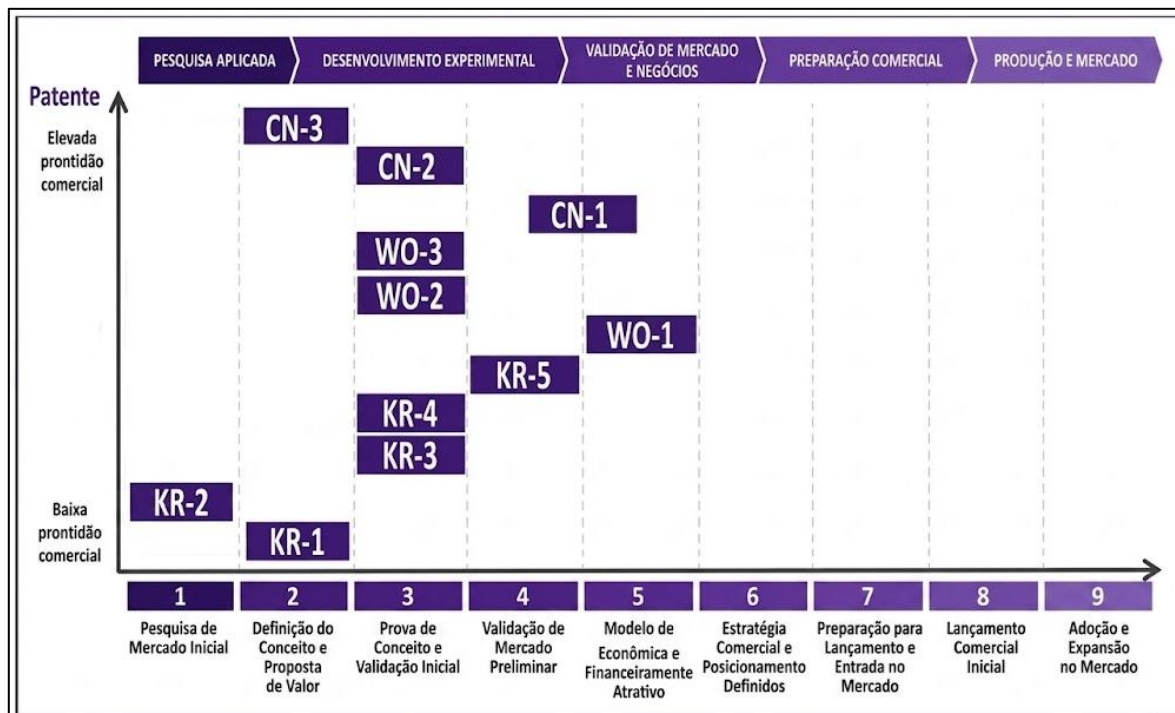


Figura 6. Nível de desenvolvimento comercial de 2,3-BDO como bioinsumo agrícola reportado nas patentes publicadas no período 2000-2025 no Espacenet da EPO, segundo escala CRL. As patentes foram identificadas por códigos, sendo KR (Coreia do Sul), WO (Escritório Mundial de Patentes), e CH (China).

CONCLUSÃO

O levantamento patentário realizado neste estudo revelou um nível de maturidade tecnológica, de manufatura e comercial de 2,3-BDO como um bioinsumo agrícola ainda em fase de desenvolvimento experimental e validação inicial de negócio, estando fortemente atrelado ao ambiente acadêmico e de pesquisa. O baixo número de patentes publicadas nos últimos 25 anos confirma tratar-se de uma tecnologia com pequena presença de mercado, sendo atualmente comercializada apenas por uma empresa sul-coreana. Apesar desse cenário, as reivindicações tecnológicas confirmaram a capacidade bioestimulante e bioprotetora de 2,3-BDO, cuja eficácia na promoção do crescimento vegetal e controle de doenças causadas por fitopatógenos o torna um potencial candidato a substituir tradicionais fertilizantes e pesticidas químicos. Junto com a China, a Coreia do Sul tem dominado o mercado interno e externo de bioinsumos baseados exclusivamente em 2,3-BDO, direcionando esforços e investimentos em PD&I. Como resultado, espera-se que avanços sejam alcançados nos próximos anos, incluindo a participação de outros

países, de modo a tornar essa tecnologia produtiva e comercialmente competitiva, e ainda mais alinhada ao desenvolvimento sustentável da indústria agrícola mundial.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento recebido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) na forma de bolsa de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

- BIOÖKONOMIE.DE. **Bioeconomy and the UN Sustainable Development Goals**. 2021. Disponível em: <https://biooekonomie.de/en/topics/in-depth-reports/bioeconomy-and-un-sustainable-development-goals>. Acesso em: 31 maio 2026.
- BRASIL. Decreto nº 10.375, de 26 de maio de 2020. Institui o Programa Nacional de Bioinsumos e o Conselho Estratégico do Programa Nacional de Bioinsumos. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 157, n. 100, p. 2, 27 maio 2020. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br>. Acesso em: 12 jun. 2026.

EUROPEAN COMMISSION. **A sustainable bioeconomy for Europe**: strengthening the connection between economy, society and the environment – Updated Bioeconomy Strategy. Brussels: European Commission, 2018. Disponível em:

https://environment.ec.europa.eu/strategy/bioeconomy-strategy_en. Acesso em: 31 maio 2026.

GS CALTEX. **GS Caltex expands sales of eco-friendly 2,3-butanediol produced from natural resources**. Seul, 2020. Disponível em:

<https://gscaltexmediahub.com/news/23-butanediol/>. Acesso em: 2 jun. 2026.

IMARC GROUP. **Brazil Agricultural Biologicals Market Size, Share, Trends and Forecast by Function, Crop Type, and Region, 2026-2034**. [S.L.], 2026. Disponível em: <https://www.imarcgroup.com/brazil-agricultural-biologicals-market>. Acesso em: 12 jun. 2026.

KOTRA (KOREA TRADE-INVESTMENT PROMOTION AGENCY). **Current Status of Korea's Pharmaceutical & Biotechnology Industry Competitiveness and Industry Policy**. Seoul: Invest Korea, 2023. Disponível em: https://www.investkorea.org/ik-en/bbs/i-5025/detail.do?ntt_sn=490817. Acesso em: 31 maio 2026.

MANKINS, John C. **Technology Readiness Levels: A White Paper**. Washington, DC: Advanced Concepts Office; Office of Space Access and Technology; NASA, 1995a. Disponível em: http://www.artemisinnovation.com/images/TRL_White_Paper_2004-Edited.pdf. Acesso em: 12 jun. 2026.

MANSFIELD, John; GENIN, Stéphane; MAGGS-KOLMER, Shulamit; REITER, Jochen; RISTAINO, Jean; TANS-KERSTEN, Julie; TOTH, Ian; VALVERDE, Roberto; WHALEN, Maureen. Top 10 plant pathogenic bacteria in molecular plant pathology. **Molecular Plant Pathology**, [S.L.], v. 13, n. 6, p. 614–629, ago. 2012.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. **Balanço Anual de registros de agrotóxicos e bioinsumos em 2025**. Brasília, DF, 2025a. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/2026/mapa-divulga-balanco-anual-de-registros-de-agrotoxicos-e-bioinsumos-em-2025>. Acesso em: 12 jun. 2026.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. **Programa Nacional de Bioinsumos**. Brasília, DF, 2025b. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inovacao/bioinsumos/o-programa>. Acesso em: 12 jun. 2026.

MAYBURY, Mark T. Commercial Readiness Level (CRL). In: KURTMOLLAIEV, Seidali; LERVIK-OLSEN, Line; ANDREASSEN, Tor W. (ed.). **Exploring Commercial, Social, and Digital Innovation from the Customer Perspective**. 1. ed. London: Routledge, 2026. cap. 8, p. 115–127.

PARK, Ah-Ryeom; SEO, Jin-Won; JUNG, Sun-Chul; LEE, Young-Hwan; KIM, Jeong-Ah; PARK, Hee-Yeon; LIM, Jin-Hee; PARK, Sang-Cheol; RYU, Choong-Min.

Exogenous Bio-Based 2,3-Butanediols Enhanced Abiotic Stress Tolerance of Tomato and Turfgrass under Drought or Chilling Stress. **Journal of Microbiology and Biotechnology**, [S.L.], v. 32, n. 5, p. 582–593, maio 2022.

ROOTS ANALYSIS. **Agricultural Biologicals Market**. [S.L.], 2026. Disponível em: <https://www.rootsanalysis.com/reports/agricultural-biologicals-market.html>. Acesso em: 19 jun. 2026.

RYU, Choong-Min; FARAG, Mohamed A.; HU, Chang-Ho; REDDY, M. S.; WEI, Chia-Hui; PARÉ, Paul W.; KLOPPER, Joseph W. Bacterial volatiles promote growth in Arabidopsis. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 100, n. 8, p. 4927–4932, 2003. DOI: 10.1073/pnas.0730845100.

SÁ, Carina Carvalho; LOPES, Maria João dos Santos; SILVA, Alexandre Alves; TOLEDO FILHO, João Augusto; COSTA, Larissa Corrêa do Bomfim; CASTRO, Evaristo Mauro de; ALVES, José Donizeti. The bacterial volatile compounds 2,3-butanediol and acetoin improve Arabidopsis thaliana tolerance to cadmium by modulating antioxidant responses. **Antioxidants**, [S.L.], v. 11, n. 12, p. 2303, dez. 2022.

SILVA DIAS, Bruno Henrique; JUNG, Suk-Hwan; CASTRO OLIVEIRA, João Victor; RYU, Choong-Min. C4 Bacterial Volatiles Improve Plant Health. **Pathogens**, [S.L.], v. 10, n. 6, p. 682, maio 2021.

TINÔCO, Daniel; ROCHA, Mariana Montano Souza; CASTRO, Giovanna Motta de; ZVEITER, Ana Julia Lima; FREIRE, Denise Maria Guimarães. 2,3-Butanediol e seus produtores microbianos como promotores de crescimento e resistência em plantas: uma visão geral. In: WEB ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA QUÍMICA, 2023, Online. **Anais [...]**. Recife: Even3, 2023. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/wendeq2023/641050-23-butanediol-e-seus-produtores-microbianos-como-promotores-de-crescimento-e-resistencia-em-plantas--uma-visao-g>. Acesso em: 19 jun. 2026. DOI: 10.29327/166591.2-46.

UNITED STATES. Department of Defense. **Manufacturing Readiness Level (MRL) Deskbook**. Version 2017. Washington, DC: Department of Defense, 2017.

YONHAP NEWS AGENCY. **R&D spending takes up 5 pct of GDP in 2024**: report. Seoul, 2025. Disponível em: <https://en.yna.co.kr/view/AEN20251226002100320>. Acesso em: 31 maio 2026.