



ConBRepro

XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

I CIGELUBRA

Congresso Internacional de Gestão e Engenharia Luso-Brasileiro

04 a 06 de dezembro de 2024

Energias Limpas nas Engenharias

Digital Twin para a produção de alimentos e manejo florestal: uma revisão da literatura

Giulihano Luis Feltz Zeni

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Cleiton Hlusko

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Vinicius Moretti

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Micaela Ines Castillo Ulloa

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Fábio Neves Puglieri

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Resumo: O Digital Twin (DT) é a tecnologia responsável por conectar o mundo real ao mundo virtual com um fluxo bidirecional de dados, promovendo melhorias nas operações de diferentes sistemas, como na produção de alimentos e manejo florestal. Esses sistemas são, direta ou indiretamente, relacionados aos sistemas vivos, e identificar sua aplicação, objetivos, capacidades e benefícios é essencial para compreender o estado atual de seu desenvolvimento. Para isso, uma revisão sistemática de literatura com o método PRISMA, selecionou um portfólio de 23 artigos, correspondentes a estudos de caso aplicados. Com isso, identificou o desenvolvimento do DT para a produção de alimentos e manejo florestal em 6 áreas, agricultura em campo aberto e ambiente controlado, pecuária, aquicultura, silvicultura e agroindústria, desenvolvidas, principalmente na China e na República da Coreia. Na Europa também verificou o desenvolvimento da tecnologia, em especial Reino Unido. Tais aplicações em diferentes localizações tem por finalidade aproveitar as capacidades de monitoramento, previsão, simulação e controle para beneficiar a tomada de decisão, melhoria, planejamento e análise, com o objetivo de melhorar a produção, controlar animais, monitorar infraestruturas e extrair madeira. Então, apesar da aplicação do DT para a produção de alimentos e manejo florestal ainda estar em sua infância, a tecnologia é utilizada como uma ferramenta na tomada de decisão, utilizando do monitoramento, previsões e simulações, para implementar melhoras com informações em tempo real.

Palavras-chave: Digital Twin, agricultura, tecnologias digitais, tomada de decisão, monitoramento.

Digital Twin for food production and forest management: a literature review

Abstract: The Digital Twin (DT) is the technology responsible for connecting the real world to the virtual world with a bidirectional flow of data, promoting improvements in the operations of different systems, such as food production and forest management. These systems are directly or indirectly related to living systems, and naming their application, aims, capabilities, and benefits is essential to understand the current state of their development. For this, a systematic literature review using the PRISMA method selected a portfolio of 23 articles, corresponding to applied case studies. With

this, it found the development of DT for food production and forest management in 6 areas, open field agriculture and controlled environment, livestock, aquaculture, forestry and agroindustry, developed mainly in China and the Republic of Korea. In Europe, it also verified the development of technology, especially the United Kingdom. Such applications in various locations are intended to take advantage of monitoring, forecasting, simulation and control capabilities to help decision-making, improvement, planning and analysis, with the aim of improving production, controlling animals, monitoring infrastructures and extracting timber. So, although the application of DT for food production and forest management is still in its infancy, the technology is used as a tool in decision making, using monitoring, forecasts and simulations, to implement improvements with real-time information.

Keywords: Digital Twin, agriculture, digital technologies, decision making, monitoring.

1. Introdução

A quarta revolução industrial, intitulada de “Indústria 4.0”, apresentada em 2011, como resultado da parceria entre empresas, universidades e o governo alemão (Frank et al. 2019; Oztemel e Gursev, 2020), posteriormente estabelecida como estratégia pelo governo da Alemanha, com o objetivo de aumentar a produtividade e eficiência da indústria nacional alemã (Kagermann et al., 2013). Tal estratégia não se limitou apenas ao setor industrial, mas as tecnologias também contribuíram, sendo aplicadas nos setores de manutenção, energia, construção, cidades inteligentes e agricultura (HANANTO et al., 2024).

Entre essas tecnologias digitais, destaca-se o Digital Twin (DT) que apresenta aplicabilidade em diferentes áreas. Porém implementar a DT é um desafio, entre os quais Botín-Sanabria et al. (2022) identificaram as questões relacionadas com dados, a inexistência de padrões para implementar o DT de maneira estruturada e regulamentada, os custos de implementação, as necessidades tecnológicas para escalabilidade nas análises de dados e dificuldades de comunicação.

Além disso, os modelos de DT identificados na pesquisa bibliográfica de Rayhana et al. (2024) são desenvolvidos, em sua maioria, com finalidades de prever e otimizar, apesar das diversas possibilidades de implementação. Apesar disso, a literatura ainda é limitada para a aplicação do DT na agricultura, especialmente para casos de desenvolvimento e aplicação de estruturas de DT. Isso ocorre em decorrência da tecnologia ainda estar em sua infância.

Com isso, o objetivo desta pesquisa é verificar o estado atual da aplicação do DT nas atividades de produção de alimentos na agricultura, pecuária e aquicultura, e no manejo florestal na silvicultura. Assim, uma revisão sistemática da literatura será desenvolvida para identificar onde e quais as áreas na qual o DT é desenvolvido nos estudos de caso, verificando os objetivos, as capacidades e benefícios do emprego da tecnologia para a produção agrícola e manejo florestal.

Logo, para apresentar o estado atual da aplicação do DT, o artigo é estruturado da seguinte forma. A seção 1 apresenta as considerações iniciais e motivação para o estudo. A seção 2, apresenta o Referencial Teórico sobre o DT e o DT na agricultura. Na seção 3, é apresentada a metodologia aplicada para obtenção dos resultados, os quais são discutidos na seção 4, para, na seção 5 apresentar as conclusões alcançadas por este estudo.

2. Referencial Teórico

O DT tem suas origens em 2002 na Universidade de Michigan, quando em uma apresentação a indústria, foi apresentado o ideal conceitual do Product Lifecycle Management, o qual continha o espaço real, o virtual e a sua conexão, ou seja, os elementos do DT, referenciando o espelhamento do espaço físico no virtual, sendo conhecido a partir de 2003 como Modelo de Espaços Espelhados (GRIEVES e VICKERS,

2017). Contudo, de acordo com Grieves e Vickers (2017) o termo DT foi adotado posteriormente para a representação de produtos físicos, seja ele potencial ou real, com o desenvolvimento de informações virtuais. Assim, a origem do termo DT é atribuída ao trabalho de Grieves e Vickers (TAO et al., 2018; BARRICELLI et al., 2019; FULLER et al., 2020; JONES et al., 2020; ATTARAN e CELIK, 2023).

A integração entre o espaço físico e o cibernético também representa o DT para Tao et al. (2018), no qual sua implementação ocorre em diferentes campos, como no ciclo de vida do produto, no design de produtos, na produção, entre outras, com um conceito em rápida evolução. Logo, o DT provê aos usuários a capacidade de compreender o ciclo de um produto, desde sua concepção com o design e desenvolvimento, até o final de seu ciclo, além de permitir a personalização para que desenvolvedores realizem comparações e avaliações (TAO et al., 2019). Já a definição de DT para a National Aeronautical Space Administration (NASA), corresponde a integração entre um veículo ou sistema construído com simulações probabilísticas, multiescala, que utiliza de dados para realizar o espelhamento (GLAESSGEN e STARGEL, 2012).

Assim, ao espelhar sistemas físicos, como produtos, processos e serviços, o DT é uma tecnologia, com a qual organizações podem obter valor e benefícios com uma velocidade, já que a partir da detecção de problemas físicos, a resolução é facilitada (ATTARAN E CELIK, 2023). Por isso, um DT necessita de dados e tecnologias para desenvolver um sistema integrado capaz de contribuir em processos com atividade, por exemplo de simulação e monitoramento (ZHENG et al., 2019). Então, ao replicar um sistema físico de maneira virtual, um DT é capaz de contribuir com o processo de tomada de decisão ao compartilhar insights, realizar previsões, monitoramento e simulações, ao serem apoiados por tecnologias como a Inteligência Artificial (AI), sensores e Internet das Coisas (IoT) (ALBALKHY et al., 2024).

Para isso, uma estrutura de DT é necessária, e no ambiente campo, nas atividades de agricultura, pecuária, aquicultura e silvicultura, possui diferentes aplicações e objetivos. Logo, para Pylianidis et al. (2021) identificaram que os DT agrícolas envolvem sistemas vivos e produtos, direta ou indiretamente, a qual varia de plantas e animais individuais até fazendas, o que resulta em menores velocidades nas taxas de respostas. Assim, quando utilizados como meio para a gestão da fazenda baseada em informações digitais e em tempo real, minimizando a dependência de observações e tarefas manuais no local (verdouw et al., 2021).

Além disso, utilizar da agricultura inteligente em um cenário de aumento populacional, a utilização do DT capaz de coletar e usar conjuntos de dados, proporciona a realização de análises preditivas beneficiadores dos sistemas agrícolas (CESCO et al., 2023). Com isso, o DT representa uma poderosa tecnologia com potencial de digitalizar e replicar sistemas complexos, como na agricultura, o qual ainda pode se interligar com a sustentabilidade e proporcionar redução de gases do efeito estufa, otimizar o uso de recursos e a produção (PURCELL, NEUBAUER, T. e MALLINGER, 2023).

3. Metodologia

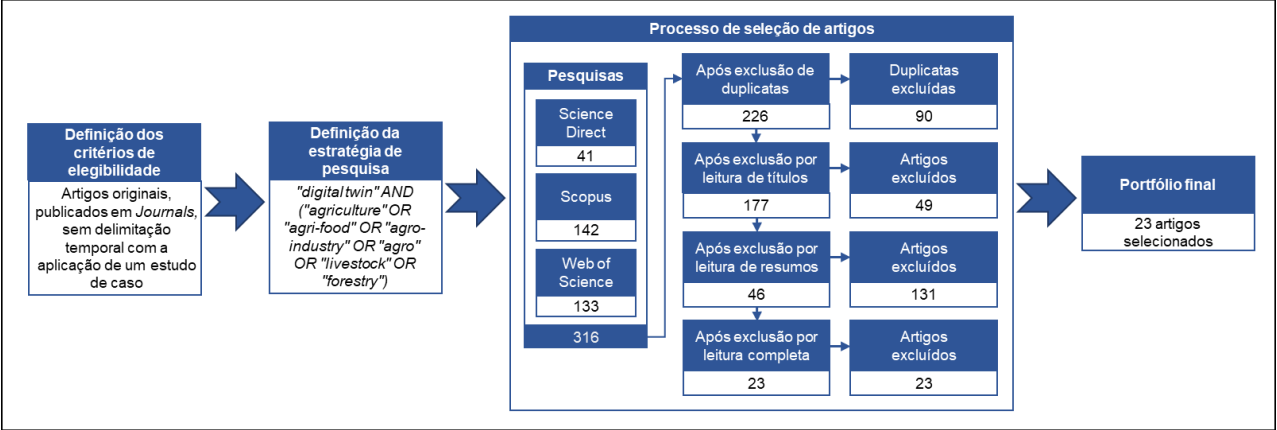
A revisão sistemática de literatura aplicada neste estudo, comprometeu-se em construir um portfólio de artigos para identificar o estado atual das aplicações do DT na agricultura, pecuária e silvicultura. Para tal, foram adotados critérios de seleção, referentes a artigos i) originais; ii) publicados em *Journals*; iii) sem delimitação temporal; iv) com um estudo de caso aplicado. Tais critérios foram utilizados para selecionar artigos com estudos de caso com a aplicação do DT na agricultura, pecuária e silvicultura.

Logo, com a elegibilidade definida, pesquisas foram conduzidas nas bases de dados da ScienceDirect, Scopus e Web of Science, estabelecendo como estratégia de pesquisa o

uso do termo: *"digital twin" AND ("agriculture" OR "agri-food" OR "agro-industry" OR "agro" OR "livestock" OR "forestry")*, e conduzidas em junho de 2024. Então, para construir um portfólio de artigos, as publicações resultantes da aplicação da estratégia de pesquisa nas bases de dados foram filtradas, com a exclusão de duplicatas, e de artigos não alinhados com os critérios de seleção estabelecidos, após à i) leitura de títulos; ii) leitura do resumo e palavras-chaves; iii) leitura completa.

Assim, a definição dos critérios de elegibilidade e bases de dados, da estratégia de pesquisa, do processo de seleção de artigos, e da definição do portfólio final, compreendem as etapas do PRISMA 2020 statement (PAGE et al., 2021), adotado nesta pesquisa e resumido na Figura 1.

Figura 1 – Revisão sistemática de literatura baseada no PRISMA 2020 statement



Fonte: Autoria própria (2024)

Com o portfólio final definido, a revisão sistemática de literatura, buscou identificar verificar o estado atual do desenvolvimento do DT na agricultura, pecuária, piscicultura e silvicultura. Para isso, verificou-se onde estão sendo desenvolvidos os estudos de caso e para qual a finalidade, quais as capacidades do DT e quais atividades auxiliam e beneficiam. Além disso, informações sobre ano, *Journal* em qual foi publicado e objetivo dos artigos também foram coletadas.

4. Resultados e discussões

A revisão sistemática da literatura, realizada com as etapas do PRISMA 2020 statement (PAGE et al., 2021), ilustrado na Figura 1, resultou em um portfólio final constituído de 23 artigos. Esses artigos são apresentados no Quadro 1, com suas respectivas referências e *Journal* no qual foi publicado.

Quadro 1 – Portfólio de artigos selecionados

Título	Autor	Journal
Planning agricultural core road networks based on a digital twin of the cultivated landscape	Machl, Donaubauer e Kolbe (2019)	Journal of Digital Landscape Architecture
Digital twin of an urban-integrated hydroponic farm	Jans-Singh et al. (2020)	International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems
A decision support system for urban agriculture using digital twin: A case study with aquaponics	Ghandar et al. (2021)	IEEE Access
Design and research of digital twin system for multi-environmental variable mapping in plant factory	Zhang et al. (2023a)	Computers and Electronics in Agriculture

Digital Twin Application: Making a Virtual Pig House Toward Digital Livestock Farming	Jeong et al. (2023)	IEEE Access
Digital twin deployment for smart agriculture in Cloud-Fog-Edge infrastructure	Kalyani, Bermeo e Collier (2023)	International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems
Digital twin perception and modeling method for feeding behavior of dairy cows	Zhang et al. (2023b)	Computers and Electronics in Agriculture
Digital twin-based intelligent fish farming with Artificial Intelligence Internet of Things (AIoT)	Ubina et al. (2023)	Smart Agricultural Technology
Forest digital twin: A new tool for forest management practices based on Spatio-Temporal Data, 3D simulation Engine, and intelligent interactive environment	Qiu et al. (2023)	Computers and Electronics in Agriculture
Digital Twin-Based Smart Aquafarm–Case Study	Goo et al. (2023)	Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences
From soil to sea: An ecological modelling framework for sustainable aquaculture	Ferreira et al. (2023)	Aquaculture
Prediction of Sensor Data in a Greenhouse for Cultivation of Paprika Plants Using a Stacking Ensemble for Smart Farms	Han, Mutahira e Jang (2023)	Applied Sciences-Basel
Web-based agricultural infrastructure digital twin system integrated with GIS and BIM concepts	Cho et al. (2023)	Computers and Electronics in Agriculture
A Cyber-Physical System Based on Digital Twin and 3D SCADA for Real-Time Monitoring of Olive Oil Mills	Martinez-Ruedas et al. (2024)	Technologies
An agricultural digital twin for mandarins demonstrates the potential for individualized agriculture	Kim e Heo (2024)	Nature Communications
Hybrid modeling for grassland productivity prediction: A parametric and machine learning technique for grazing management with applicability to digital twin decision systems	Paruelo, Texeira e Tomasel (2024)	Agricultural Systems
Modelling the Temperature Inside a Greenhouse Tunnel	Hull et al. (2024)	AgriEngineering
Virtual agri-food supply chains: A holistic digital twin for sustainable food ecosystem design, control and transparency	Guidani, Ronzoni e Accorsi (2024)	Sustainable Production and Consumption
A cyclic and holistic methodology to exploit the Supply Chain Digital Twin concept towards a more resilient and sustainable future	Cimino et al. (2024)	Cleaner Logistics and Supply Chain
Digital Twins analysis as a tool to find new descriptors for grapevine bunch morphology categorisation and grey mould infection risk evaluation	Zanchin et aç. (2024)	Biosystems Engineering
Design and Implementation of a Digital Twin System for Log Rotary Cutting Optimization	Zhao et al. (2024)	Future Internet
Digital Twin Prototypes for Supporting Automated Integration Testing of Smart Farming Applications	Barbie, Hasselbring e Hansen (2024)	Symmetry

Green Urban Scenarios: A Framework for Digital Twin Representation and Simulation for Urban Forests and Their Impact Analysis	Ozel e Petrovic (2024)	Arboriculture and Urban Forestry
---	------------------------	----------------------------------

Fonte: Autoria própria (2024)

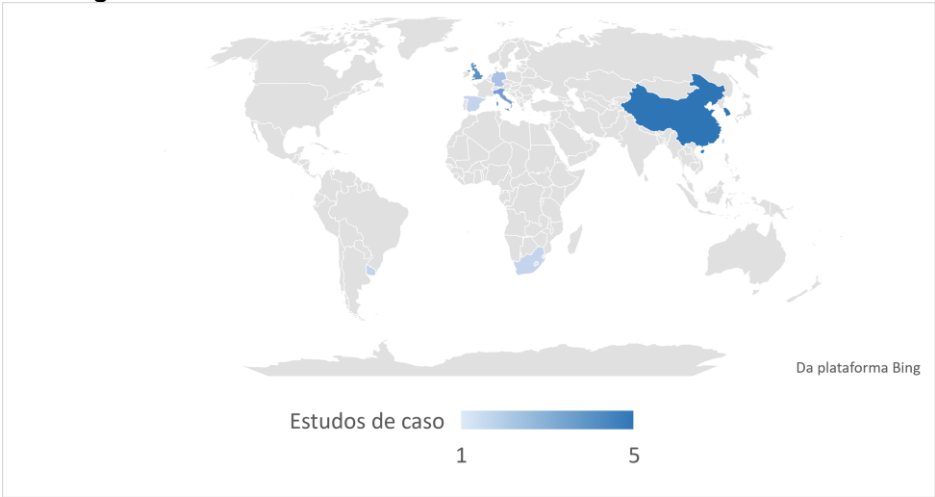
Com o Quadro 1, nota-se que apesar de a pesquisa não se utilizar da delimitação temporal, os artigos selecionados foram publicados entre 2019 e 2024, em especial em 2023 e 2024 com 10 artigos publicados em cada ano, enquanto para 2019, 2020 e 2021 foram publicados apenas 1 artigo cada. Já para as publicações, verifica-se publicações realizadas em 18 *Journals*, dos quais 15 com publicação única, enquanto o *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems* e o *IEEE Access* apresentaram duas publicações, e o *Journal* com maior número de publicações, com 4, corresponde ao *Computers and Electronics in Agriculture*.

Assim, verifica-se que o DT para os sistemas agrícolas ainda está em sua infância, visto que a maioria dos estudos de caso foram publicados a partir de 2023, em diferentes revistas, mas destacando-se em *Journals* de agricultura e tecnologia. Assim, para compreender melhor o estado da adoção do DT na agricultura, pecuária e silvicultura, nas próximas seções, serão apresentadas informações sobre o local de aplicação do DT (seção 4.1), as áreas de aplicação (seção 4.2), o objetivo da aplicação do DT (seção 4.3) e capacidades e os benefícios do DT (seção 4.4).

4.1 Local de aplicações do DT

Os estudos de caso selecionados com o portfólio de artigos foram aplicados em 9 países, concentrando-se principalmente na Ásia e Europa. No caso asiático, 5 publicações com aplicações do DT na China e na República da Coreia, foram identificadas, além de uma em Taiwan, enquanto na Europa, as aplicações ocorreram principalmente no Reino Unido, Itália, Alemanha e Espanha, com 4, 3, 2 e 1 artigos, respectivamente. Além desses, 1 estudo do desenvolvimento do DT para a pecuária no Uruguai e agricultura na África do Sul foram identificados. Logo, a Figura 2 apresenta o local onde os estudos de caso foram desenvolvidos.

Figura 2 – Local onde os estudos de caso foram desenvolvidos



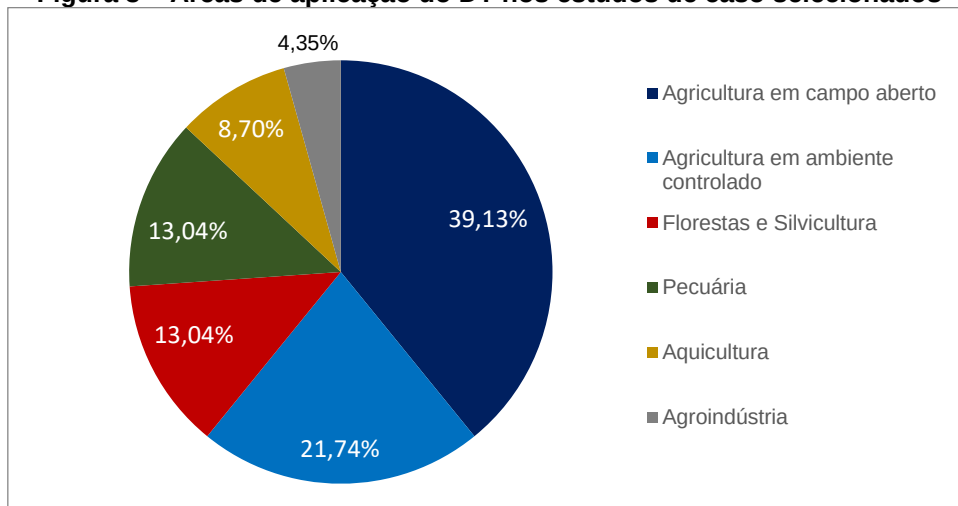
Fonte: Autoria própria (2024)

Com a Figura 2, é possível verificar uma predominância de pesquisas e aplicações em 2 países, na China e na Coreia do Sul, característica a qual pode ser justificada por aspectos de desenvolvimento tecnológico e densidade populacional dessas regiões. Logo, o DT com suas capacidades de monitoramento, previsão, simulação e controle, em conjunto com a crescente demanda de alimentos em regiões densamente povoadas, contribuí com a produção agrícola e o monitoramento de animais e da infraestrutura, como de estufas.

4.2 Áreas de aplicação do DT

A aplicação do DT nos estudos de caso analisados ocorreu na agricultura em campo aberto, a agricultura em ambiente controlado, florestas e silvicultura, pecuária, aquicultura e agroindústria. Apesar de 6 áreas na qual foram desenvolvidas as aplicações digitais, a agricultura é predominantemente a principal, conforme ilustrado na Figura 3, além de considerar os dois grupos de maior representatividade, da agricultura em campo aberto e agricultura em ambiente controlado.

Figura 3 – Áreas de aplicação do DT nos estudos de caso selecionados



Fonte: Autoria própria (2024)

Logo, a Figura 3 nos indica que dos 23 artigos do portfólio, 14 são aplicações na agricultura, sendo 9 em campo aberto e 4 em ambiente controlado. Já na silvicultura e pecuária, observaram-se o desenvolvimento de do DT em 3 oportunidades, enquanto 2 foram observadas na aquicultura e uma na agroindústria. Assim, na agricultura em campo aberto é predominante, em especial na produção de hortaliças, ao DT conferir capacidade de monitoramento e simulação capaz de virtualizar os processos e operações agrícolas, de processamento, armazenamento e distribuição de forma holística, do campo ao varejista, contribuindo no aumento da transparência e visibilidade (GUIDANI, RONZONI e ACCORSI, 2024). E ainda, na produção de hortaliças em campo aberto, a utilização de simulação para aumentar a sustentabilidade e resiliência de cadeias de suprimentos também viabiliza a proposição de uma metodologia holística e cíclica para habilitar e explorar paradigmas nas cadeias de fornecimento (CIMINO et al., 2024).

Além das hortaliças, em campo aberto, o desenvolvimento do DT é oportunizado no monitoramento de transporte de paisagens cultivadas (MACHL, DONAUBAUER e KOLBE, 2019), na produção de trigo (KALYANI, BERMEIO e COLLIER, 2023), de tangerinas (KIM e HEO, 2024), e nas fazendas de videiras (ZANCHIN et al., 2024), são alguma das aplicações. Enquanto em ambiente controlado, a representação da realidade ambiental de ambientes controlados contribui no monitoramento e previsão da produção de hortaliças (JANS-SINGH et al., 2020). Além dessas aplicações, em ambiente controlado, a agricultura é verificada na produção plantas (ZHANG et al., 2023a), pimenta (HAN, MUTAHIRA e JANG, 2023), e nas práticas de aquaponia (GHANDAR et al., 2021; GOO et al., 2023), em decorrência das possibilidades de monitoramento de infraestrutura.

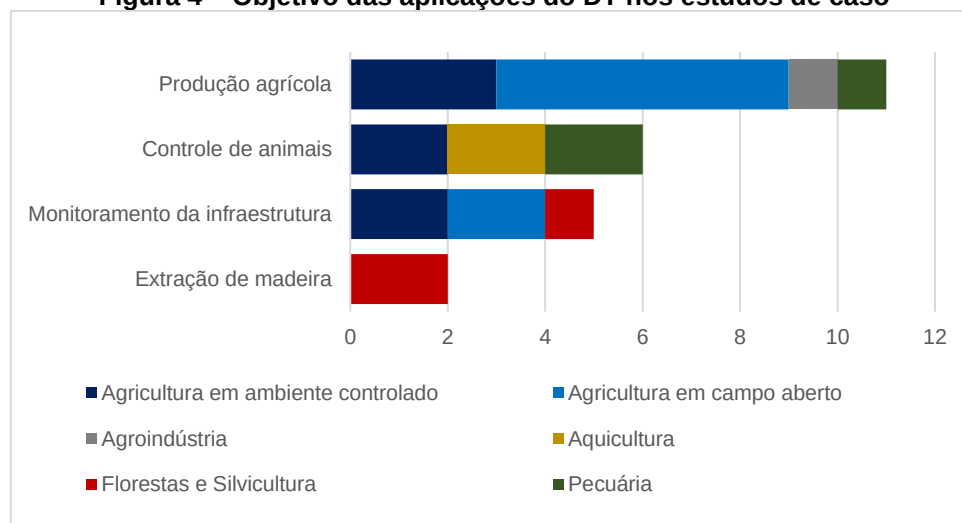
Essas características de aplicação do DT para aumentar a produção agrícola, controle de animais, monitoramento da infraestrutura e extração de madeira também é identificada nas outras áreas. No caso da silvicultura a extração de madeira é beneficiada com um manejo controlado, auxiliado pelo DT (QIU et al., 2023; ZHAO et al., 2024), enquanto na pecuária a previsão de pastagens é promovida com redes neurais implementadas na tecnologia

digital (Paruelo, Texeira e Tomasel, 2024), ou para controle em fazendas de vaca leiteiras (ZHANG et al., 2023b) ou de porcos (JEONG et al., 2023). Já, aquicultura, as aplicações são voltadas ao controle, na piscicultura (UBINA et al., 2023) e na criação de moluscos (FERREIRA et al., 2023). E, na agroindústria o objetivo corresponde a aumentar a produção agrícola em um lagar de azeite (MARTINEZ-RUEDAS et al., 2024).

4.3 Objetivo das aplicações do DT

As diferentes áreas na qual o DT foi aplicado nos estudos de caso (apresentadas na seção 4.2), são orientadas há quatro objetivos centrais, de maneira a beneficiar a produção agrícola, o controle de animais, o monitoramento da infraestrutura e a extração da madeira. Contudo, um objetivo pode contemplar mais de uma área, e por isso, a Figura 4 apresenta os objetivos dos estudos de caso, considerando as áreas de aplicação do DT.

Figura 4 – Objetivo das aplicações do DT nos estudos de caso



Fonte: Autoria própria (2024)

Então, observa-se com a Figura 4, que a produção agrícola é o principal objetivo da aplicação do DT, especialmente na agricultura em campo aberto e em ambiente controlado. Já no controle de animais, verifica-se a relação com a piscicultura e aquicultura, além da aquaponia, considerada nesta pesquisa como agricultura em ambiente controlado. E ainda, as atividades de extração de madeira estão relacionadas a silvicultura.

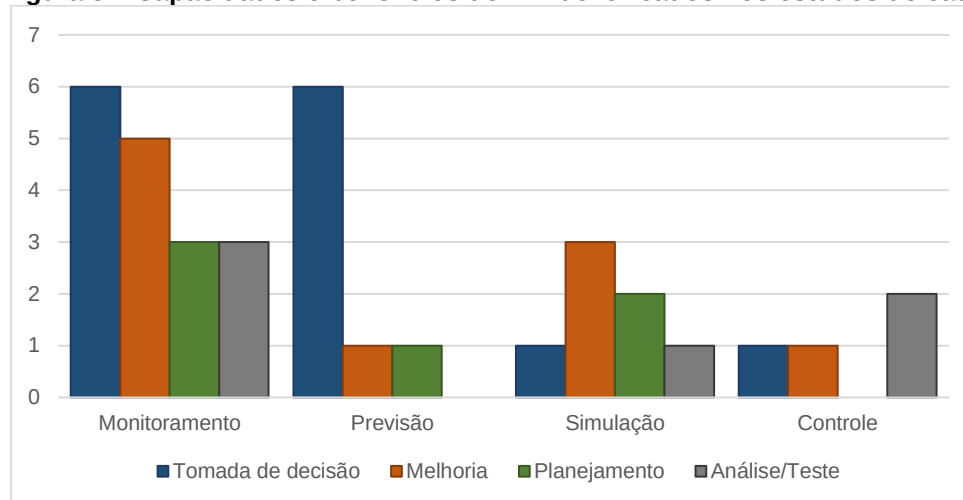
E, no caso do controle de infraestrutura, notou-se que para o ambiente controlado, as estufas são os objetos físicos virtualizados, em virtude da necessidade de controle de temperatura (HULL et al., 2024). Em campo aberto, há a integração entre tecnologias de modelagem de construção com sistemas de informação geográfica para o monitoramento de características variadas das estruturas hidráulicas (CHO et al., 2023), ou ainda para controlar e realizar testes com maquinário (BARBIE, HASSELBRING e HANSEN, 2024). Por fim, o monitoramento da infraestrutura possibilita o monitoramento e tomada de decisão sobre de infraestrutura verde e seus impactos de longo prazo sob condições climáticas variáveis, regimes de manutenção, composições de espécies, distribuições espaciais e sua exposição a doenças (OZEL e PETROVIC, 2024).

4.4 Capacidades e benefícios do DT

As capacidades e benefícios da aplicação do DT, são complementares as áreas e objetivos de aplicação do DT (seção 4.2 e seção 4.3). Isso ocorre em decorrência do DT ser projetado para determinadas funções que não se limitam a apenas uma. Então verificou-se que nos estudos de caso do portfólio, os artigos utilizaram-se de quatro capacidades, de monitoramento, previsão, simulação e controle. Contudo, cada uma dessas capacidades

beneficia o desenvolvimento da réplica virtual por meio da tomada de decisão, da melhoria na operação, com simulações ou com o controle. Logo, a Figura 5 apresenta essa relação.

Figura 5 – Capacidades e benefícios do DT identificados nos estudos de caso



Fonte: Autoria própria (2024)

Com a Figura 5, nota-se que a capacidade de monitoramento possibilitada pelo DT é benéfica principalmente para a tomada de decisão, situação que se repete para a previsão, enquanto, em decorrência de uma maior facilidade em acessar informações em tempo real, e a possibilidade de realizar previsões, como com o uso de redes neurais. Além disso, monitorar as características em tempo real gera oportunidades para realização de melhorias, as quais podem ser simuladas em ambientes virtuais com maior praticidade e possibilidades de cenários.

E ainda, notou-se que a capacidade de simulação contribui com melhores planejamentos, que também são resultantes do monitoramento em tempo real, devido a maior resiliência proporcionada pelo DT, que capacita alterações em irrigações ou alimentação de animais. Por fim, o benefício de realizar análises e testes é essencial, já que testes em ambientes virtuais podem ser monitorados dinamicamente em uma variedade de requisitos e variáveis, além de serem suportados pela capacidade de controle.

5. Conclusões

As tecnologias digitais, são importantes ferramentas no aumento da produtividade e eficiência, que auxiliam na tomada de decisão, em decorrência das diferentes capacidades, como o monitoramento inteligente e a simulação de cenários. Assim, diferentes setores são beneficiados, entre eles as atividades relacionadas a agricultura, pecuária, aquicultura e silvicultura. Nesse setor agropecuário, o DT aperfeiçoa as operações, mas há a necessidade de identificar o impacto e benefícios das aplicações de DT desenvolvidas na literatura.

Dessa maneira, com o objetivo de verificar o estado atual da aplicação do DT nas atividades de produção de alimentos na agricultura, pecuária e aquicultura, e no manejo florestal na silvicultura, uma revisão sistemática de literatura foi realizada com o auxílio do PRISMA 2020 statement (PAGE et al., 2021). Com o método, construiu-se um portfólio de 23 artigos para identificar, o estado atual na aplicação do DT, verificando onde, as áreas, os objetivos, as capacidades e benefícios do desenvolvimento e emprego da tecnologia

Assim, com o portfólio de artigos, verificou-se que o DT está sendo aplicado e desenvolvido principalmente na China e República Coréia situação com potencial justificativa na necessidade de uma maior produção de alimentos e o desenvolvimento tecnológico desses. Logo, para atender a demanda de grandes centros urbanos, principalmente na agricultura,

seja em campo aberto ou ambiente controlado, a utilização da tecnologia de DT promove as capacidades de monitoramento, previsão, simulação e controle, que beneficiam, especialmente, a tomada de decisão e atividades de melhoria, promovendo uma melhora na produção de alimentos, controle de animais, monitoramento da infraestrutura e nas atividades de extração de madeira. Por isso, conclui-se que o DT é utilizado atualmente como uma ferramenta para auxílio na tomada de decisão que se utiliza do monitoramento, previsões e simulações, para implementar melhorias na agricultura, pecuária, aquicultura e silvicultura.

Com isso, esta pesquisa contribui com a literatura ao apresentar o estado atual da aplicação do DT em estudos de caso, identificando a importância e capacidades da tecnologia para proporcionar melhorias nas atividades de produção de alimentos e manejo, destacando também onde, os objetivos e benefícios do seu desenvolvimento. Contudo, este trabalho limita-se a uma revisão da literatura que se utiliza apenas de artigos originais com estudos de caso aplicados. Logo, o portfólio não elegeu em seus critérios os artigos de revisão ou artigos publicados em conferências. Além disso, uma outra limitação decorre do resultado limitado de pesquisas na literatura nas bases de dados selecionadas.

Por fim, sugere-se para pesquisas futuras, o desenvolvimento de uma proposta de *framework* para a implementação do DT na agricultura, analisando facilitadores e barreiras para a implementação. Além disso, sugere-se verificar o potencial da tecnologia de DT para o desenvolvimento sustentável nas atividades de agricultura, pecuária, aquicultura e silvicultura. E ainda, recomenda-se identificar o atual estado da adoção dessa tecnologia no Brasil, em decorrência da não identificação de pesquisas no país.

Referências

- ALBALKHY, W.; KARMAOUI, D.; DUCOULOMBIER, L.; LAFHAJ, Z.; LINNER, T. Digital twins in the built environment: Definition, applications, and challenges. **Automation in Construction**, v. 162, p. 105368, 2024.
- ALCARAZ, C.; LOPEZ, J. Digital twin: A comprehensive survey of security threats. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 24, n. 3, p. 1475-1503, 2022.
- ATTARAN, M.; CELIK, B. G. Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. **Decision Analytics Journal**, v. 6, p. 100165, 2023.
- BARBIE, A.; HASSELBRING, W.; HANSEN, M. Digital twin prototypes for supporting automated integration testing of smart farming applications. **Symmetry**, v. 16, n. 2, p. 221, 2024.
- BARRICELLI, B. R.; CASIRAGHI, E.; FOGLI, D. A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications. **IEEE access**, v. 7, p. 167653-167671, 2019.
- CESCO, S.; SAMBO, P.; BORIN, M.; BASSO, B.; ORZES, G.; MAZZETTO, F. Smart agriculture and digital twins: Applications and challenges in a vision of sustainability. **European Journal of Agronomy**, v. 146, p. 126809, 2023.
- CHO, J., KIM, C.; LIM, K. J.; KIM, J.; JI, B.; YEON, J. Web-based agricultural infrastructure digital twin system integrated with GIS and BIM concepts. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 215, p. 108441, 2023.
- CIMINO, A.; LONGO, F.; MIRABELLI, G.; SOLINA, V. A cyclic and holistic methodology to exploit the Supply Chain Digital Twin concept towards a more resilient and sustainable future. **Cleaner Logistics and Supply Chain**, v. 11, p. 100154, 2024.
- FERREIRA, J. G.; BERNARD-JANNIN, L.; CUBILLO, A., E. SILVA, J. L.; DIEDERICKS, G. P.; MOORE, H.; ... NUNES, J. P. From soil to sea: An ecological modelling framework for sustainable aquaculture. **Aquaculture**, v. 577, p. 739920, 2023.

FULLER, A.; FAN, Z.; DAY, C.; BARLOW, C. Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. **IEEE access**, v. 8, p. 108952-108971, 2020.

GHANDAR, A.; AHMED, A.; ZULFIQAR, S.; HUA, Z.; HANAI, M.; THEODOROPOULOS, G. A decision support system for urban agriculture using digital twin: A case study with aquaponics. **IEEE Access**, v. 9, p. 35691-35708, 2021.

GLAESSGEN, E.; STARGEL, D. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles. In: **53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference 20th AIAA/ASME/AHS adaptive structures conference 14th AIAA**. 2012. p. 1818.

GOO, J. B.; LEE, S. Y.; PARK, D. H.; JO, S. K. Digital twin-based smart aquafarm-case study. **The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences**, v. 48, n. 11, p. 1479-1490, 2023.

GRIEVES, M.; VICKERS, J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. **Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches**, p. 85-113, 2017.

GUIDANI, B.; RONZONI, M.; ACCORSI, R. Virtual agri-food supply chains: A holistic digital twin for sustainable food ecosystem design, control and transparency. **Sustainable Production and Consumption**, v. 46, p. 161-179, 2024.

HAN, S. H.; MUTAHIRA, H.; JANG, H. S. Prediction of Sensor Data in a Greenhouse for Cultivation of Paprika Plants Using a Stacking Ensemble for Smart Farms. **Applied Sciences**, v. 13, n. 18, p. 10464, 2023.

HANANTO, A. L.; TIRTA, A.; HERAWAN, S. G.; IDRIS, M.; SOUDAGAR, M. E. M.; PAGE, M. J.; MCKENZIE, J. E.; BOSSUYT, P. M.; BOUTRON, I.; HOFFMANN, T. C.; MULROW, C. D.; MOHER, D. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **bmj**, v. 372, 2021.

HULL, K.; VAN SCHALKWYK, P. D.; MABITSELA, M.; PHIRI, E. E.; BOOYSEN, M. J. Modelling the Temperature Inside a Greenhouse Tunnel. **AgriEngineering**, v. 6, n. 1, p. 285-301, 2024.

JANS-SINGH, M.; LEEMING, K.; CHOUDHARY, R.; GIROLAMI, M. Digital twin of an urbanintegrated hydroponic farm. **Data-Centric Engineering**, v. 1, 2020.

JEONG, D. Y.; JO, S. K.; LEE, I. B.; SHIN, H.; KIM, J. G. Digital Twin Application: Making a Virtual Pig House Toward Digital Livestock Farming. **IEEE Access**, 2023.

JONES, D.; SNIDER, C.; NASSEHI, A.; YON, J.; HICKS, B. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. **CIRP journal of manufacturing science and technology**, v. 29, p. 36-52, 2020.

KALYANI, Y.; BERMEO, N. V.; COLLIER, R. Digital twin deployment for smart agriculture in Cloud-Fog-Edge infrastructure. **International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems**, v. 38, n. 6, p. 461-476, 2023.

KIM, S.; HEO, S. An agricultural digital twin for mandarins demonstrates the potential for individualized agriculture. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, p. 1561, 2024.

MACHL, T.; DONAUBAUER, A.; KOLBE, T. H. Planning agricultural core road networks based on a digital twin of the cultivated landscape. **J. Digit. Landsc. Archit**, v. 4, p. 316-327, 2019.

MARTINEZ-RUEDAS, C.; FLORES-ARIAS, J. M.; MORENO-GARCIA, I. M.; LINAN-REYES, M.; BELLIDO-OUTEIRIÑO, F. J. A Cyber-Physical System Based on Digital Twin and 3D SCADA for Real-Time Monitoring of Olive Oil Mills. **Technologies**, v. 12, n. 5, p. 60, 2024.

OZEL, B.; PETROVIC, M. Green Urban Scenarios: A Framework for Digital Twin Representation and Simulation for Urban Forests and Their Impact Analysis. **Arboriculture & Urban Forestry (AUF)**, v. 50, n. 1, p. 109-130, 2024.

PARUELO, J. M.; TEXEIRA, M.; TOMASEL, F. Hybrid modeling for grassland productivity prediction: A parametric and machine learning technique for grazing management with applicability to digital twin decision systems. **Agricultural Systems**, v. 214, p. 103847, 2024.

QIU, H.; ZHANG, H.; LEI, K.; ZHANG, H.; HU, X. Forest digital twin: A new tool for forest management practices based on Spatio-Temporal Data, 3D simulation Engine, and intelligent interactive environment. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 215, p. 108416, 2023.

TAO, F.; XIAO, B.; QI, Q.; CHENG, J.; JI, P. Digital twin modeling. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 64, p. 372-389, 2022.

UBINA, N. A.; LAN, H. Y.; CHENG, S. C.; CHANG, C. C.; LIN, S. S.; ZHANG, K. X.; ... HSIEH, Y. Z. Digital twin-based intelligent fish farming with Artificial Intelligence Internet of Things (AIoT). **Smart Agricultural Technology**, v. 5, p. 100285, 2023.

ZANCHIN, A.; SOZZI, M.; GIORA, D.; KALANTARI, M.; BELFIORE, N.; TERLETH, J.; ... e MARINELLO, F. Digital Twins analysis as a tool to find new descriptors for grapevine bunch morphology categorisation and grey mould infection risk evaluation. **Biosystems Engineering**, v. 237, p. 71-82, 2024.

ZHANG, Y.; ZHANG, Y.; GAO, M.; DAI, B.; KOU, S.; WANG, X.; ... SHEN, W. Digital twin perception and modeling method for feeding behavior of dairy cows. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 214, p. 108181, 2023b.

ZHANG, Z.; ZHU, Z.; GAO, G.; QU, D.; ZHONG, J.; JIA, D.; ... PAN, S. Design and research of digital twin system for multi-environmental variable mapping in plant factory. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 213, p. 108243, 2023a.

ZHAO, Y.; YAN, L.; WU, J.; SONG, X. Design and Implementation of a Digital Twin System for Log Rotary Cutting Optimization. **Future Internet**, v. 16, n. 1, p. 7, 2023.

ZHENG, Y.; YANG, S.; CHENG, H. An application framework of digital twin and its case study. **Journal of ambient intelligence and humanized computing**, v. 10, p. 1141-1153, 2019.