

O uso de gêmeos digitais para projeções de reflorestamentos eficientes da Mata Atlântica no município de Natividade da Serra

Flávio R. de Sousa
UNIFEI
Itajubá, Brasil
fla13vio@gmail.com

Gabriel G. Sampaio
UNIFEI
Itajubá, Brasil
gabrielsampaio059@gmail.com

Pedro L. C. Pinto
UNIFEI
Itajubá, Brasil
pedroclcrisp@gmail.com

Samuel A. Loureiro
UNIFEI
Itajubá, Brasil
samupoke1@gmail.com

Resumo—Este estudo avalia a eficácia dos Gêmeos digitais na otimização de projetos de reflorestamento da Mata Atlântica, focando em comparar a taxa de sobrevivência das mudas, analisar o crescimento médio anual das espécies de plantas e medir a área reflorestada para comparar a eficácia da cobertura vegetal com e sem a tecnologia. A metodologia envolveu a seleção de espécies típicas da flora e fauna local e a implementação dos Gêmeos digitais para planejar, simular e monitorar os projetos de reflorestamento. Os indicadores-chave utilizados para análise e metrificação da pesquisa foram comparados entre os cenários com e sem Gêmeos digitais. Os resultados mostraram melhorias significativas em eficiência e sustentabilidade com o uso de Gêmeos digitais: uma taxa de sobrevivência de 88,6% contra 72,7%, e um crescimento médio de 153 cm comparado a 139,3 cm no método tradicional. Além disso, a área reflorestada e os custos foram mais favoráveis com Gêmeos digitais, que também otimizaram o uso de água e fertilizantes. A tecnologia demonstrou ser promissora para a recuperação da cobertura vegetal e conservação da fauna, destacando-se como uma ferramenta estratégica na restauração da Mata Atlântica. Em resumo, a aplicação de gêmeos digitais nos projetos de reflorestamento da Mata Atlântica mostrou-se altamente eficaz, proporcionando não apenas melhorias significativas na taxa de sobrevivência e crescimento das mudas, mas também otimização de recursos e redução de custos. Esta tecnologia não só acelera a recuperação da vegetação nativa, mas também contribui para a conservação de espécies ameaçadas, posicionando-se como uma solução viável e estratégica para os desafios ambientais contemporâneos.

Palavras-chave—gêmeos digitais, reflorestamento, Mata Atlântica, restauração

restamento se apresenta como uma abordagem promissora para atender à crescente demanda por restauração de ecossistemas florestais.

O reflorestamento é essencial para mitigar mudanças climáticas, conservar a biodiversidade e recuperar serviços ecossistêmicos. Contudo, a implementação de programas de reflorestamento enfrenta desafios como a escolha adequada de espécies, otimização do uso da terra, monitoramento contínuo e avaliação do impacto ambiental. O uso de gêmeos digitais na modelagem de sistemas de reflorestamento pode fornecer soluções precisas e eficientes, permitindo simulações detalhadas, monitoramento em tempo real e análises preditivas para aumentar a eficácia das iniciativas de restauração florestal.

Este estudo investiga a aplicação dos gêmeos digitais (GDs) na otimização de projetos de reflorestamento da Mata Atlântica, um dos biomas mais biodiversos e ameaçados do planeta. Nesse contexto, os Gêmeos digitais traçarão um perfil digital dos históricos e comportamentos atuais do ambiente, otimizando o desempenho e fornecendo previsões sobre comportamentos futuros.

A introdução de gêmeos digitais no planejamento e execução de projetos de reflorestamento representa um avanço significativo na integração de tecnologias avançadas na conservação ambiental. Ao proporcionar uma plataforma interativa e baseada em dados, os gêmeos digitais podem transformar a abordagem da restauração florestal, promovendo práticas mais informadas e eficazes, essenciais para enfrentar os desafios ambientais do século XXI.

I. INTRODUÇÃO

O progresso tecnológico na modelagem digital tem possibilitado o desenvolvimento de soluções inovadoras para desafios ambientais complexos. Dentre essas inovações, destaca-se o conceito de gêmeos digitais, que consiste na criação de representações virtuais precisas de objetos, sistemas ou processos físicos. Esta tecnologia tem sido amplamente utilizada em diversas indústrias, como manufatura, saúde, energia e cidades inteligentes, oferecendo uma interface dinâmica e interativa que facilita a tomada de decisões baseada em dados. No contexto ambiental, a aplicação de gêmeos digitais ao reflo-

A. Objetivo Geral

Avaliar a eficácia da tecnologia de gêmeos digitais na otimização dos projetos de reflorestamento da Mata Atlântica.

B. Objetivos Específicos

- 1) Comparar a taxa de sobrevivência das mudas plantadas utilizando métodos tradicionais e a tecnologia de gêmeos digitais.
- 2) Analisar o crescimento médio anual das espécies de plantas utilizando ambas as abordagens.

- 3) Medir a área reflorestada e comparar a eficácia da cobertura vegetal obtida com e sem o uso de gêmeos digitais.
- 4) Avaliar os custos totais dos projetos de reflorestamento com e sem a aplicação da tecnologia de gêmeos digitais.
- 5) Examinar a eficiência no uso de recursos, especificamente água e fertilizantes, nos projetos de reflorestamento utilizando gêmeos digitais.
- 6) Investigar os impactos da tecnologia de gêmeos digitais na densidade de plantio e no desenvolvimento de espécies específicas de plantas e fauna da Mata Atlântica.
- 7) Avaliar a contribuição dos gêmeos digitais para a sustentabilidade econômica e ambiental dos projetos de reflorestamento

C. Hipótese

A aplicação da tecnologia de gêmeos digitais no planejamento e execução de projetos de reflorestamento na Mata Atlântica resultará em melhorias significativas na taxa de sobrevivência das mudas, no crescimento médio anual das espécies plantadas, na área reflorestada e na eficiência no uso de recursos, em comparação com os métodos tradicionais de reflorestamento.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A. A tecnologia dos gêmeos digitais

Gêmeos digitais podem ser descritos como perfis digitais que refletem os comportamentos passados e presentes de um objeto físico, com o objetivo de otimizar seu desempenho [1]. A verdadeira força dos gêmeos digitais (GDs) está na capacidade de criar, quase em tempo real, uma conexão entre os mundos físico e digital, permitindo a criação de modelos detalhados que produzem medições mais precisas da imprevisibilidade [1].

Os Gêmeos digitais não representam um modelo completo do gêmeo físico, mas consistem em um conjunto de artefatos de dados operacionais interligados e modelos de simulação com a granularidade apropriada para seu propósito, evoluindo ao longo do ciclo de vida do produto. Assim, o gêmeo digital não serve apenas como uma representação, mas também como uma ferramenta para prever o comportamento esperado do objeto. As diferentes partes dos modelos de simulação são ajustadas para seu propósito e evoluem desde os estágios iniciais de design, onde modelos mais simples são usados para determinar as características dos produtos, até o design detalhado, onde modelos de simulação mais avançados apoiam o dimensionamento e o design das partes [2].

B. Reflorestamento da Mata Atlântica

De acordo com a ONU, acabar com o desmatamento e restaurar ecossistemas são medidas essenciais para atingir a meta de limitar o aquecimento global a 1,5°C até o final do século 21. A Mata Atlântica, por exemplo, é um dos ecossistemas mais importantes para restauração no mundo. Segundo um estudo publicado na revista *Nature*, a restauração de 15% da

área da Mata Atlântica poderia evitar 60% das extinções de espécies previstas e sequestrar o equivalente a 30% do CO₂ emitido na atmosfera desde o início da Revolução Industrial. Diante desses benefícios, é crucial que o reflorestamento de áreas degradadas seja realizado de maneira eficiente [4].

O reflorestamento é o processo pelo qual árvores são replantadas em áreas de onde foram previamente removidas. Esse processo pode ser conduzido de várias formas, desde plantações de espécies exóticas de rápido crescimento até a tentativa de recriar a composição e estrutura da floresta original utilizando espécies nativas [3].

III. MÉTODO DE TRABALHO

O local do experimento foi realizado em uma propriedade de 607 hectares, no município de Natividade da Serra, no estado de São Paulo (23°22'32"S e 45°26'31"O). A região apresenta clima subtropical úmido, altitude que varia entre 720 e 810 m e precipitação média anual de 1500 mm.

Treinaram-se os gêmeos digitais com um grande volume de dados ambientais e ecológicos da Mata Atlântica, a partir da implementação de um algoritmo de Redes Neurais Convolucionais (CNNs) para processar e analisar imagens de satélite, assim como o método de Random Forest para as variáveis climáticas, tipos de solo e biodiversidade coletadas por sensores. Utilizou-se um cluster com 16 GPUs NVIDIA® TESLA V100 TENSOR CORE que realizaram o processamento paralelo durante 4 semanas de treinamento inicial, seguidas por 2 semanas de ajustes e validação para concluir o treinamento.

O modelo foi validado a partir do método do coeficiente de determinação R^2 calculado a partir da somatória das diferenças ao quadrado entre os valores observados e os valores previstos pelo modelo, chamada de soma dos quadrados dos resíduos (SSR) e da somatória das diferenças ao quadrado entre os valores observados e a média dos valores observados, denominada de soma total dos quadrados (SST). O R^2 do modelo resultou em 0.71, que já demonstra capacidade preditiva significativa.

$$R^2 = 1 - SSR/SST \quad (1)$$

O experimento foi dividido em 6 blocos de plantios, sendo 3 deles designados para os métodos tradicionais, os quais foram divididos em 20 linhas de semeadura espaçadas entre si de 1,5 m, com 60 berços em cada linha. Os outros 3 blocos consistiram na aplicação do modelo de gêmeos digitais, que realizou simulações e análises preditivas para otimizar o processo de plantio e crescimento das plantas, além de permitir a simulação de intervenções como a fertilização e seus impactos no sistema.

As mesmas espécies foram plantadas em densidades equivalentes para ambos os métodos, de forma a garantir a comparabilidade dos resultados. O monitoramento do desenvolvimento da região de teste foi realizado semestralmente por meio de medições in situ e análises de imagens de satélite ao longo dos 6 anos do estudo.

Tabela I
ESPÉCIES FLORESTAIS UTILIZADAS NA SEMEADURA DOS BLOCOS

Família Botânica	Espécies (nome científico e popular)	Data de Coleta
Fabaceae	<i>Paubrasilia echinata</i> (Pau-Brasil)	13/07/2018
Lecythidaceae	<i>Cariniana legalis</i> (Jequitibá-rosa)	02/02/2018
Arecaceae	<i>Euterpe edulis</i> (Palmito-juçara)	15/05/2018
Bignoniaceae	<i>Handroanthus albuse</i> (Ipê-amarelo)	21/05/2018
Melastomataceae	<i>Tibouchina mutabilis</i> (Manacá-da-serra)	30/12/2017

IV. RESULTADOS

Nesta seção, apresentamos os resultados do estudo sobre o uso de gêmeos digitais na projeção de reflorestamentos eficientes na Mata Atlântica. Para melhor compreendê-los, uma visão geral dos dados foi analisada, bem como a resposta específica de espécies para a abordagem com os gêmeos digitais. Nesse sentido, no intuito de compreender o impacto da nova abordagem, comparações com métodos tradicionais foram traçadas.

Foram analisadas tanto espécies de flora como de fauna características da região em questão, a Mata Atlântica. A análise incluiu as seguintes espécies de plantas: Pau-brasil (*Paubrasilia echinata*), Jequitibá-rosa (*Cariniana legalis*), Palmito-juçara (*Euterpe edulis*), Ipê-amarelo (*Handroanthus albuse*) e Manacá-da-serra (*Tibouchina mutabilis*). Para a fauna, o estudo foi direcionado para o Mico-leão-dourado (*Leontopithecus rosalia*), a Anta (*Tapirus terrestris*), e a Jacutinga (*Aburria jacutinga*).

Os dados a seguir demonstram como a aplicação de gêmeos digitais pode melhorar a eficiência e a sustentabilidade dos projetos de reflorestamento no bioma especificado.

A. Visão geral

De forma geral, exploramos indicadores cruciais para a avaliação da eficácia e eficiência dos projetos de restauração florestal. Dentre eles, estão: taxa de sobrevivência das mudas plantadas, crescimento médio das espécies, área reflorestada e custo total do projeto. Além disso, é apresentado uma relação da eficiência no uso de recursos, levando em consideração uso de água e o uso de fertilizantes no processo.

Os resultados obtidos a partir das médias das amostras mostram que o uso de gêmeos digitais resultou em uma taxa de sobrevivência das mudas de 88,6%, significativamente superior aos 72,7% observados no cenário sem essa tecnologia. Além disso, as espécies demonstraram um crescimento médio anual de 153 cm com gêmeos digitais, em comparação a 139,3 cm no cenário tradicional.

Quanto à área reflorestada, o cenário com gêmeos digitais abrangeu 109,7 hectares, enquanto no cenário sem essa tecnologia foram reflorestados 92,3 hectares. Em termos de custo, o projeto com gêmeos digitais teve um investimento total de

R\$ 228.300, comparado a R\$ 256.300 no cenário sem essa tecnologia.

Em síntese, ao analisar os dados é possível inferir que essas diferenças indicam uma melhora em diversos aspectos do reflorestamento. Dentre elas, cabe citar uma melhor adaptação e estabelecimento das espécies vegetais na área reflorestada quando gêmeos digitais são aplicados, bem como um aumento na taxa de crescimento, que reflete o potencial da tecnologia em acelerar a recuperação da cobertura vegetal na Mata Atlântica.

Ainda, uma maior eficiência na utilização dos recursos é evidenciada no novo planejamento de reflorestamento, e a redução de custos se mostra relacionada a um maior sucesso operacional, proporcionada pelos gêmeos digitais. A seguir, são apresentadas tabelas com os dados de cada amostra analisada no estudo, em que os processos de 1 a 3 são referentes a abordagem com gêmeos digitais, enquanto de 4 a 6 seguem a abordagem tradicional.

Tabela II
TAXA DE SOBREVIVÊNCIA DAS MUDAS NOS PROCESSOS DE REFLORESTAMENTO

Processo	Taxa de sobrevivência das mudas (%)
1	86
2	91
3	89
4	73
5	69
6	76

Tabela III
CRESCIMENTO MÉDIO ANUAL DAS MUDAS NOS PROCESSOS DE REFLORESTAMENTO

Processo	Crescimento médio anual (cm)
1	156
2	149
3	154
4	139
5	136
6	143

Tabela IV
ÁREA REFLORESTADA NOS PROCESSOS DE REFLORESTAMENTO

Processo	Área reflorestada (ha)
1	109
2	107
3	113
4	92
5	91
6	94

Tabela V
CUSTOS TOTAIS NOS PROCESSOS DE REFLORESTAMENTO

Processo	Custo total (R\$)
1	218.000
2	229.000
3	238.000
4	256.000
5	249.000
6	264.000

Somado aos dados apresentados, também o uso de quantidades mais adequadas de água e fertilizantes foi evidenciado, sendo visto na Tabela 6.

Tabela VI
GASTO DE RECURSOS EM CADA ABORDAGEM DE REFLORESTAMENTO

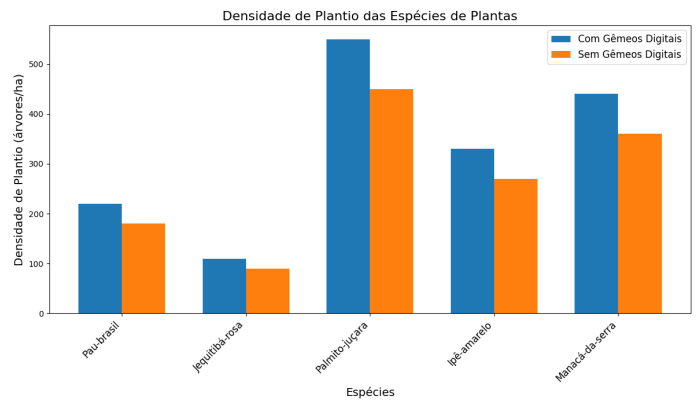
Abordagem	Uso de fertilizantes	Consumo de água
Com gêmeos digitais	121 kg/ha	149 m ³ /ha
Abordagem tradicional	174 kg/ha	240 m ³ /ha

Essas diferenças destacam não apenas a viabilidade técnica dos gêmeos digitais na aceleração da recuperação vegetal, mas também sua contribuição para a sustentabilidade econômica dos projetos de reflorestamento. Com um uso mais eficiente de recursos como água e fertilizantes, a tecnologia se mostra uma ferramenta promissora para enfrentar os desafios ambientais contemporâneos, consolidando-se como uma opção estratégica na restauração de ecossistemas delicados como a Mata Atlântica.

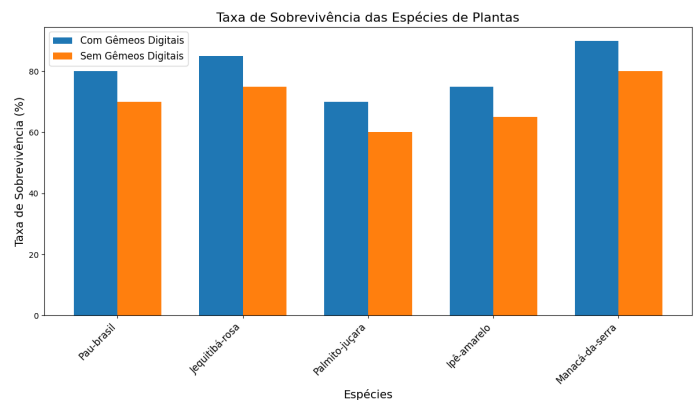
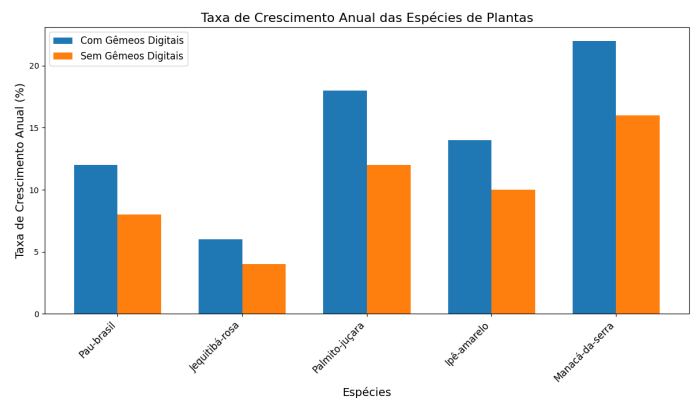
B. Visão específica

Para compreender de forma mais completa os impactos da tecnologia proposta, foram monitoradas e analisadas certas espécies características da região da Mata Atlântica. Nesse sentido, foi possível traçar gráficos que expressam de forma clara os dados promissores do estudo.

Em relação as espécies de plantas, o Pau-brasil, a Jequitibá-rosa, o Palmito-juçara, o Ipê-amarelo e a Manacá-da-serra, é possível observar no Gráfico 1 a densidade de plantio dessas espécies com e sem o uso de gêmeos digitais, destacando o aumento significativo na densidade com a aplicação da tecnologia. Por exemplo, o gráfico mostra que espécies como o Pau-brasil e o Palmito-juçara alcançaram densidades significativamente superiores quando gêmeos digitais foram utilizados, comparado ao cenário tradicional.

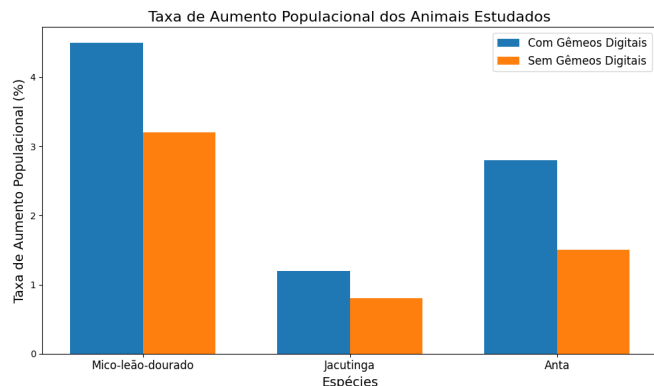


Em seguida, o Gráfico 2 e o Gráfico 3 revelam um aumento consistente no crescimento das mudas, indicando um benefício claro no desenvolvimento das plantas ao longo do tempo. Esse aumento na taxa de crescimento, juntamente com a taxa de sobrevivência, não apenas acelera a restauração da cobertura vegetal, mas também fortalece a resiliência das espécies frente às condições ambientais adversas.



Além dos aspectos vegetais, também analisando os impactos na fauna o estudo se mostrou igualmente promissor. De forma específica, o Gráfico 4 expõe um aumento importante na taxa

de aumento populacional anual do Mico-leão-dourado, da Anta e da Jacutinga, o que demonstra o potencial da abordagem não apenas para o restabelecimento de habitats, mas também para a conservação de espécies ameaçadas.



V. CONCLUSÃO

O estudo realizado em Natividade da Serra, São Paulo, demonstrou a eficácia dos gêmeos digitais na projeção e implementação de reflorestamentos eficientes na Mata Atlântica, mostrando resultados promissores na otimização dos processos de plantio e manejo florestal.

Em suma, ao analisar os dados, é possível inferir que as diferenças em relação aos métodos tradicionais indicam uma melhora em diversos aspectos do reflorestamento. Entre elas, destacam-se uma melhor adaptação e estabelecimento das espécies vegetais na área reflorestada com a aplicação dos gêmeos digitais, além de um aumento na taxa de crescimento, que reflete o potencial da tecnologia em acelerar a recuperação da cobertura vegetal na Mata Atlântica.

Ainda, uma maior eficiência na utilização dos recursos é evidenciada no novo planejamento de reflorestamento, e a redução de custos se mostra relacionada a um maior sucesso operacional proporcionado pelos gêmeos digitais. Essas diferenças destacam não apenas a viabilidade técnica dos gêmeos digitais na aceleração da recuperação vegetal, mas também sua contribuição para a sustentabilidade econômica dos projetos de reflorestamento. Com um uso mais eficiente de recursos como água e fertilizantes, a tecnologia se mostra uma ferramenta promissora para enfrentar os desafios ambientais contemporâneos, consolidando-se como uma opção estratégica na restauração de ecossistemas delicados como a Mata Atlântica.

Além dos benefícios diretos observados no crescimento e sobrevivência das mudas, a análise das espécies vegetais e animais indicou melhorias significativas na densidade de plantio e na taxa de crescimento anual. O impacto positivo na fauna local, como o aumento populacional do Mico-leão-dourado, da Anta e da Jacutinga, reforça o potencial desta abordagem para a conservação de espécies ameaçadas.

O trabalho possibilita a idealização de futuras pesquisas e aplicações, como trabalhos aplicados em outros biomas ou focados na restauração da fauna. A introdução dos gêmeos

digitais em novos contextos pode ampliar ainda mais a compreensão e o desenvolvimento de práticas sustentáveis e eficientes de reflorestamento e conservação ambiental. Dessa forma, este estudo não apenas contribui para a recuperação da Mata Atlântica, mas também estabelece um precedente valioso para iniciativas de restauração ecológica em escala global.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Parrott, "Industry 4.0 and the digital twin," Deloitte Insights, 2017.
- [2] B. Schleich, "Shaping the digital twin for design and production engineering," CIRP Annals, vol. 66, no. 1, pp. 141–144, 2017.
- [3] H. D. Le, "More than just trees: Assessing reforestation success in tropical developing countries," Journal of Rural Studies, 2011.
- [4] Relatório, C. (2022). *Aprendizados da restauração florestal na mata atlântica*. Disponível em: https://cms.sosma.org.br/wp-content/uploads/2022/04/SOSMA_Restauracao.pdf
- [5] Gazzola, M. D., Rovedder, A. P. M., Matiello, J., Schenato, R. B., Croda, J. P., Camargo, B., & Piaia, B. B.. (2023). Semeadura direta de espécies florestais para restauração ecológica na transição Pampa – Mata Atlântica. *Ciência Florestal*, 33(3), e68327.
- [6] Trentin, B. E., Estevan, D. A., Rossetto, E. F. S., Gorenstein, M. R., Brizola, G. P., & Bechara, F. C.. (2018). RESTAURAÇÃO FLORESTAL NA MATA ATLÂNTICA: PASSIVA, NUCLEAÇÃO E PLANTIO DE ALTA DIVERSIDADE. *Ciência Florestal*, 28(1), 160–174.