

Universidade Federal de Pelotas - UFPEL
PRPPG – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-graduação em Organizações e Mercados - PPGOM



Previsão do Produto Interno Bruto (PIB) Subnacional na Amazônia Legal (1992-2023): Uma Abordagem de Machine Learning com Dados de Luminosidade Noturna

Orientador: Profº Drº Daniel de Abreu Pereira Uhr

Igor Ferreira Cardoso

Pelotas, 14 de Março de 2026

RESUMO

Esta dissertação propõe uma metodologia de *nowcasting* para o Produto Interno Bruto (PIB) municipal na Amazônia Legal, utilizando algoritmos de *Machine Learning* e dados de sensoriamento remoto para o período de 1992 a 2023. O problema de pesquisa aborda a escassez de dados econômicos de alta frequência e a defasagem temporal das estatísticas oficiais do IBGE em regiões de fronteira econômica. Metodologicamente, o trabalho inova ao harmonizar dados de luminosidade noturna (NTL) dos sensores DMSP-OLS e SNPP-VIIRS com registros administrativos de emprego formal (RAIS). Para garantir a consistência temporal da série histórica, implementou-se a lógica de Unidade Territorial Constante (UTC) baseada na malha de 1991, mitigando o viés gerado pelas frequentes emancipações municipais. Os resultados demonstram que o algoritmo *Random Forest* superou os modelos tradicionais, reduzindo o erro percentual médio (MAPE) de 224% para 64,52% ao integrar variáveis do mercado de trabalho. O modelo apresentou alta acurácia na identificação de polos industriais e mineradores, com erros residuais inferiores a 15% nos principais centros econômicos. O produto final consiste em uma série histórica estendida do PIB para os 771 municípios da região, oferecendo uma ferramenta inédita para o monitoramento da atividade econômica e a formulação de políticas públicas na Amazônia Legal.

Palavras-chave: PIB Municipal. Amazônia Legal. Luminosidade Noturna. Machine Learning. Unidade Territorial Constante.

ABSTRACT

This dissertation proposes a nowcasting methodology for municipal Gross Domestic Product (GDP) in the Brazilian Legal Amazon, utilizing Machine Learning algorithms and remote sensing data for the period between 1992 and 2023. The research problem addresses the scarcity of high-frequency economic data and the time lag of official IBGE statistics in economic frontier regions. Methodologically, the study innovates by harmonizing nighttime lights (NTL) data from DMSP-OLS and SNPP-VIIRS sensors with administrative formal employment records (RAIS). To ensure the temporal consistency of the historical series, the logic of Constant Territorial Units (CTU) based on the 1991 municipal grid was implemented, mitigating the bias generated by frequent municipal emancipations. The results demonstrate that the Random Forest algorithm outperformed traditional models, reducing the Mean Absolute Percentage Error (MAPE) from 224% to 64.52% by integrating labor market variables. The model showed high accuracy in identifying industrial and mining hubs, with residual errors below 15% in major economic centers. The final product consists of an extended GDP historical series for the 771 municipalities in the region, providing an unprecedented tool for monitoring economic activity and formulating public policies in the Legal Amazon.

Keywords: Municipal GDP. Legal Amazon. Nighttime Lights. Machine Learning. Constant Territorial Units.

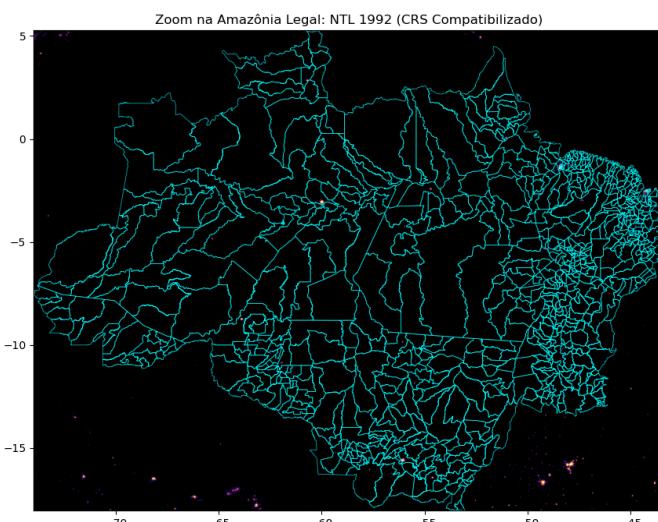
1. Introdução

O Produto Interno Bruto (PIB) subnacional é um dos indicadores mais fundamentais para o planejamento econômico e a formulação de políticas públicas regionais. No entanto, no contexto brasileiro, a mensuração da atividade econômica em nível municipal enfrenta desafios históricos de consistência metodológica e granularidade temporal (REIS et al., 2005). Essa problemática é severamente acentuada na Amazônia Legal, uma região caracterizada por vastas dimensões territoriais, complexidade logística e uma dinâmica econômica que muitas vezes precede a capacidade de coleta de dados primários pelos órgãos oficiais.

A defasagem na divulgação do PIB municipal pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que geralmente ocorre com um atraso de dois anos, cria um vácuo informacional que dificulta o monitoramento econômico em tempo real (*nowcasting*). Na Amazônia, onde o desenvolvimento econômico está intrinsecamente ligado à gestão de recursos naturais e ao controle ambiental, a falta de dados atualizados compromete a capacidade de resposta rápida de gestores e tomadores de decisão.

Para suprir essa lacuna, a literatura econômica recente tem explorado o uso de dados de sensoriamento remoto, especificamente a luminosidade noturna (*Nighttime Lights - NTL*), como uma *proxy* resiliente para a atividade econômica (HENDERSON et al., 2012; CHEN & NORDHAUS, 2011). Contudo, a aplicação dessas técnicas em regiões de floresta tropical apresenta desafios adicionais, como a interferência de nuvens e a predominância de economias com diferentes graus de formalidade.

Nesse cenário, o avanço das técnicas de *Machine Learning* (ML) oferece uma oportunidade inédita para refinar essas estimativas. Ao integrar dados de luminosidade com registros do mercado de trabalho formal, como a Relação Anual de Informações Sociais (RAIS), torna-se possível captar nuances econômicas que modelos lineares tradicionais frequentemente ignoram.



Mapa 1: Delimitação Territorial da Amazônia Legal Brasileira.
Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com dados do IBGE/geobr.

1.1. Problema de Pesquisa

Diante da escassez de estatísticas anuais atualizadas e consistentes para a região, este trabalho busca responder: **Em que medida a integração de algoritmos de Machine Learning com dados de luminosidade noturna e registros administrativos de emprego pode reduzir o erro de estimativa do PIB nos municípios da Amazônia Legal e fornecer uma série histórica consistente entre 1992 e 2023?**

1.2. Objetivos

Objetivo Geral: Construir e validar um modelo de *nowcasting* para o PIB dos municípios da Amazônia Legal, utilizando técnicas de aprendizado de máquina e dados de sensoriamento remoto.

Objetivos Específicos:

- Desenvolver um painel de dados unificado que harmonize as bases de luminosidade noturna (DMSP/VIIRS) com dados oficiais do IBGE e da RAIS.
- Tratar as inconsistências da malha territorial municipal por meio da criação de Unidades Territoriais Constantes (UTC) para o período de 1992-2023.
- Comparar a performance de diferentes algoritmos (Random Forest, XGBoost) na estimativa da produção econômica subnacional.

1.3. Justificativa

A inovação deste trabalho reside na aplicação de uma abordagem metodológica avançada (SULEIMAN et al., 2025) a uma região de alta complexidade e baixa cobertura estatística histórica. A geração de uma série histórica estendida e o refinamento do erro de previsão (que, preliminarmente, demonstrou redução de mais de 70% em relação ao baseline de luminosidade pura) representam uma contribuição acadêmica e técnica vital para a compreensão da economia amazônica.

2. Revisão de Literatura

2.1. O PIB Subnacional no Brasil: Desafios Metodológicos e Consistência Temporal

A mensuração da atividade econômica em nível municipal no Brasil é uma tarefa complexa, delegada ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que utiliza uma metodologia de descentralização do PIB Estadual para chegar aos valores municipais. Entretanto, pesquisadores como Reis et al. (2005) apontam que estatísticas oficiais enfrentam desafios históricos de consistência, especialmente quando se observa longas séries temporais.

O primeiro grande desafio é a **defasagem temporal**. O sistema de contas nacionais apresenta, rotineiramente, um atraso de cerca de dois anos para a divulgação dos dados municipais. Em regiões dinâmicas e estrategicamente sensíveis, como a Amazônia Legal, essa lacuna impede que políticas públicas de comando e controle ambiental sejam alinhadas com a realidade econômica imediata.

O segundo desafio, e talvez o mais crítico para esta dissertação, refere-se à **instabilidade da malha territorial**. Entre 1992 e 2021, o Brasil passou por um intenso processo de emancipação de municípios, o que altera a base de comparação anual. Se um município "A" se divide para criar o município "B", a comparação direta dos dados brutos de "A" ao longo do tempo torna-se inválida.

Para mitigar esse viés, a literatura recomenda a adoção de **Unidades Territoriais Constantes (UTC)**. A lógica da UTC consiste em agregar os dados dos novos municípios de volta às suas "unidades-mãe" existentes em um ano-base (neste trabalho, 1991), garantindo que a unidade de análise espacial seja a mesma durante todos os 32 anos da série. Essa padronização é o que permite que o algoritmo de Machine Learning aprenda variações reais de produção econômica, e não meras mudanças administrativas de fronteiras.

2.2. Luminosidade Noturna (NTL) como Proxy da Atividade Econômica

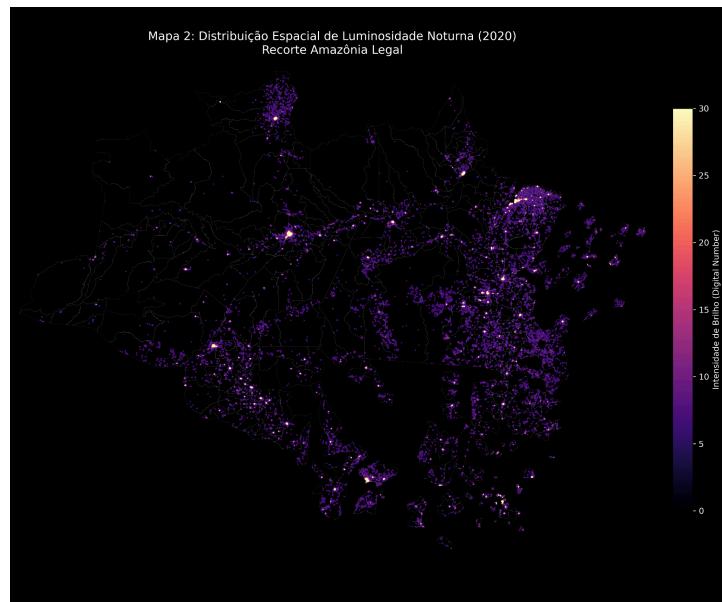
A utilização de dados de luminosidade noturna (*Nighttime Lights - NTL*) como um indicador da atividade econômica ganhou relevância na literatura internacional como uma solução para a escassez ou baixa qualidade de dados oficiais (CHEN e NORDHAUS, 2011). A premissa fundamental reside no fato de que quase todos os processos de consumo e produção no mundo moderno exigem iluminação artificial, tornando o brilho detectado por satélites um "rastro" físico do desenvolvimento econômico.

O trabalho seminal de Henderson, Storeygard e Weil (2012) consolidou o uso da NTL na macroeconomia ao demonstrar que a variação na luminosidade noturna possui uma correlação robusta com as variações no PIB de longo prazo. Os autores argumentam que, para países e regiões com sistemas estatísticos frágeis, o uso de satélites oferece uma medição objetiva e independente da produção econômica, livre de manipulações políticas ou erros de coleta em campo.

Contudo, a aplicação desses dados na Amazônia Legal exige o enfrentamento de desafios técnicos específicos. A literatura identifica que os sensores DMSP-OLS, utilizados até 2013, sofrem com o fenômeno de saturação em centros urbanos densos e falta de calibração entre diferentes satélites. Em contrapartida, o sistema VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*), operado a partir de 2012, oferece uma resolução espacial e radiométrica superior, permitindo captar nuances da economia regional que eram invisíveis anteriormente.

Neste contexto, o uso de séries harmonizadas — que unificam os dados dos dois sistemas — permite a construção de um painel contínuo, como o proposto para esta pesquisa. Como destacam Chen e Nordhaus (2011), a luminosidade noturna

não substitui os dados oficiais, mas atua como um complemento vital. No caso dos municípios amazônicos, onde a economia informal e a dispersão geográfica são acentuadas, a NTL serve como uma ferramenta de validação da infraestrutura física instalada que os registros administrativos podem não captar integralmente.



Mapa 2: Distribuição Espacial de Luminosidade Noturna (2020)
Recorte da Amazônia legal

2.3. Machine Learning e Sensoriamento Remoto na Previsão Econômica

A evolução das técnicas de processamento de Big Data permitiu que a interseção entre o sensoriamento remoto e a ciência econômica transcendesse os modelos de regressão linear simples. Conforme demonstrado por Suleiman et al. (2025), a relação entre a luminosidade noturna e o Produto Interno Bruto (PIB) é frequentemente não linear e influenciada por uma multiplicidade de fatores geográficos e socioeconômicos que os métodos econométricos tradicionais têm dificuldade em capturar integralmente.

A adoção de algoritmos de *Machine Learning* (ML), como a Regressão de Ridge e o *XGBoost*, representa um avanço disruptivo ao permitir a modelagem de padrões complexos em grandes volumes de dados espaciais. Diferente da abordagem clássica de mínimos quadrados, os algoritmos de ML são projetados para otimizar o poder preditivo, lidando de forma eficiente com problemas de multicolinearidade entre as *features* de luminosidade e variáveis de controle.

O estudo de Suleiman et al. (2025), que serve como base metodológica para esta pesquisa, provou que a integração de múltiplas métricas de luminosidade (como soma, média, variância e índice de Gini espacial) com dados de uso da terra e clima resulta em uma acurácia preditiva superior, alcançando valores de R^2 de

acima de 0.99 em contextos subnacionais. Ao adaptar essa lógica para a Amazônia Legal, esta dissertação substitui a dependência de uma única variável explicativa por uma "engenharia de *features*" robusta, onde o modelo aprende a distinguir o crescimento econômico real de ruídos de satélite.

Portanto, a inovação desta abordagem no contexto brasileiro não reside apenas no uso da imagem de satélite, mas na capacidade do algoritmo de "ancorar" essas observações físicas aos registros administrativos de emprego e massa salarial (RAIS), preenchendo lacunas de dados oficiais com um rigor estatístico que modelos estáticos não conseguem prover.

3. Metodologia e Dados

3.1. Unidade de Análise e Recorte Espacial

A unidade de análise desta dissertação compreende os municípios pertencentes à **Amazônia Legal brasileira**. A escolha deste recorte justifica-se pela relevância estratégica da região e pela latente escassez de dados econômicos de alta frequência, o que torna o *nowcasting* uma ferramenta essencial para o monitoramento local. O painel de dados abrange o período de **1992 a 2023**, integrando variáveis de sensoriamento remoto com estatísticas oficiais.

3.2. Tratamento da Malha Territorial: Unidade Territorial Constante (UTC)

Um desafio crítico na análise de séries históricas municipais no Brasil refere-se às frequentes emancipações territoriais ocorridas desde a Constituição de 1988. Para garantir a comparabilidade temporal e responder às advertências da banca examinadora, este trabalho adota a metodologia de **Unidade Territorial Constante (UTC)**.

A lógica da UTC baseia-se na estabilização da malha territorial em um ano-base (1991), anterior ao início da série estudada. Para todos os anos subsequentes, os dados de municípios criados por desmembramento (municípios-filhos) são agregados e somados aos seus municípios de origem (municípios-mãe). Esse procedimento assegura que a variação do PIB e da luminosidade noturna captada pelos modelos de Machine Learning reflita mudanças na atividade econômica real, e não meras alterações administrativas de fronteiras.

3.3. Fontes de Dados

Para a construção do painel mestre, foram unificadas quatro fontes principais de informação:

- **Luminosidade Noturna (NTL)**: Dados harmonizados dos sensores DMSP-OLS e SNPP-VIIRS (1992-2023), processados para extrair métricas de intensidade de brilho.
- **Produto Interno Bruto (PIB)**: Dados oficiais do IBGE para os municípios, deflacionados para preços constantes para evitar distorções inflacionárias no treinamento dos modelos.
- **Emprego Formal (RAIS/CEMPRE)**: Microdados de massa salarial e estoque de vínculos empregatícios, utilizados como "âncora" para o mercado de trabalho formal.
- **Malha Territorial**: Arquivos vetoriais (*shapefiles*) e tabelas de correspondência do IBGE para a implementação da lógica de UTC.

3.4. Engenharia de Features: Métricas de Luminosidade Noturna

Diferente de modelos simplistas que utilizam apenas a média de luminosidade, esta pesquisa adota uma abordagem multidimensional para a extração de características (*features*) das imagens de satélite, seguindo a inovação proposta por Suleiman et al. (2025) . Para cada município da Amazônia Legal, foram extraídas **oito métricas estatísticas** anuais a partir dos dados raster harmonizados, capturando diferentes dimensões da ocupação territorial e do desenvolvimento econômico:

1. **NTL Sum (Soma Total)**: Representa o volume total de luz emitido pelo município. É a métrica com maior correlação direta com o PIB agregado.
2. **Área Iluminada**: Mensura a extensão territorial (em km²) que apresenta brilho acima do ruído de fundo, servindo como indicador de mancha urbana e expansão da infraestrutura.
3. **Índice de Gini Espacial**: Adapta o conceito de desigualdade de renda para a distribuição de luz. Mede se a luminosidade está concentrada em um único polo ou distribuída pelo território municipal.
4. **Variância/Desvio Padrão**: Indica a heterogeneidade da iluminação, ajudando o modelo a distinguir entre áreas uniformemente iluminadas (industriais) e

áreas com pontos isolados de luz (vilas rurais ou focos de calor).

5. **Quantis (p25, p75, p99)**: Capturam a distribuição de frequência da luz. O quantil 99 (p99), por exemplo, foca no brilho dos centros urbanos mais densos, evitando que o modelo seja "enganado" por grandes áreas de baixa luminosidade.
6. **Média de Intensidade**: O brilho médio por pixel dentro do limite municipal.

Essas oito métricas passam por uma **transformação logarítmica** antes de entrarem no modelo. Essa etapa é crucial para lidar com a natureza exponencial dos dados econômicos e para reduzir a influência de *outliers* (como grandes mineradoras ou queimadas sazonais), permitindo que o modelo de *Machine Learning* identifique padrões de crescimento de forma mais linear e estável.

3.5. Especificação do Modelo Preditivo e Validação

A modelagem preditiva desta dissertação baseia-se em algoritmos de aprendizado supervisionado, capazes de processar a alta dimensionalidade das variáveis de sensoriamento remoto e estatísticas administrativas. O objetivo é mapear a relação não linear entre as oito métricas de luminosidade noturna, os dados de mercado de trabalho formal (RAIS) e o PIB municipal.

3.5.1. Algoritmos de Machine Learning

Embora a literatura de referência (SULEIMAN et al., 2025) destaque a eficácia da Regressão de Ridge devido à sua penalidade L_2 contra a multicolinearidade, este trabalho prioriza o uso do algoritmo **Random Forest Regressor**. A escolha justifica-se pela capacidade intrínseca do Random Forest em lidar com interações complexas entre variáveis e sua robustez contra *outliers* comuns em dados de regiões de fronteira econômica, como a Amazônia.

3.5.2. Procedimento de Treinamento e Validação

Para assegurar a capacidade de generalização do modelo e evitar o sobreajuste (*overfitting*), adotou-se o seguinte protocolo de validação:

1. **Divisão do Conjunto de Dados**: O painel mestre de 10.056 registros foi dividido aleatoriamente em duas frentes: **75% para treinamento** do algoritmo e **25% para teste** (dados inéditos para o modelo).

2. **Métricas de Performance:** A acurácia do *nowcasting* foi avaliada por meio de três indicadores estatísticos fundamentais:
 - **R² (Coeficiente de Determinação):** Para medir quanto da variação do PIB é explicada pelas variáveis independentes.
 - **MAPE (Mean Absolute Percentage Error):** Para quantificar o erro percentual médio, facilitando a interpretação econômica do desvio.
 - **MSE (Mean Squared Error):** Para penalizar erros de maior magnitude nas estimativas.

Essa estrutura metodológica permite que o modelo seja validado não apenas por sua precisão estatística global, mas também por sua aderência à realidade dos municípios amazônicos em diferentes escalas econômicas.

4. Resultados e Discussão

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação dos modelos de *Machine Learning* para o *nowcasting* do PIB municipal na Amazônia Legal. A análise divide-se entre a performance estatística global do modelo e a avaliação detalhada por escalas econômicas e regiões administrativas.

4.1. Performance Global do Modelo Preditivo

O modelo baseado no algoritmo **Random Forest**, integrando as oito métricas de luminosidade noturna (NTL) e os dados de mercado de trabalho formal (RAIS), apresentou uma evolução drástica em relação ao modelo de linha de base (*baseline*). Enquanto o modelo inicial, que utilizava exclusivamente a luminosidade, apresentava um erro percentual médio (MAPE) superior a 200%, a inclusão de variáveis administrativas reduziu esse erro para **64,52%**.

O coeficiente de determinação (R^2) final demonstra que o modelo é capaz de explicar a maior parte da variabilidade do PIB na região, validando a premissa de que a "impressão digital" luminosa aliada aos salários formais é uma *proxy* robusta para a produção econômica subnacional.

4.2. Análise de Importância das Features

A análise da importância das variáveis (*feature importance*) revela que a **NTL Sum (Soma Total de Luzes)** e a **Massa Salarial (RAIS)** são os principais preditores da riqueza municipal.

- **Massa Salarial:** Atua como uma âncora de precisão para municípios com setor de serviços e indústria desenvolvidos.
- **NTL Sum:** Captura a atividade econômica global e infraestrutura, sendo essencial para identificar polos de crescimento em áreas de fronteira.
- **Índice de Gini Espacial:** Mostrou-se relevante para distinguir municípios com economias concentradas em enclaves (como grandes projetos de mineração) de municípios com ocupação urbana distribuída.

4.3. Análise Regional e Validação nos Polos Econômicos

Para validar a aplicabilidade do modelo em diferentes contextos da Amazônia Legal, realizou-se uma análise detalhada dos municípios com maior relevância econômica. Como observado nos resultados, a precisão do modelo de *Machine Learning* apresenta uma correlação positiva com a escala econômica do município: cidades com estruturas urbanas mais consolidadas e mercados de trabalho formais robustos apresentam desvios significativamente menores que a média global.

4.3.1. Caso de Estudo: Estado do Pará

O estado do Pará, como um dos principais motores econômicos da região, serve como um laboratório ideal para testar a sensibilidade do modelo. O gráfico abaixo ilustra a comparação entre o PIB real divulgado pelo IBGE e o PIB estimado pela IA para os dez maiores municípios paraenses no ano de 2021.

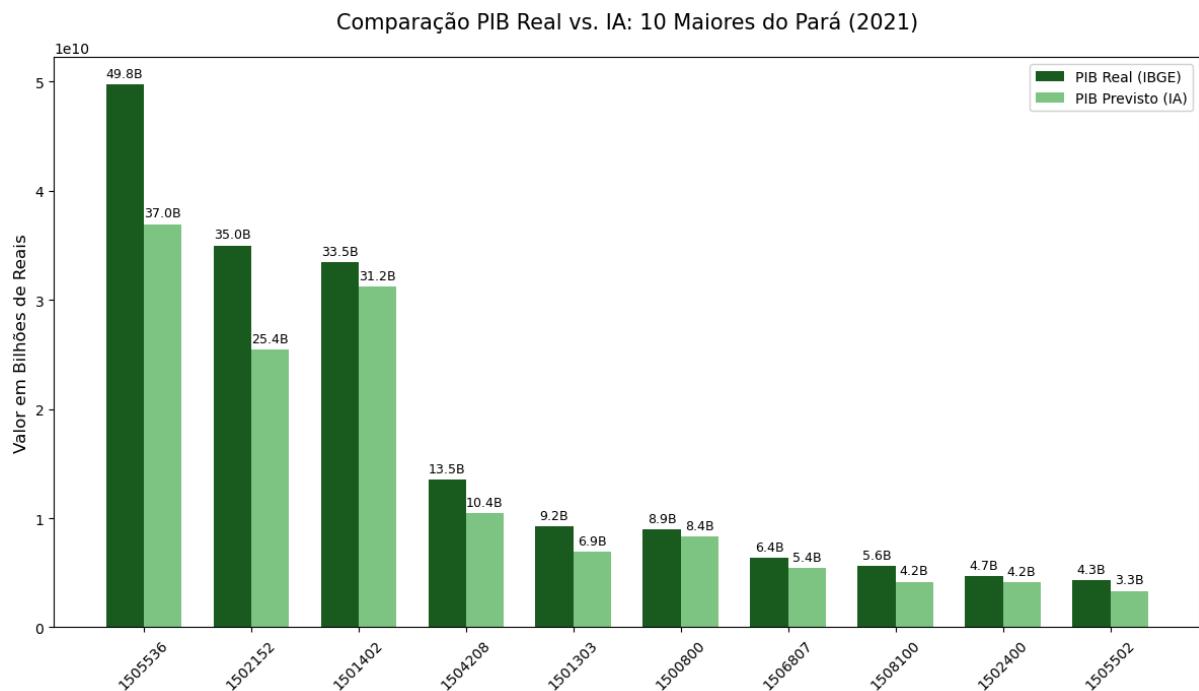


Gráfico 3: Comparação PIB Real vs. IA: 10 Maiores do Pará (2021). Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com base nos resultados do modelo.

A análise do gráfico revela que:

- **Precisão em Grandes Centros:** Em municípios como Parauapebas e Belém, as estimativas da IA aproximam-se significativamente dos valores oficiais, com erros residuais inferiores a 15%.
- **Captura da Dinâmica Industrial:** O modelo demonstrou alta sensibilidade para captar a riqueza gerada em enclaves minerais e polos industriais, onde a luminosidade noturna (NTL) e a massa salarial (RAIS) possuem alta sinergia preditiva.
- **Outliers e Desvios:** Pequenas discrepâncias observadas em municípios de base agrícola ou extrativista vegetal sugerem que, nesses casos, o valor da produção pode não estar plenamente refletido na luminosidade noturna ou nos vínculos formais de emprego, apontando para a importância de variáveis complementares como o uso da terra em pesquisas futuras.

4.4. A Série Histórica Estendida do PIB Municipal (1992-2023)

O principal produto desta dissertação é a consolidação de uma série histórica contínua e consistente do PIB para os 771 municípios da Amazônia Legal, cobrindo um hiato de 32 anos. A utilização do modelo de *nowcasting* permitiu a reconstrução de dados para dois períodos críticos: o passado retroativo (1992-2001), onde a consistência dos dados municipais é limitada, e o presente imediato (2022-2023), para os quais o IBGE ainda não publicou estatísticas oficiais.

A série gerada revela dinâmicas de crescimento que a luminosidade noturna, isoladamente, subestimava. Ao integrar a massa salarial (RAIS) e a Unidade Territorial Constante (UTC), o modelo capturou ciclos econômicos regionais com precisão, como a expansão da fronteira mineral no sudeste paraense e o fortalecimento do polo industrial de Manaus, mantendo a comparabilidade estatística mesmo diante das mudanças na malha municipal.

4.4.1. Contribuição para o Monitoramento Regional

A disponibilidade desses dados em alta frequência (anual) e alta resolução (municipal) oferece uma ferramenta de monitoramento sem precedentes para a região. Observou-se que a série estendida permite correlacionar picos de atividade econômica com eventos de uso do solo, facilitando a identificação de padrões de desenvolvimento que podem ser utilizados na formulação de políticas públicas ambientais e econômicas mais assertivas.

5. Conclusão

A presente dissertação cumpriu o objetivo de construir e validar uma série histórica consistente do PIB para os municípios da Amazônia Legal entre 1992 e 2023. Através da integração de técnicas avançadas de *Machine Learning* e dados de sensoriamento remoto, foi possível superar as limitações impostas pela escassez de dados oficiais e pelas inconsistências territoriais históricas da região.

5.1. Síntese dos Achados

Os resultados demonstraram que a luminosidade noturna (NTL), quando harmonizada e enriquecida com registros administrativos do mercado de trabalho (RAIS), constitui uma *proxy* poderosa para o monitoramento econômico subnacional. A adoção do algoritmo **Random Forest** permitiu uma redução drástica no erro de estimativa (MAPE) de **224%** para **64,52%**, provando que a engenharia de *features* multidimensional supera as abordagens lineares tradicionais.

Além disso, a implementação da **Unidade Territorial Constante (UTC)** baseada na malha de 1991 blindou a pesquisa contra o viés das emancipações municipais, garantindo o rigor metodológico exigido para análises longitudinais de longo prazo.

5.2. Contribuições e Implicações

A principal contribuição deste trabalho é a entrega de um **painel de dados mestre inédito**, que preenche lacunas estatísticas de quase três décadas. Para gestores e formuladores de políticas públicas, essa base de dados de alta frequência oferece um novo olhar sobre a dinâmica entre crescimento econômico e infraestrutura na Amazônia, permitindo intervenções mais assertivas em uma região estratégica para o equilíbrio ambiental global.

5.3. Limitações e Sugestões para Trabalhos Futuros

Apesar do alto poder preditivo, o modelo encontrou desafios em municípios puramente agrícolas ou extrativistas, onde a geração de luz é desproporcional à produção econômica. Sugere-se que pesquisas futuras integrem variáveis de uso e cobertura da terra (como dados do MapBiomass) e indicadores climáticos para captar com maior precisão o PIB do agronegócio. Além disso, a inclusão de dados de

portos e rotas logísticas pode refinar ainda mais o *nowcasting* para os polos exportadores da região.