

# PROJETO PANOPTES

Monitoramento das Operações de Crédito Rural e Proagro  
por Meio de Geotecnologias e Inteligência Artificial

---

*Relatório Técnico para Submissão ao 8º Prêmio MapBiomias*  
*Categoria: Destaque Aplicações em Políticas Públicas*

Grupo de Pesquisa em Geotecnologias e Inteligência Geográfica  
Aplicadas ao Controle Governamental  
Instituto Serzedello Corrêa — Tribunal de Contas da União

## **Parte I — Da Concepção às Provas de Conceito**

*Março de 2026*

# 1. Introdução — O Problema e a Resposta

Em 16 de outubro de 1985, o jornal *O Estado de São Paulo* publicava, na seção Ciência, matéria intitulada “Banco do Brasil vai ter satélite-espião”<sup>1</sup>. A notícia celebrava os resultados positivos de provas de conceito desenvolvidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), contratado pelo Banco do Brasil com apoio da Agência Espacial Americana (NASA), para detectar, por sensoriamento remoto, fraudes nas operações de crédito rural e no Programa de Garantia da Atividade Agropecuária (Proagro). Os testes comprovaram a viabilidade técnica. A expansão das ferramentas parecia inevitável.

Contrariando todas as expectativas, os 42 anos seguintes apresentaram quadro injustificável de crescente descompasso entre as potencialidades tecnológicas disponíveis a baixo custo e sua efetiva utilização pelos órgãos responsáveis pela fiscalização do crédito rural. Nesse intervalo, a tecnologia evoluiu de forma exponencial — satélites como Landsat, Sentinel-2 e CBERS passaram a oferecer imagens gratuitas com resolução temporal e espacial crescentes; cubos de dados como o Brazil Data Cube do INPE tornaram acessíveis séries temporais de décadas; e o projeto MapBiomas reconstituiu, com inteligência artificial e processamento em nuvem, três décadas de mapas de uso e cobertura da terra para todo o território brasileiro — mas as instituições responsáveis pela fiscalização permaneceram, em grande medida, operando com métodos manuais, amostrais e de baixa cobertura.

A magnitude do problema é proporcional à escala dos recursos envolvidos. O Estado brasileiro destina anualmente centenas de bilhões de reais ao crédito rural: os Planos Safra 2024/2025 somados disponibilizaram R\$ 475,5 bilhões, e para 2025/2026 estão previstos R\$ 605,2 bilhões<sup>2</sup>. São realizadas cerca de 2 milhões de operações anuais, dispersas geograficamente por todo o território nacional, muitas vezes em locais remotos. Os objetos financiados são, em grande parte, efêmeros: o período entre plantio e colheita das principais culturas varia de 90 a 150 dias. Há incentivos financeiros para utilização do recurso subsidiado em áreas diversas das contratadas. De 2022 a 2024, apenas o Proagro gerou déficit acumulado superior a R\$ 10 bilhões para o Tesouro Nacional<sup>3</sup>. Para que os controles sejam efetivos, esse contexto requer automação do monitoramento em escala nacional.

Foi nesse cenário que o Grupo de Pesquisa em Geotecnologias e Inteligência Geográfica Aplicadas ao Controle Governamental<sup>4</sup>, do Instituto Serzedello Corrêa (ISC), escola superior do Tribunal de Contas da União (TCU), concebeu, em 2023, o **Projeto Panoptes**<sup>56</sup>. O nome é uma referência a Argos Panoptes, gigante da mitologia grega cujo corpo era coberto por olhos, conferindo-lhe a capacidade de tudo ver. O projeto objetiva fomentar no Estado brasileiro o monitoramento automático das operações de crédito e de seguro rural por meio de imagens satelitais associadas a técnicas de inteligência artificial (IA), atuando em dupla frente: (i) adaptar

---

<sup>1</sup>GODOY, Joel de. Banco do Brasil vai ter satélite-espião. *O Estado de São Paulo*, 16 de outubro de 1985, seção Ciência.

<sup>2</sup>Para o ano agrícola 2024/2025, os Planos Safra somados colocaram à disposição R\$ 475,5 bilhões. Para 2025/2026, estão previstos R\$ 605,2 bilhões.

<sup>3</sup>Acórdão 2.493/2024-TCU-Plenário. Auditoria operacional sobre Proagro e Zarc. Relator: Ministro Vital do Rêgo, Sessão de 27/11/2024.

<sup>4</sup>Grupo de Pesquisa em Geotecnologias e Inteligência Geográfica Aplicadas ao Controle Governamental. Coordenado pela Diretoria de Altos Estudos e Cooperação Institucional, do Instituto Serzedello Corrêa, e vinculado ao Programa de Pós-Graduação e Pesquisa.

<sup>5</sup>Argos Panoptes, na mitologia grega, era um gigante cujo corpo era coberto por olhos e que, portanto, possuía a capacidade de tudo ver.

<sup>6</sup>Lançado pelo Plan Operativo Anual del Comité de Creación de Capacidades (POA CCC) da Organización Latinoamericana y del Caribe de Entidades Fiscalizadoras Superiores (Olacefs).

tecnologias existentes ao contexto do crédito rural brasileiro; e (ii) desenvolver capacidades institucionais em larga escala.

O Panoptes foi duplamente premiado<sup>7</sup> — o Prêmio Reconhe-Ser 2025 do TCU (comitê técnico e voto dos demais auditores) —, teve seus resultados publicados na Revista do TCU (nº 155, jan–jun/2025), e as tecnologias e metodologias desenvolvidas em seu âmbito foram aplicadas na primeira auditoria governamental brasileira a utilizar sistematicamente dados do MapBiomas para controle do crédito rural em escala nacional<sup>8</sup>. Este relatório técnico apresenta a concepção, a infraestrutura tecnológica, as provas de conceito e os resultados do projeto.

---

<sup>7</sup>Prêmio Reconhe-Ser 2025, do Tribunal de Contas da União, e prêmio do Projeto Regional Anticorrupção OLACEFS-GIZ.

<sup>8</sup>O relatório de auditoria (Fiscalização 1460/2025) foi finalizado pela AudSustentabilidade e encontra-se, na data desta submissão, em fase de instrução processual, aguardando deliberação do Plenário do TCU para conversão em acórdão, nos termos do art. 10 da Lei nº 8.443/1992 e dos arts. 1º, inciso II, e 15 da Resolução-TCU nº 315/2020.

## 2. Arquitetura Institucional do Projeto Panoptes

O Panoptes foi incubado pelo Grupo de Pesquisa em Geotecnologias do ISC/TCU e vem sendo apoiado por recursos de cooperação internacional<sup>9</sup>. O projeto integra uma trajetória mais ampla: desde 2016, com a liderança do TCU, a Organização Latino-Americana e do Caribe de Entidades Fiscalizadoras Superiores (OLACEFS) e a Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) fomentam o uso de geotecnologias por meio da capacitação intitulada *Open Geo Hub*, objetivando a formação de uma comunidade regional de especialistas. A partir desse ecossistema foram desenvolvidos diversos projetos exitosos, dentre eles o Panoptes.

### 2.1. Fases do Projeto

O Panoptes está organizado em três fases:

**Fase 1 (outubro/2023 – novembro/2024):** Desenvolvimento do processo geral para automação do monitoramento. Quatro pesquisadores do INPE (Gilberto Queiroz, Karine Ferreira, Marcos Adami e Thales Körting) desenvolveram a “espinha dorsal” metodológica<sup>10</sup>, integrando serviços do INPE<sup>11</sup> aos microdados do Sicor. Foram ofertadas 83 horas de capacitação, 101 horas de encontros técnicos gravados, além de 56 horas de transferência de conhecimento. Quatro provas de conceito foram realizadas. Orçamento: US\$ 34 mil (OLACEFS + TCU).

**Fase 2 (2025–2026):** Mapeamento dos riscos do crédito rural e do Proagro, com foco nos riscos que podem ser monitorados automaticamente por geotecnologias. Inclui os temas *governança territorial e fundiária, conformidade com as normas ambientais e fenômenos meteorológicos adversos*.

**Fase 3 (2027):** Desenvolvimento de protótipo de estrutura tecnológica na nuvem para monitoramento dos riscos priorizados na Fase 2. A solução deverá gerar sinais de alerta centralizados para múltiplos atores (TCU, PF, MPF, BCB). Ao final, serão avaliados custos, potencialidades e limitações.

### 2.2. A Rede Interinstitucional

O Panoptes reuniu, entre setembro de 2023 e abril de 2025, contribuições de **118 participantes de 16 organizações**, organizadas em cinco segmentos. A tabela a seguir sintetiza a composição:

| Segmento                         | Instituições Participantes                                                                                                                 |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bancos                           | Banco do Brasil (BB), Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), Caixa Econômica Federal (CEF), Banco do Nordeste (BNB) |
| Cooperativas de crédito          | Credicoamo                                                                                                                                 |
| Universidades públicas           | Universidade de São Paulo (USP), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Universidade Federal de Goiás (UFG)                          |
| Órgãos de fiscalização e polícia | TCU, Polícia Federal (PF), Banco Central do Brasil (BCB), IBAMA, Ministério da Justiça e Segurança Pública (MJSP)                          |
| Institutos de pesquisa           | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)                                    |
| Sociedade civil                  | MapBiomass, Climate and Policy Initiative (CPI)                                                                                            |

<sup>10</sup>QUEIROZ, Gilberto R. de; FERREIRA, Karine R.; ADAMI, Marcos; KÖRTING, Thales. Monitoramento de operações de crédito rural por meio de geotecnologias. Brasília: ISC, 2024.

<sup>11</sup>Web Land Trajectory Service (WLTS), Tile Map Service (TMS), SpatioTemporal Asset Catalog (STAC), Web Time Series Service (WTSS) e SITS – Satellite Image Time Series Analysis for Earth Observation Data Cubes.

*Tabela 1 — Composição da rede interinstitucional do Projeto Panoptes.*

Os princípios que regem o projeto são: (i) integração de esforços entre governo, academia e terceiro setor; (ii) reutilização ampla dos conteúdos didáticos, das técnicas de análise e dos códigos; e (iii) priorização de tecnologias livres, gratuitas ou de baixo custo. Todas as imagens de satélite utilizadas são gratuitas (Landsat, Sentinel-2, CBERS), todos os serviços do INPE são de acesso livre, e menos de 10% dos gastos totais foram direcionados à aquisição de produtos ou serviços tecnológicos. Mais de 90% dos recursos foram alocados para contratação de pesquisadores doutores e institutos de pesquisa ou universidades públicas.

### 3. A Espinha Dorsal Metodológica — A Infraestrutura no GitHub

O produto técnico central da Fase 1 do Panoptes é uma plataforma de documentação e material didático completa, hospedada no GitHub Pages<sup>12</sup> e estruturada em 11 capítulos. Trata-se de um curso completo de capacitação que, simultaneamente, constitui a documentação técnica do processo de automação do monitoramento do crédito rural por meio de geotecnologias. O material foi construído com Sphinx, é interativo (com exemplos executáveis), possui referências bibliográficas, glossário e mecanismo de busca.

#### 3.1. O Pipeline de 7 Etapas

O processo de automação desenvolvido pelo Panoptes constitui a “espinha dorsal” do monitoramento. É composto por 7 etapas sequenciais, das quais 5 são ligadas a serviços disponibilizados pelo INPE ou baseadas em pesquisas de seus servidores:

**Etapla 1 — Acesso e análise de qualidade dos dados do Sicor.** A base do Sicor é reconstituída em PostgreSQL com extensão PostGIS. Os dados públicos do BCB (tabelas de operações, glebas em formato WKT, propriedades, mutuários e instituições financeiras) são integrados, as geometrias das glebas são validadas e reparadas. Essa etapa transforma dados tabulares em informação espacial analiticável.

**Etapla 2 — Verificação dos impedimentos sociais, ambientais e climáticos.** As glebas do Sicor são cruzadas, por análise espacial vetorial, com 14 bases de dados georreferenciadas: Cadastro Ambiental Rural (CAR), áreas de Trabalho Análogo à Escravidão, Unidades de Conservação (UCs), Terras Indígenas (TIs), Áreas Quilombolas, Florestas Públicas, Assentamentos, Embargos IBAMA, PRODES, SIGEF, Malha Fundiária, Áreas de Preservação Permanente (APPs) e Reserva Legal.

**Etapla 3 — Uso e cobertura da terra.** Integração com múltiplas fontes: MapBiomas (Coleção 9), PRODES, DETER, TerraClass, IBGE. Utilização do Web Land Trajectory Service (WLTS) do INPE para consultar a trajetória de uso de cada gleba ao longo do tempo.

**Etapla 4 — Acesso a imagens de satélite.** Acesso programático a imagens Landsat-8/9, Sentinel-2 e CBERS-4A para as glebas do Sicor, por meio do SpatioTemporal Asset Catalog (STAC) e do Tile Map Service (TMS) do INPE.

**Etapla 5 — Séries temporais de imagens.** Extração de séries temporais de índices de vegetação (NDVI, EVI) para cada gleba, utilizando o Web Time Series Service (WTSS) do Brazil Data Cube/INPE.

**Etapla 6 — Fenologia.** Extração e análise de métricas fenológicas (início da estação de crescimento — SOS, fim da estação — EOS, duração — LOS, pico de vigor) a partir das séries temporais, permitindo comparar o ciclo observado da cultura com o ciclo esperado.

**Etapla 7 — Análise integrada e inspeção visual.** Consolidação de todos os dados em ambiente de análise visual, permitindo a comparação de séries temporais, a classificação de outliers e a geração de alertas de indícios de irregularidades. Inclui também técnicas de agrupamento (clustering) e classificação de séries temporais por inteligência artificial.

---

<sup>12</sup>Disponível em: <https://geo-credito-rural.github.io/index.html>. Acesso em: mar. 2026.

## 3.2. Módulo SQL e PostGIS — Reconstituindo o Sicor

O primeiro desafio técnico do Panoptes foi transformar os dados brutos do Sicor — distribuídos pelo BCB em arquivos CSV compactados — em uma base de dados espacial consultável. O material didático detalha todo o processo. A seguir, exemplo simplificado da criação das tabelas e da transformação das glebas WKT em geometrias PostGIS:

```
-- Criação da tabela de glebas com geometria
CREATE TABLE sicor_glebas (
  ref_bacen  VARCHAR(20),
  nu_ordem   INTEGER,
  wkt        TEXT,
  geom       GEOMETRY(Polygon, 4674)
);

-- Importação dos dados brutos (CSV do BCB)
COPY sicor_glebas(ref_bacen, nu_ordem, wkt)
FROM '/data/SICOR_GLEBAS_WKT_2023.csv'
DELIMITER ';' CSV HEADER;

-- Transformação WKT -> geometria PostGIS
UPDATE sicor_glebas
SET geom = ST_SetSRID(ST_GeomFromText(wkt), 4674);

-- Validação e reparo de geometrias inválidas
UPDATE sicor_glebas
SET geom = ST_MakeValid(geom)
WHERE NOT ST_IsValid(geom);
```

*Código 1 — Reconstituição do Sicor em PostgreSQL/PostGIS (simplificado).*

A base reconstituída permite consultas espaciais em escala nacional. Para o período 2021–2024, as tabelas de operações contêm mais de 7,8 milhões de registros, e as glebas georreferenciadas somam mais de 2 milhões de polígonos.

## 3.3. Módulo de Impedimentos Vetoriais

O capítulo 4 do material didático detalha 14 bases vetoriais e a metodologia de verificação de impedimentos. Cada base é apresentada com sua fundamentação legal (MCR Seção 9), procedimentos de acesso e exemplos de consultas SQL espaciais. A seguir, exemplo de consulta que identifica glebas financiadas em sobreposição com Unidades de Conservação:

```
-- Identifica glebas com sobreposição em UCs
SELECT g.ref_bacen, g.nu_ordem,
       o.vl_parc_credito,
       uc.nome AS nome_uc,
       uc.categoria AS cat_uc,
       ST_Area(ST_Intersection(g.geom, uc.geom)::geography)
         / 10000 AS area_sobrep_ha
FROM sicor_glebas g
JOIN sicor_operacoes o
  ON g.ref_bacen = o.ref_bacen
 AND g.nu_ordem = o.nu_ordem
JOIN unidades_conservacao uc
  ON ST_Intersects(g.geom, uc.geom)
WHERE o.cd_fonte_recurso IN (SELECT cd FROM fontes_publicas)
 AND uc.categoria NOT IN ('APA');
```

*Código 2 — Consulta de sobreposição gleba × Unidades de Conservação (PostGIS).*

A mesma lógica é aplicada para cada um dos 14 impedimentos. O material didático do Panoptes inclui consultas específicas para Terras Indígenas, Territórios Quilombolas, áreas embargadas pelo IBAMA, Florestas Públicas Não Destinadas e áreas de trabalho análogo à escravidão, além de verificações cruzadas com o PRODES/INPE e o DETER.

### 3.4. Módulo MapBiomias e WLTS

O capítulo 5 do material didático é dedicado ao uso e cobertura da terra e integra múltiplas fontes, com destaque para o MapBiomias. O Web Land Trajectory Service (WLTS), desenvolvido pelo INPE, permite consultar a trajetória de uso de uma localização específica ao longo de décadas, cruzando automaticamente dados do MapBiomias, IBGE e PRODES. A seguir, exemplo de código Python para verificar se uma gleba de crédito rural era efetivamente área agrícola no ano da contratação:

```
import wltts

# Conectar ao serviço WLTS do INPE (Brazil Data Cube)
service = wltts.WLTS('https://brazildatacube.dpi.inpe.br/wlts/')

# Consultar trajetória de uso para o centróide da gleba
trajectory = service.tj(
    latitude = -12.0453,
    longitude = -51.8765,
    collections = 'mapbiomas-v9'
)

# Verificar classe de uso no ano de contratação (2023)
uso_2023 = trajectory.df()
    .query("year == 2023")['class'].values[0]

print(f'Uso em 2023: {uso_2023}')
# Saída: Uso em 2023: Soja
```

*Código 3 — Consulta de trajetória de uso via WLTS/INPE (Python).*

O WLTS permite, por exemplo, verificar se uma gleba financiada para “custeio de soja” era classificada como “pastagem” ou “vegetação nativa” no ano da contratação pelo MapBiomias, indicando desvio de finalidade. A comparação entre a informação declarada no Sicor e a classificação MapBiomias para a mesma gleba e o mesmo ano é a essência metodológica da PoC 2 (Seção 5).

### 3.5. Módulo de Séries Temporais e Fenologia

Os capítulos 7 e 8 do material didático abordam a extração e análise de séries temporais de índices de vegetação, por meio do Web Time Series Service (WTSS) do Brazil Data Cube. O WTSS permite obter, para qualquer ponto ou polígono do território brasileiro, a série temporal de índices como NDVI e EVI a partir de cubos de dados de imagens Landsat e Sentinel. A seguir, exemplo de extração:

```
import wtss

# Conectar ao WTSS do Brazil Data Cube
service = wtss.WTSS('https://brazildatacube.dpi.inpe.br/wtss/')

# Extrair série temporal NDVI para a gleba
ts = service.time_series(
```



```

coverage = 'S2-16D-2',
attributes = ('NDVI',),
latitude = -12.0453,
longitude = -51.8765,
start_date = '2023-01-01',
end_date = '2023-12-31'
)

# Plotar a série temporal
ts.plot()

```

Código 4 — Extração de série temporal NDVI via WTSS/Brazil Data Cube (Python).

A partir dessas séries, métricas fenológicas são extraídas automaticamente: data de início da estação de crescimento (SOS — *Start of Season*), data de fim (EOS — *End of Season*), duração do ciclo (LOS — *Length of Season*) e pico de vigor vegetativo. Essas métricas permitem responder perguntas como: “A cultura declarada no crédito teve ciclo fenológico compatível com o observado por satélite?” ou “Houve emergência da cultura na gleba financiada?”. É nessa lógica que se fundamenta a PoC 4, conduzida pelo MJSP (Seção 5).

## 4. Kaggle: O Laboratório Aberto de Computação Interativa

Complementarmente ao material didático no GitHub, o Panoptes disponibilizou 8 cadernos de computação interativa (Jupyter Notebook) na plataforma Kaggle<sup>13</sup>, sob a organização **Geo Crédito Rural**. Os cadernos correspondem às aulas do curso e permitem que qualquer pessoa com uma conta Kaggle gratuita execute, modifique e adapte todo o código diretamente no navegador, sem necessidade de instalar qualquer software ou configurar ambiente local. A Kaggle oferece inclusive GPU gratuita para quem desejar escalar os processamentos.

Os 8 cadernos cobrem os seguintes módulos:

**Caderno 1 — Dados do Sicor:** Download automático dos microdados públicos do BCB, carga em base de dados, transformação de WKT em geometrias, validação topológica.

**Caderno 2 — Impedimentos Sociais, Ambientais e Climáticos:** Download e processamento das bases vetoriais (UCs, TIs, Quilombos, Embargos IBAMA, CAR, PRODES etc.), cruzamento espacial com glebas do Sicor.

**Caderno 3 — Uso e Cobertura da Terra:** Integração com MapBiomas Coleção 9, TerraClass e WLTS. Extração de estatísticas zonais para glebas.

**Caderno 4 — Imagens de Satélite:** Acesso programático a imagens Landsat-8/9, Sentinel-2 e CBERS via STAC e TMS do INPE.

**Caderno 5 — Séries Temporais:** Extração de séries temporais de NDVI e EVI via WTSS do Brazil Data Cube.

**Caderno 6 — Fenologia:** Cálculo automático de métricas fenológicas (SOS, EOS, LOS, pico) e comparação com ciclos esperados.

**Caderno 7 — Agrupamento de Séries Temporais:** Técnicas de clustering (k-means, DTW) para identificar padrões anômalos em glebas financiadas.

**Caderno 8 — Classificação por IA:** Classificação supervisionada e não supervisionada de séries temporais para detecção automática de desvio de finalidade.

Todo o material é licenciado sob Creative Commons Atribuição-Não Comercial-Compartilhada 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)<sup>14</sup>, o que garante a livre reutilização, adaptação e redistribuição por outros atores não comerciais. Essa escolha é estratégica: o Panoptes não pretende ser um produto fechado do TCU, mas sim uma plataforma de conhecimento aberta que permita a qualquer instituição — bancos, cooperativas, órgãos de fiscalização, universidades, organizações da sociedade civil — reproduzir e expandir as análises.

O significado dessa infraestrutura aberta vai além da transparência: ela democratiza o uso de geotecnologias no controle do crédito rural. Um analista do Banco Central, um pesquisador universitário, um auditor de tribunal de contas estadual ou um jornalista investigativo podem, com os mesmos cadernos, verificar se operações de crédito rural estão sendo aplicadas conforme declarado. Essa ampliação da expectativa de controle — a percepção, pelos regulados, de que estão sendo observados — é um dos efeitos mais potentes do Panoptes.

---

<sup>13</sup>Disponível em: <https://www.kaggle.com/organizations/geocreditorural>. Acesso em: mar. 2026.

<sup>14</sup>Licença Atribuição-Não Comercial-Compartilhada 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).

## 5. As Quatro Provas de Conceito

Para validar a viabilidade do monitoramento automatizado, o Panoptes conduziu quatro Provas de Conceito (PoCs) com parceiros institucionais distintos. Cada PoC variou em objetivo, tecnologia, metodologia, ênfase, objeto (trigo, milho, soja, pasto) e nos recortes espaço-temporais. No total, foram analisadas aproximadamente **240 mil operações**, com valores superiores a **R\$ 2,5 bilhões** em suspeitas de desvio. Todas as análises envolveram alguma técnica de inteligência artificial.

### 5.1. PoC 1 — Lapig/UFG (Rede MapBiomias): Recuperação de Pastagens

Em parceria com o Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (Lapig), vinculado à Universidade Federal de Goiás (UFG) — instituição de referência nacional na avaliação de pastagens e integrante da rede MapBiomias —, o Panoptes analisou **3.694 operações de crédito de recuperação de pastagens degradadas** (código Sicor: produto 5760, subproduto 989), contratadas entre 2021 e 2023. As glebas foram confrontadas com a base do Atlas das Pastagens (Lapig/UFG) e com dados de satélite.

Os resultados revelaram duas camadas de irregularidade:

**Irregularidades flagrantes:** 804 glebas (21,7%) não eram pastagens ou possuíam área mínima de pastagem (inferior a 1 ha), e **181 glebas (4,9%) eram pastagens recentes com provável desmatamento ocorrido após 2021**. Esses casos configuram graves indícios de que o crédito rural subsidiado pode ter sido utilizado para financiar desmatamento de áreas nativas, conforme confirmado por imagens de alta resolução do Google Earth. No total, 26,6% das operações apresentaram irregularidades flagrantes.

**Inefetividade da política:** Das operações que passaram na primeira camada de controle, avaliou-se a evolução da qualidade da pastagem após a tomada do crédito. Resultado: 684 glebas apresentaram tendência negativa de vigor (aumento da degradação). **Apenas 26,8% das operações apresentaram sinais de melhoria no vigor da pastagem**, condizente com o objetivo do crédito. Em 73,2% dos casos analisados, não foram observados indícios de eficácia da política pública.

### 5.2. PoC 2 — Equipe MapBiomias: Soja e Trigo

A segunda PoC contou com a participação direta da equipe MapBiomias, que elaborou mapas de uso e ocupação a partir da Coleção 9<sup>15</sup> e extraiu estatísticas zonais para **274.773 glebas** vinculadas a operações de custeio de soja e trigo com fonte de recurso público, contratadas entre 2021 e 2023. As glebas foram fornecidas pelo Núcleo de Dados da SecexDesenvolvimento do TCU, em formato GeoPackage.

O método adotou critérios prudentes de filtragem para reduzir falsos positivos: foram extraídas glebas com área inferior a 1 hectare e glebas com variação de área superior a 20% entre a área informada na operação e a área derivada da estatística zonal. Após simulações, concluiu-se que uma gleba com percentual de “cultura temporária” (MapBiomias, nível 3) inferior a 50% da área, cumulativamente com soma de cinco outras classes (água, vegetação natural, pastagem, silvicultura e mineração) superior a 30% da área, seria considerada com suspeita de irregularidade.

---

<sup>15</sup>MapBiomias General Handbook – Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), Collection 9 (<https://doi.org/10.58053/MapBiomias/ICCL5B>).

**Resultado:** foram identificadas **12,1 mil operações com indícios de irregularidade**, totalizando **R\$ 7,1 bilhões** no período. Nas glebas irregulares, apenas 11,9% da área média apresentou agricultura temporária em sua ocupação, sendo o restante composto por vegetação natural (predominante), pastagem e outras classes.

### 5.3. PoC 3 — INPE: Classificação Automática por IA

A terceira PoC foi conduzida pela equipe do INPE e empregou técnicas de classificação não supervisionada por inteligência artificial para detectar automaticamente as classes de uso da terra dentro de cada gleba financiada. O método analisa a composição espectral e temporal de cada pixel da gleba e agrupa padrões similares, permitindo identificar, sem rótulos prévios, se a área efetivamente corresponde à cultura declarada na operação de crédito.

### 5.4. PoC 4 — MJSP (Brasil MAIS): Não Emergência da Cultura

A quarta PoC contou com o apoio do Ministério da Justiça e Segurança Pública (MJSP), por meio do Programa Brasil MAIS. Foram produzidos relatórios automatizados de indícios de *não emergência* da cultura — ou seja, situações em que a plântula não rompeu o solo no período esperado, sugerindo que o plantio declarado na operação de crédito não ocorreu. Esse projeto-piloto demonstrou a viabilidade de geração automatizada de alertas em larga escala, integráveis ao fluxo de trabalho da Polícia Federal e do Ministério Público Federal.

### 5.5. Síntese das Provas de Conceito

| PoC   | Parceiro   | Objeto         | Operações | Irregularidade | Valor (R\$)  |
|-------|------------|----------------|-----------|----------------|--------------|
| 1     | Lapig/UFG  | Pastagem       | 3.694     | 26,6%          | —            |
| 2     | MapBiomass | Soja/Trigo     | 274.773   | 4,4%           | R\$ 7,1 bi   |
| 3     | INPE       | Classif. IA    | —         | 0,7–26,6%      | —            |
| 4     | MJSP       | Não emergência | Piloto    | —              | —            |
| Total |            |                | ~240 mil  |                | > R\$ 2,5 bi |

Tabela 2 — Síntese das quatro Provas de Conceito do Projeto Panoptes.

Os resultados das quatro PoCs demonstram que o monitoramento automatizado por geotecnologias não é apenas viável, mas capaz de detectar irregularidades em escalas que fiscalizações amostrais ou manuais jamais alcançariam. A diversidade de parceiros, métodos e objetos comprova a robustez e a versatilidade da infraestrutura desenvolvida pelo Panoptes. Na Seção 6 (Parte II deste relatório), será demonstrado como essa infraestrutura foi operacionalizada na auditoria do Sistema Nacional de Crédito Rural, com resultados de escala sem precedentes.

## 6. Da Tecnologia à Auditoria: O Impacto no Controle Externo

As metodologias do Panoptes foram operacionalizadas, em 2025, na auditoria do Sistema Nacional de Crédito Rural e do Proagro, conduzida pela AudSustentabilidade do TCU. Trata-se da primeira fiscalização governamental brasileira a empregar sistematicamente dados do MapBiomass, serviços do INPE e inteligência artificial para avaliar operações de crédito rural em

escala nacional. O Panoptes é a fonte tecnológica e metodológica de cada achado descrito a seguir.

### 6.1. A Auditoria em Números

Foram analisadas **1,46 milhão de operações** registradas no Sicor (2021–2024), cruzadas com **10 tipologias de impedimentos** do MCR (Seção 9) e com o Código Florestal. Resultados: **R\$ 27,1 bilhões** em indícios diretos de irregularidades.

**R\$ 221,1 bilhões** em sobreposições com Reserva Legal e APP.

Os R\$ 27,1 bilhões superam o orçamento anual de ministérios inteiros. Os R\$ 221,1 bilhões equivalem a quase metade de um Plano Safra. Somente a automação em escala nacional, viabilizada pelo Panoptes, foi capaz de revelá-los.

### 6.2. As 10 Tipologias

| Tipologia                         | Base Legal            | Operações   | Valor (R\$)  |
|-----------------------------------|-----------------------|-------------|--------------|
| Florestas Públicas Não Destinadas | MCR 2-9; CMN 5.268    | Milhares    | Bilhões      |
| Cadastro Ambiental Rural (CAR)    | MCR 2-9; CMN 5.193    | Milhares    | Bilhões      |
| Embargos Ambientais (IBAMA)       | MCR 2-9; LC 140/2011  | Milhares    | Bilhões      |
| Unidades de Conservação           | Lei 9.985/2000        | Milhares    | Bilhões      |
| Terras Indígenas                  | CF art. 231           | Centenas    | Milhões      |
| Trabalho Análogo à Escravidão     | CMN 4.883; MCR 1-2-10 | Centenas    | Milhões      |
| Territórios Quilombolas           | Dec. 4.887/2003       | Centenas    | Milhões      |
| Reserva Legal                     | Lei 12.651/2012       | Dezenas mil | R\$ 110+ bi* |
| Área de Preservação Permanente    | Lei 12.651/2012       | Dezenas mil | R\$ 110+ bi* |
| Desvio de Finalidade (soja/trigo) | MCR; PoC MapBiomass   | 12.100      | R\$ 7,1 bi   |
| TOTAL INDÍCIOS DIRETOS            |                       |             | R\$ 27,1 bi  |
| TOTAL SOBREPOSIÇÕES RL/APP        |                       |             | R\$ 221,1 bi |

Tabela 3 — As 10 tipologias da auditoria. \*Sobreposições com Código Florestal.

Foram detectadas operações com múltiplos impedimentos simultâneos — crédito a mutuário na lista de trabalho escravo, em gleba sobreposta a UC, com desmatamento detectado pelo PRODES. Essa acumulação evidencia falhas sistêmicas que o Panoptes tornou mensuráveis pela primeira vez.

### 6.3. Estágio Processual: Da Auditoria ao Acórdão

O relatório foi finalizado e aguarda deliberação do Plenário do TCU para conversão em **acórdão**<sup>16</sup> — a decisão colegiada com força coercitiva sobre o sistema financeiro. A magnitude dos achados (R\$ 248,2 bilhões entre indícios e sobreposições) sugere repercussão sobre a regulamentação do CMN, o Sicor e os compromissos climáticos do Brasil.

### 6.4. O Acórdão 2.493/2024: O Precedente

<sup>16</sup>O relatório de auditoria (Fiscalização 1460/2025) foi finalizado pela AudSustentabilidade e encontra-se em fase de instrução processual, aguardando deliberação do Plenário do TCU para conversão em acórdão, nos termos do art. 10 da Lei nº 8.443/1992 e dos arts. 1º, inciso II, e 15 da Resolução-TCU nº 315/2020.

O Acórdão 2.493/2024<sup>17</sup>, sobre o Proagro, recomendou expressamente (item 9.1.3) a *"adoção de ferramentas de geocontrole, sensoriamento remoto e inteligência artificial"*. O Panoptes é precisamente a infraestrutura que materializa essa recomendação. O acórdão revelou governança precária: ausência de limitação orçamentária, conflitos de interesse na comprovação de perdas, fragilidades no controle. O Panoptes fornece base tecnológica para corrigir parcialmente essas deficiências. Para isso, tem desenvolvido pesquisas nos últimos dois anos em um Relatório de Não Emergência com o apoio do Programa BrasilMAIS (documento anexo)

---

<sup>17</sup>Acórdão 2.493/2024-TCU-Plenário. Auditoria operacional sobre Proagro e Zarc. Relator: Ministro Vital do Rêgo, Sessão de 27/11/2024.

## 7. Os Dados MapBiomias como Pilar Estruturante

O MapBiomias atuou como **instituição parceira direta** do Panoptes, não como mero fornecedor de dados. Participou ativamente em duas PoCs e seus dados são camada permanente de análise em toda a infraestrutura.

### 7.1. A Coleção 9 como Backbone

A Coleção 9<sup>18</sup> reconstitui o uso da terra de 1985 a 2023, pixel a pixel, via Random Forest no Google Earth Engine. Para o Panoptes, é indispensável: (i) verifica se o uso declarado no crédito corresponde ao observado; (ii) revela conversões ilegais (vegetação nativa → pastagem → crédito de "recuperação"); (iii) oferece 4 níveis hierárquicos adaptáveis a diferentes tipologias.

### 7.2. A PoC MapBiomias: Rigor Técnico

Pipeline completo: GeoPackages com 274.773 glebas → mapas Coleção 9 (Landsat 30m e Sentinel 10m) → Subdivisão Direta (Split-by-Area: pixel 900m<sup>2</sup> → 9 subpixels de 100m<sup>2</sup>) → estatísticas zonais → filtragem. Escolha deliberada pela Coleção Landsat (melhor acurácia, não maior resolução). Resultado conservador: R\$ 7,1 bi.

### 7.3. Atlas das Pastagens

O Atlas (Lapig/UFG, rede MapBiomias) fundamentou a PoC 1. Revelou que apenas 26,8% das operações de recuperação de pastagem tiveram efeito — achado de auditoria e avaliação inédita de efetividade de política pública, ambos viabilizados pelos dados MapBiomias.

### 7.4. WLTS como Integrador

O WLTS do INPE integra dados do MapBiomias, IBGE e PRODES em consulta única de trajetória temporal. Permite detectar que uma gleba "vegetação nativa" em 2020 virou "pastagem" em 2021 e recebeu crédito de "recuperação" em 2022 — indicio de desmatamento financiado. Essa capacidade só existe porque o MapBiomias oferece cobertura temporal contínua desde 1985. Os dados MapBiomias estão presentes em 6 dos 11 capítulos do material didático no GitHub.

---

<sup>18</sup>MapBiomias General Handbook – ATBD, Collection 9 (<https://doi.org/10.58053/MapBiomias/ICCL5B>).

## 8. Infraestrutura Aberta e Legado Tecnológico

O Panoptes foi desenhado para produzir infraestrutura aberta, replicável e escalável.

### 8.1. GitHub Pages: A Enciclopédia

geo-credito-rural.github.io<sup>19</sup>: 11 capítulos com Sphinx, 14 bases vetoriais, integração MapBiomas, IA, referências acadêmicas, glossário, busca. Simultaneamente curso de pós-graduação e manual operacional.

### 8.2. Kaggle: Computação a Custo Zero

8 cadernos Jupyter na organização Geo Crédito Rural<sup>20</sup>. Qualquer pessoa executa no navegador, sem instalar nada. CPU, RAM e GPU gratuitas. Custo para reproduzir o pipeline: zero. Acessível a tribunais estaduais, universidades, cooperativas e sociedade civil.

### 8.3. YouTube: Centenas de Horas

101 horas de encontros técnicos + 56 horas de capacitação e divulgação, integralmente disponíveis. Qualquer decisão metodológica pode ser rastreada até a discussão original.

### 8.4. Licença CC BY-NC-SA 4.0

Todo o material licenciado sob CC BY-NC-SA 4.0<sup>21</sup>. O Panoptes foi concebido como plataforma viva: universidades e organizações podem aprimorar e expandir indefinidamente.

### 8.5. O Panoptes Antecipou a Regulamentação

As Resoluções CMN nº 5.267 e 5.268<sup>22</sup> tornaram **obrigatório** o sensoriamento remoto para monitorar operações com área superior a 300 ha a partir de março/2026<sup>23</sup>. Quando publicadas, já existia infraestrutura aberta, documentada, testada e validada pelo Panoptes. O Capítulo 4 do GitHub já referencia as novas resoluções.

---

<sup>19</sup>Disponível em: <https://geo-credito-rural.github.io/index.html>

<sup>20</sup>Disponível em: <https://www.kaggle.com/organizations/geocreditorural>

<sup>21</sup>Licença CC BY-NC-SA 4.0.

<sup>22</sup>Resolução CMN nº 5.267, de 28/11/2025, e Resolução CMN nº 5.268, de 18/12/2025.

<sup>23</sup>A operação pode ser desclassificada por descumprimento de obrigações ambientais durante a vigência do financiamento (MCR 2-8).



## 9. Reconhecimento e Projeção Internacional

**Dois prêmios<sup>24</sup>:** Reconhe-Ser 2025 (TCU) Artigo na **Revista do TCU nº 155** (jan–jun/2025). O projeto nasceu no POA/CCC da OLACEFS<sup>25</sup> — governança multilateral. O conhecimento é replicável para qualquer país com dados de crédito agrícola georreferenciados. Custo total: ~US\$ 110 mil (97% cooperação internacional). **Relação custo-benefício: US\$ 110 mil geraram detecção de R\$ 27,1 bilhões em irregularidades** — retorno de mais de 1.000 vezes o investimento.

---

<sup>24</sup>Prêmio Reconhe-Ser 2025 (TCU) e prêmio do Projeto Regional Anticorrupção OLACEFS-GIZ.

<sup>25</sup>Desde 2016, a OLACEFS e a GIZ fomentam geotecnologias para controle governamental via Open Geo Hub.

## 10. Conclusão — O Ponto de Inflexão

O Projeto Panoptes representa um ponto de inflexão na história do controle do crédito rural brasileiro. Por 42 anos, o Estado conviveu com descompasso entre tecnologia disponível e sua utilização. O Panoptes rompeu esse ciclo.

Entregas: (i) infraestrutura aberta no GitHub e Kaggle, reproduzível a custo zero; (ii) quatro PoCs validadas com parceiros de referência; (iii) centenas de horas de material educacional; (iv) rede de 118 especialistas de 16 organizações; (v) apoio técnico à auditoria que identificou R\$ 27,1 bilhões em indícios diretos e R\$ 221,1 bilhões em sobreposições; (vi) base metodológica que antecipou a regulamentação do CMN sobre sensoriamento remoto.

Os dados do MapBiomass foram essenciais em cada entrega. O Atlas das Pastagens fundamentou a PoC sobre pastagens. A equipe MapBiomass extraiu estatísticas zonais para 274.773 glebas, revelando R\$ 7,1 bilhões em desvios. Os mapas MapBiomass são camada permanente em 6 dos 11 capítulos do material. O WLTS integra dados MapBiomass em cada consulta temporal. Sem o MapBiomass, o Panoptes não existiria na forma que existe.

A Fase 3 (2027) prevê protótipo na nuvem com alertas centralizados para TCU, PF, MPF. Score de risco agregado: tomador, IF, perito, gleba, cultura, região. O horizonte: transformar o crédito rural — meio trilhão de reais por ano — de vetor de degradação em instrumento de desenvolvimento sustentável. O Panoptes demonstrou que isso é tecnologicamente viável, economicamente barato e institucionalmente possível. Os dados do MapBiomass são peça insubstituível dessa transformação.

---

### Referências Técnicas

QUEIROZ, G. R. de; FERREIRA, K. R.; ADAMI, M.; KÖRTING, T. *Monitoramento de operações de crédito rural por meio de geotecnologias*. Brasília: ISC/TCU, 2024. <https://geo-credito-rural.github.io/>

BRASIL. TCU. Projeto Panoptes. *Revista do TCU*, n. 155, jan.–jun. 2025.

BRASIL. TCU. Acórdão 2.493/2024-TCU-Plenário. Relator: Min. Vital do Rêgo, 27/11/2024.

MapBiomass. *General Handbook — ATBD, Collection 9*. 2024. DOI: 10.58053/MapBiomass/ICCL5B.

BRASIL. MCR. <https://www3.bcb.gov.br/mcr>

BRASIL. Resoluções CMN nº 5.267 (28/11/2025) e 5.268 (18/12/2025).

Geo Crédito Rural. Kaggle. <https://www.kaggle.com/organizations/geocreditorural>

## Relatório Analítico de Alerta de Indício de Não Emergência

Operação: 515401660\_1\_1  
Data de emissão: 11/03/2026 16:00



### Indicativo de Emergência Identificado

Para a operação analisada, até a data **28/02/2023** estabelecida para a safra pelo ZARC (Zoneamento Agrícola de Risco Climático), foi identificado **83.1%** de área com emergência regular.

#### Informações da Operação

Cultura: **MILHO**  
Intervalo ZARC: **21/12/2022 a 28/02/2023**  
Intervalo de Análise: **16/12/2022 a 12/04/2023 (117 dias)**

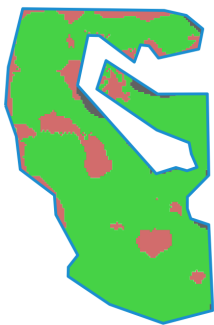
#### Informações do Processamento

Fonte: **Imagens PlanetScope**  
Imagens utilizadas: **49**

### Resultados do Modelo de Detecção de Não Emergência

#### Mapa de Classificação

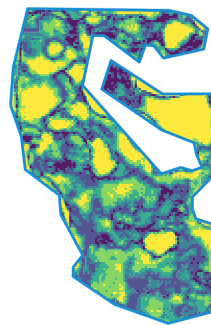
Mapa com o resultado do modelo de detecção de não emergência



Não Agricultável
  Sem Emergência
  Com Emergência

#### Mapa de Confiança

Mapa com a confiança do modelo de detecção de não emergência



Percentual de certeza do modelo na classificação de cada pixel:  
 <50%
  50-60%
  60-70%
  70-80%
  80-90%
  90-100%

Distribuição das áreas classificadas pelo modelo, com percentuais e valores em hectares para cada categoria identificada:

| Classe                                                          | Área            | Percentual   |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------|--------------|
| <b>Área Total da Operação</b>                                   | <b>19.93 ha</b> | 100%         |
| Área Não Agricultável                                           | 0.42 ha         | 2.1%         |
| Área Agricultável Sem Emergência                                | 2.96 ha         | 14.8%        |
| Área Agricultável Com Emergência                                | 16.56 ha        | 83.1%        |
| <b>Total Não Emergência</b> (Não Agricultável + Sem Emergência) | <b>3.38 ha</b>  | <b>16.9%</b> |
| Confiança Média                                                 | —               | 73.1%        |

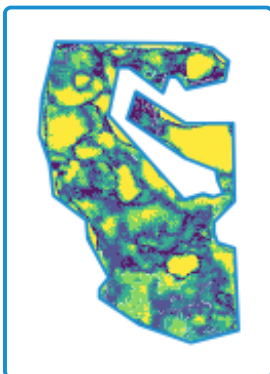
## Série Temporal de Imagens PlanetScope utilizadas na análise (1/5)

Evolução da área ao longo do período analisado (16/12/2022 a 12/04/2023)

□ Contorno: Não Emergência



**Classificação**  
519401660\_1\_1



**Confiança**  
73.1%



**16/12/2022**  
20221216\_133000\_80\_227c



**17/12/2022**  
20221217\_131928\_76\_2495



**20/12/2022**  
20221220\_132150\_78\_2486



**21/12/2022**  
20221221\_124349\_21\_2429



**22/12/2022**  
20221222\_124522\_62\_2439



**24/12/2022**  
20221224\_133040\_91\_2254



**26/12/2022**  
20221226\_130724\_55\_2276



**27/12/2022**  
20221227\_132848\_18\_2424

## Série Temporal de Imagens PlanetScope utilizadas na análise (2/5)

Evolução da área ao longo do período analisado (16/12/2022 a 12/04/2023)



**31/12/2022**  
20221231\_124050\_79\_2463



**01/01/2023**  
20230101\_132138\_83\_24a3



**05/01/2023**  
20230105\_124236\_35\_2463



**06/01/2023**  
20230106\_124428\_91\_245c



**07/01/2023**  
20230107\_130607\_58\_225a



**16/01/2023**  
20230116\_125222\_71\_24b4



**20/01/2023**  
20230120\_132102\_24\_2499



**21/01/2023**  
20230121\_124516\_00\_241f



**24/01/2023**  
20230124\_125040\_66\_24b0



**25/01/2023**  
20230125\_132157\_24\_247d



## Série Temporal de Imagens PlanetScope utilizadas na análise (3/5)

Evolução da área ao longo do período analisado (16/12/2022 a 12/04/2023)



**26/01/2023**  
20230126\_124447\_97\_241d



**27/01/2023**  
20230127\_132001\_28\_2480



**28/01/2023**  
20230128\_124841\_72\_2421



**06/02/2023**  
20230206\_131959\_44\_2480



**07/02/2023**  
20230207\_132114\_78\_247c



**08/02/2023**  
20230208\_125009\_30\_24c4



**09/02/2023**  
20230209\_132153\_53\_247d



**11/02/2023**  
20230211\_125026\_07\_24b9



**13/02/2023**  
20230213\_132340\_75\_2489



**18/02/2023**  
20230218\_124008\_24\_2451

## Série Temporal de Imagens PlanetScope utilizadas na análise (4/5)

Evolução da área ao longo do período analisado (16/12/2022 a 12/04/2023)



**06/03/2023**  
20230306\_132207\_29\_248f



**07/03/2023**  
20230307\_131902\_05\_247f



**11/03/2023**  
20230311\_131955\_11\_2480



**12/03/2023**  
20230312\_124609\_32\_241f



**18/03/2023**  
20230318\_124608\_82\_2421



**19/03/2023**  
20230319\_124013\_39\_2423



**21/03/2023**  
20230321\_124918\_21\_24b6



**22/03/2023**  
20230322\_124730\_81\_2421



**23/03/2023**  
20230323\_125256\_31\_24c4



**24/03/2023**  
20230324\_124524\_00\_241e

## Série Temporal de Imagens PlanetScope utilizadas na análise (5/5)

Evolução da área ao longo do período analisado (16/12/2022 a 12/04/2023)



**27/03/2023**  
20230327\_132231\_48\_249b



**28/03/2023**  
20230328\_132053\_35\_2484



**02/04/2023**  
20230402\_132323\_14\_2481



**03/04/2023**  
20230403\_125055\_31\_24ce



**05/04/2023**  
20230405\_124042\_83\_2451



**08/04/2023**  
20230408\_124632\_07\_2427



**09/04/2023**  
20230409\_124649\_50\_241f



**10/04/2023**  
20230410\_132329\_25\_2474



**11/04/2023**  
20230411\_132529\_10\_2477



**12/04/2023**  
20230412\_125213\_49\_24ab



## Anexo: Detalhamento Metodológico

Documentação de suporte à transparência e especificações técnicas.

### 1. Insumos e Dados Orbitais

A análise baseia-se em imagens de frequência diária da constelação **PlanetScope**, operada pela Planet Labs.

- **Resolução Espacial Efetiva:** Aproximadamente 4,3 a 4,7 metros por pixel (TMS zoom 15), variando conforme a latitude da área analisada.
- **Frequência de Revisita:** Diária
- **Produto Utilizado:** Imagens RGB (Streaming/TMS) com pré-processamento para estimativa de bandas espectrais
- **Tratamento de Nuvens:** Apenas imagens com clear coverage  $\geq 75\%$  são utilizadas, baseado no produto UDM2 (Usable Data Mask) da Planet, que classifica cada pixel como: clear (sem obstruções), shadow (sombra), haze (névoa), cloud (nuvem) ou snow (neve). O percentual de clear indica a proporção da imagem livre de obstruções atmosféricas.

**Nota:** A resolução efetiva do streaming pode limitar a precisão da análise em operações com área muito reduzida (inferiores a 2 hectares), onde poucos pixels cobrem a totalidade da área de interesse.

Documentação: <https://docs.planet.com/>

### 2. Metodologia de Análise

O sistema utiliza um conjunto de modelos de inteligência artificial baseados em **redes neurais profundas** (deep learning), tecnologia inspirada no funcionamento do cérebro humano que permite ao computador aprender padrões complexos a partir de exemplos. A análise ocorre em duas etapas complementares: a estimativa de bandas espectrais e a classificação temporal da cobertura do solo.

#### Etapas 1: Estimativa de Bandas Espectrais

As imagens PlanetScope utilizadas nesta análise são adquiridas no formato RGB (vermelho, verde e azul) via serviço de streaming (TMS). Para viabilizar o cálculo de índices de vegetação e a análise espectral da cobertura do solo, essas imagens passam por uma inteligência artificial de inferência espectral, composto por modelos de deep learning do tipo **GAN (Rede Adversarial Generativa)**.

Esses modelos estimam, a partir da imagem RGB original, os valores das bandas espectrais não disponíveis nativamente no produto de streaming: **Infravermelho Próximo (NIR)** e **Red Edge**, além de versões espectrais refinadas das bandas Red, Green e Blue. A abordagem utiliza uma arquitetura Pix-to-Pix com mecanismo de atenção CBAM (Convolutional Block Attention Module — Módulo de Atenção de Bloco Convolutacional), onde cada banda é inferida por um modelo independente, permitindo a personalização dos parâmetros para cada faixa espectral.

O modelo foi treinado com pares de imagens RGB e espectrais da constelação PlanetScope, cobrindo os seis biomas brasileiros. A avaliação foi realizada com métricas estabelecidas na literatura para modelos generativos de imagem:

- **SSIM (Similaridade Estrutural):** Métrica proposta por Wang et al. (2004) que mede a semelhança estrutural entre a imagem estimada e a imagem real, em escala de 0 a 1. Valores acima de 0,75 são considerados indicativos de boa qualidade estrutural. O modelo obteve SSIM médio de **0,82** para as bandas visíveis e **0,73** considerando todas as cinco bandas. Para referência, trabalhos similares reportam SSIM tipicamente entre 0,51 e 0,69 (Pereira et al., 2024).
- **PSNR (Razão Sinal-Ruído de Pico):** Avalia a qualidade da reconstrução em decibéis (dB). Valores acima de 25 dB são considerados bons e acima de 30 dB muito bons. O PSNR médio obtido foi de **29,1 dB** para bandas visíveis e **27,4 dB** no geral, na faixa superior dos resultados reportados para tarefas similares de síntese espectral a partir de RGB (19–30 dB; Pereira et al., 2024; Shukla et al., 2022).
- **FID (Distância de Fréchet):** Métrica proposta por Heusel et al. (2017) que mede a proximidade entre a distribuição das imagens geradas e reais, onde valores menores indicam maior fidelidade. O FID médio obtido foi de **0,008**, indicando alta similaridade distributiva.

O desempenho varia entre os biomas brasileiros, em função da diversidade de alvos presentes em cada região — tipos de solo, corpos d'água, formações rochosas, cobertura vegetal, áreas urbanas e infraestrutura. Os melhores resultados foram observados em biomas com alvos de assinaturas espectrais mais homogêneas, como **Pantanal** (SSIM 0,85), **Amazônia** (SSIM 0,83) e **Pampa** (SSIM 0,83). A **Mata Atlântica** (SSIM 0,82) apresenta resultados comparáveis, apesar da diversidade de uso do solo na região. Biomas com maior heterogeneidade de alvos, como **Caatinga** (SSIM 0,79) e **Cerrado** (SSIM 0,81), apresentam resultados ligeiramente inferiores, embora dentro de faixas satisfatórias. A banda NIR é a mais desafiadora em todos os biomas (SSIM médio 0,38), dado a menor correlação direta entre os canais RGB e o infravermelho próximo.

#### Etapas 2: Classificação Temporal (Modelo CNN-GRU)

Com as bandas espectrais estimadas, o sistema aplica uma rede neural híbrida que combina duas técnicas complementares:

- **CNN (Rede Neural Convolutacional):** Técnica especializada em análise de imagens. Funciona como um sistema de visão computacional que identifica automaticamente características visuais como texturas, bordas e padrões de vegetação em cada imagem de satélite.
- **GRU (Unidade Recorrente com Porta):** Técnica especializada em análise de sequências temporais. Permite ao modelo correlacionar as mudanças observadas ao longo do tempo, identificando padrões de crescimento ou ausência de desenvolvimento vegetativo na série de imagens.

A combinação CNN-GRU permite que o sistema analise simultaneamente **o que aparece em cada imagem** (análise espacial) e **como a área evolui ao longo do tempo** (análise temporal), classificando cada pixel da área analisada nas classes identificadas pelo modelo (Área Não Agricultável, Área Agricultável Sem Emergência e Área Agricultável Com Emergência).

O modelo foi treinado e validado com dados rotulados por especialistas em sensoriamento remoto, alcançando uma acurácia de intersecção sobre união (IoU) superior a **92%** no conjunto de validação, métrica que indica a concordância entre a classificação do modelo e a referência estabelecida pela equipe de especialistas em sensoriamento remoto.

### 3. Classes do Relatório

| Classe                           | Descrição                                                                                                                                                       |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Área Não Agricultável            | Áreas sem indício de emergência e que não são agricultáveis, como vegetação nativa permanente (floresta, mata ciliar)                                           |
| Área Agricultável Sem Emergência | Áreas potencialmente agricultáveis onde não foi identificada uma tendência de plantio seguido de crescimento vegetativo ao longo da série temporal analisada    |
| Área Agricultável Com Emergência | Áreas onde foi identificada uma tendência de plantio seguido de crescimento vegetativo, indicando desenvolvimento regular da lavoura ao longo da série temporal |

### 4. Critérios de Decisão

- **Indicativo de Não Emergência Identificado:** (Área Não Agricultável + Área Agricultável Sem Emergência)  $\geq$  20% da área da operação
- **Indicativo de Emergência:** (Área Não Agricultável + Área Agricultável Sem Emergência)  $<$  20% da área da operação
- **Resultado Inconclusivo:** Confiança média  $<$  85% ou número de imagens  $<$  15
- **Limitação:** Operações  $<$  2 ha podem apresentar maior vulnerabilidade a imprecisões

### 5. Referências Bibliográficas

- Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., & Simoncelli, E. P. (2004). **Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity**. IEEE Transactions on Image Processing, 13(4), 600–612.
- Heusel, M., Ramsauer, H., Unterthiner, T., Nessler, B., & Hochreiter, S. (2017). **GANs Trained by a Two Time-Scale Update Rule Converge to a Local Nash Equilibrium**. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS).
- Goodfellow, I. J., et al. (2014). **Generative Adversarial Networks**. arXiv preprint arXiv:1406.2661. <https://arxiv.org/abs/1406.2661>
- Shukla, A., et al. (2022). **High-Resolution NIR Prediction from RGB Images: Application to Plant Phenotyping**. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 4058–4062. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9897670>
- Pelletier, C., Webb, G. I., & Petitjean, F. (2019). **Temporal Convolutional Neural Network for the Classification of Satellite Image Time Series**. Remote Sensing, 11(5), 523. <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/5/523>
- Pereira, A. S., et al. (2024). **From RGB to Synthetic NIR: Image-to-Image Translation for Pineapple Crop Monitoring Using Pix2PixHD**. Technologies, 13(12), 569. <https://www.mdpi.com/2227-7080/13/12/569>
- **GEO CRÉDITO RURAL** - Sistema de Análise Espacial para Crédito Rural. <https://geo-credito-rural.github.io/index.html>

## Anexo: Lista de Imagens Utilizadas

Imagens PlanetScope utilizadas na análise da operação.

| #  | Data       | ID da Imagem            |
|----|------------|-------------------------|
| 1  | 16/12/2022 | 20221216_133000_80_227c |
| 2  | 17/12/2022 | 20221217_131928_76_2495 |
| 3  | 20/12/2022 | 20221220_132150_78_2486 |
| 4  | 21/12/2022 | 20221221_124349_21_2429 |
| 5  | 22/12/2022 | 20221222_124522_62_2439 |
| 6  | 24/12/2022 | 20221224_133040_91_2254 |
| 7  | 26/12/2022 | 20221226_130724_55_2276 |
| 8  | 27/12/2022 | 20221227_132848_18_2424 |
| 9  | 30/12/2022 | 20221230_133439_92_2402 |
| 10 | 31/12/2022 | 20221231_124050_79_2463 |
| 11 | 01/01/2023 | 20230101_132138_83_24a3 |
| 12 | 05/01/2023 | 20230105_124236_35_2463 |
| 13 | 06/01/2023 | 20230106_124428_91_245c |
| 14 | 07/01/2023 | 20230107_130607_58_225a |
| 15 | 16/01/2023 | 20230116_125222_71_24b4 |
| 16 | 20/01/2023 | 20230120_132102_24_2499 |
| 17 | 21/01/2023 | 20230121_124516_00_241f |
| 18 | 24/01/2023 | 20230124_125040_66_24b0 |
| 19 | 25/01/2023 | 20230125_132157_24_247d |
| 20 | 26/01/2023 | 20230126_124447_97_241d |
| 21 | 27/01/2023 | 20230127_132001_28_2480 |
| 22 | 28/01/2023 | 20230128_124841_72_2421 |
| 23 | 06/02/2023 | 20230206_131959_44_2480 |
| 24 | 07/02/2023 | 20230207_132114_78_247c |
| 25 | 08/02/2023 | 20230208_125009_30_24c4 |

| #  | Data       | ID da Imagem            |
|----|------------|-------------------------|
| 26 | 09/02/2023 | 20230209_132153_53_247d |
| 27 | 11/02/2023 | 20230211_125026_07_24b9 |
| 28 | 13/02/2023 | 20230213_132340_75_2489 |
| 29 | 18/02/2023 | 20230218_124008_24_2451 |
| 30 | 06/03/2023 | 20230306_132207_29_248f |
| 31 | 07/03/2023 | 20230307_131902_05_247f |
| 32 | 11/03/2023 | 20230311_131955_11_2480 |
| 33 | 12/03/2023 | 20230312_124609_32_241f |
| 34 | 18/03/2023 | 20230318_124608_82_2421 |
| 35 | 19/03/2023 | 20230319_124013_39_2423 |
| 36 | 21/03/2023 | 20230321_124918_21_24b6 |
| 37 | 22/03/2023 | 20230322_124730_81_2421 |
| 38 | 23/03/2023 | 20230323_125256_31_24c4 |
| 39 | 24/03/2023 | 20230324_124524_00_241e |
| 40 | 27/03/2023 | 20230327_132231_48_249b |
| 41 | 28/03/2023 | 20230328_132053_35_2484 |
| 42 | 02/04/2023 | 20230402_132323_14_2481 |
| 43 | 03/04/2023 | 20230403_125055_31_24ce |
| 44 | 05/04/2023 | 20230405_124042_83_2451 |
| 45 | 08/04/2023 | 20230408_124632_07_2427 |
| 46 | 09/04/2023 | 20230409_124649_50_241f |
| 47 | 10/04/2023 | 20230410_132329_25_2474 |
| 48 | 11/04/2023 | 20230411_132529_10_2477 |
| 49 | 12/04/2023 | 20230412_125213_49_24ab |