

# Otimização da Observação Ambiental em Unidades de Conservação

Integração de Heurística e Programação Linear Inteira Mista

**Luryan D. Dorneles, Ícaro B. Q. Araujo, Glauber R. Leite,  
Rian G. S. Pinheiro, Bruno C. S. Nogueira**



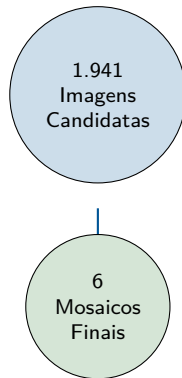
Universidade Federal de Alagoas | SBPO 2025

## Desafio Principal:

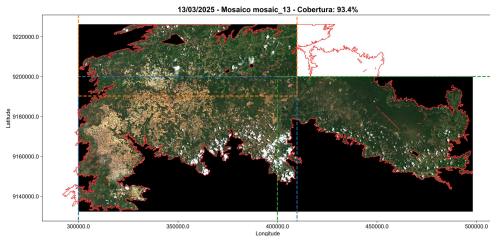
- Como observar **eficientemente** UCs ao longo do tempo?
- Milhares de imagens disponíveis
- Qualidade variável (nuvens, dados faltantes)

## Abordagem Proposta:

- Método **híbrido** (Heurística Gulosa + PLIM)
- Seleção automática e ótima
- Métricas de qualidade
- Cobertura temporal consistente



**MOSAICO = Conjunto de imagens que cobrem uma área**



- Cada imagem cobre **parte** da região
- Com sobreposição, criam o **efeito** de uma única imagem
- **Qual a melhor combinação escolher?**

**Problema:** Seleção combinatória complexa



## Problema 1

Até 40% da imagem inútil



## Problema 2

Dados faltantes/inválidos

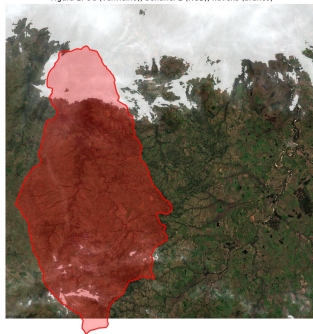


## Problema 3

Análise multitemporal

**Necessário:** Selecionar a mesma área em diferentes períodos

Figura 1: UC (vermelho), Sentinel-2 (RGB), nuvens (branco)



**Exemplo real:** Nuvens (branco) e dados faltantes prejudicam o monitoramento

## 13 UCs em 9 Estados Brasileiros



### **MG—SP—RJ:**

- PARNA Mantiqueira (437.192 ha)

### **Rio Grande do Sul:**

- APA Ibirapuitã (318.767 ha)

### **Mato Grosso:**

- PARNA Pantanal (33.800 ha)

### **Alagoas:**

- APA Muricy (129.742 ha)
- APA Santa Rita (9.633 ha)
- APA Catolé (3.708 ha)
- APA Pratagy (20.873 ha)

### **Bahia:**

- PARNA Pau Brasil (18.934 ha)
- PARNA Monte Pascoal (22.239 ha)
- PARNA Descobrimento (22.607 ha)
- REVIS Rio dos Frades (907 ha)

### **PI—PE—CE:**

- APA Chapada Araripe (1.019.460 ha)
- FLONA Araripe-Apodi (38.920 ha)

**FASE 1**  
Heurística  
Gulosa



Mosaicos  
Candidatos



**FASE 2**  
Modelo  
PLIM



Mosaicos  
Ótimos

## Fase 1 — Heurística Gulosa:

- Calcula efetividade das imagens
- Forma grupos compatíveis
- Cobertura mínima de 85%

## Fase 2 — Otimização:

- Modelo PLIM para seleção final
- Maximiza cobertura útil
- Minimiza nuvens
- Garante sobreposição  $\geq 80\%$

## Dados de Entrada:

- $I$  = Imagens Sentinel-2 candidatas
- $A$  = Área de Interesse (UC)
- $A_i$  = Cobertura geográfica da imagem  $i$
- $P_i$  = Proporção de pixels válidos
- $N_i$  = Proporção de nuvens
- $\Delta T_{\max}$  = Janela temporal (5 dias)

## Variáveis do Modelo:

- $E_i$  = Efetividade da imagem  $i$
- $M$  = Conjunto de mosaicos candidatos
- $E_j$  = Cobertura efetiva do mosaico  $j$
- $N_j$  = Cobertura máxima de nuvens
- $y_j$  = Variável binária de seleção
- $\gamma$  = Peso de penalização



## Algorithm 1 Seleção de mosaicos candidatos

```
1 Entrada:  $I, A, \Delta T_{\max}, \Delta A^{\min}, A_M^{\text{alvo}}, A_M^{\min}, N_M^{\max}$ 
2 Saída:  $M$ 
3 Inicializar  $M \leftarrow \emptyset$ ; filtrar  $I$  com  $N_i \leq N_M^{\max}$ 
4 while há regiões de  $A$  não cobertas do
5    $M_{\text{novo}} \leftarrow \emptyset$ 
6   Para cada  $i \in I$ , calcular  $E_i = A_i \cdot P_i \cdot Q_i$  (Efetividade)
7   Selecionar  $i^* = \arg \max_{i \in I} E_i$  como semente
8   Definir  $I_{\text{comp}} = \{i \in I : |t_i - t_{i^*}| \leq \Delta T_{\max}\}$  (compatíveis temporais)
9   while  $I_{\text{comp}} \neq \emptyset$  e cobertura pode ser melhorada do
10     Para cada  $i \in I_{\text{comp}}$ , calcular  $E_i$ ; definir  $I'_{\text{comp}}$  com sobreposição válida
11     Selecionar  $i^* = \arg \max_{i \in I'_{\text{comp}}} E_i$ 
12     if  $i^*$  aumenta cobertura em  $\geq \Delta A^{\min}$  then
13       Adicionar  $i^*$  ao  $M_{\text{novo}}$ ; atualizar  $I_{\text{comp}}$  para janela temporal
14     else
15        $I_{\text{comp}} \leftarrow \emptyset$  (parada: sem melhoria)
16     end if
17   end while
18   if Cobertura ( $M_{\text{novo}}$ )  $\geq A_M^{\min}$  (85%) then
19     Adicionar  $M_{\text{novo}}$  a  $M$ 
20   end if
21 end while
22 Aplicar PLIM nos mosaicos candidatos  $M$  para seleção ótima
23 Retornar Mosaicos selecionados
```

**Maximizar:**

$$\sum_j E_j \cdot y_j - \gamma \sum_j N_j \cdot y_j$$

**Componentes da função objetivo:**

- **Termo 1:** Benefício da cobertura útil ( $E_j$ )
- **Termo 2:** Penalização por nuvens ( $\gamma \times N_j$ )
- Peso  $\gamma$  ajustado empiricamente

**Resultado:** Prioriza mosaicos com alta cobertura e baixa nebulosidade

## Restrições principais do modelo de otimização:

- ① **Limite de mosaicos:**  $\sum_{j \in M} y_j \leq N_{\max}$ 
  - Evita fragmentação excessiva
  - Facilita análise temporal
- ② **Exclusividade de imagens:**  $\sum_{j \in M(i)} y_j \leq 1 \quad \forall i \in I'$ 
  - Cada imagem em no máximo 1 mosaico
  - Elimina redundâncias
- ③ **Sobreposição mínima:**  $y_j + y_k \leq 1 \quad \forall j, k \mid I_{j,k} < 80\%$ 
  - Garante continuidade espacial
  - Permite comparação multitemporal

## Dados de Entrada:

- **1.941 imagens** Sentinel-2 (junho/2024–abril/2025)
- Filtros: max 40% nuvens, min 2% cobertura
- **Janela temporal:** 5 dias
- **13 Unidades de Conservação**

## Processamento:

- Efetividade:  $E_i = A_i \times P_i \times Q_i$
- Seleção gulosa por janela temporal
- Otimização via PLIM

## CrITÉrios de Qualidade:

- Cobertura mínima: 85%
- Sobreposição entre mosaicos:  $\geq 80\%$
- Exclusividade de imagens
- Penalização por nuvens ( $\gamma$ )

## Saída Esperada:

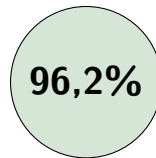
- 6 mosaicos por região
- Sequência temporal consistente
- Alta redução dos dados de entrada

## Redução significativa no número de mosaicos:

Região	Candidatos	Selecionados	Redução (%)
MG-SP-RJ	45	6	86,7%
RS	16	5	68,8%
MT	18	6	66,7%
AL	24	4	83,3%
BA	9	5	44,4%
PI-PE-CE	46	6	87,0%
<b>Total</b>	<b>158</b>	<b>32</b>	

**Destaque:** Eficiência de 96,2% na otimização pelo modelo PLIM, com PI-PE-CE e MG-SP-RJ apresentando maior redução absoluta.

Região/Estado	Candidatos	Selecionados
MG-SP-RJ	45	6
RS	16	5
MT	18	6
AL	24	4
BA	9	5
PI-PE-CE	46	6

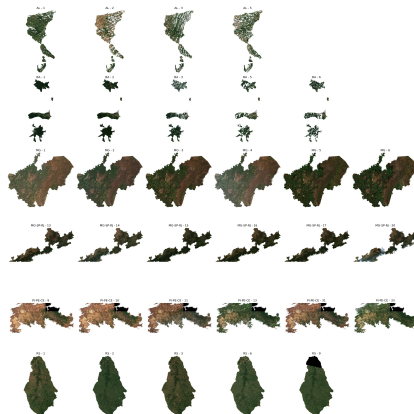


**Redução Média**

## Cobertura, nuvens e qualidade por região:

Região	Cobertura (%)	Nuvens máx. (%)	Qualidade mín. (%)
BA	100,00	18,44	74,65
AL	100,00	21,55	75,09
RS	98,93	3,36	73,08
MG-SP-RJ	89,14	1,86	94,33
PI-PE-CE	92,52	3,26	98,58
MT	100,00	0,00	99,90

- **Melhor caso:** MT (0% nuvens, 99,9% qualidade)
- **Cenário desafiador:** Regiões nebulosas (até 23,68% nuvens máx.)
- **Cobertura média:** >98% (ponderada por área)



**Mosaicos finais selecionados pelo PLIM para todas as regiões.**  
Consistência espacial e temporal garantida para análise multitemporal.



## Contribuições:

- Metodologia híbrida eficiente
- Controle de qualidade automático
- Continuidade espacial garantida
- Aplicável a diferentes UCs

## Aplicações:

- Monitoramento de desmatamento
- Detecção de incêndios
- Mudanças de cobertura
- Análise multitemporal

## Visão ampla da otimização multidimensional:

### Algumas Referências:

- Rodriguez-Puerta et al.: Apenas remoção de nuvens (89,4%)
- Shepherd et al.: Qualidade radiométrica sazonal ( $<0,1\%$  nuvens)
- Combarro-Simon: Heurística gulosa simples

### Contribuições desta Pesquisa:

- Otimização multidimensional
- Sequências temporais consistentes
- Heurística + PLIM híbrida
- Exclusividade de imagens
- Sobreposição garantida ( $\geq 80\%$ )

## Limitações:

- Espaçamento variável entre mosaicos devido ao clima
- Cobertura subótima em regiões com alta nebulosidade
- Dependência de sensoriamento óptico

## Próximos Passos:

- **Integração SAR** para áreas nubladas
- **Janelas temporais maiores** para cobrir lacunas
- **Fusão de imagens** com base em máscaras de nuvens
- Expansão para diferentes perfis climáticos

**Futuro:** Completar mosaicos parcialmente nublados com recortes limpos de outras imagens usando comparação de máscaras de nuvens

# Agradecimentos

Agradecimentos à meus pais, meus orientadores, à Universidade Federal de Alagoas ao Instituto de Computação e à organização do SBPO 2025.

Obrigado à todos presentes!



# Perguntas?