

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

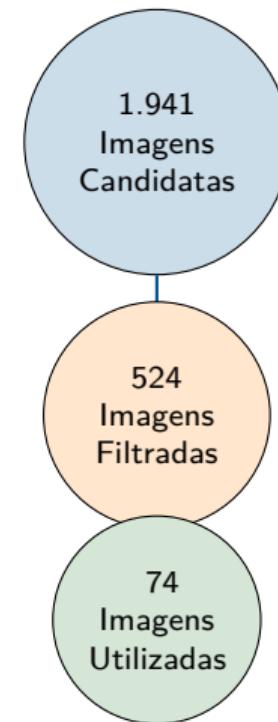


Desafio Principal:

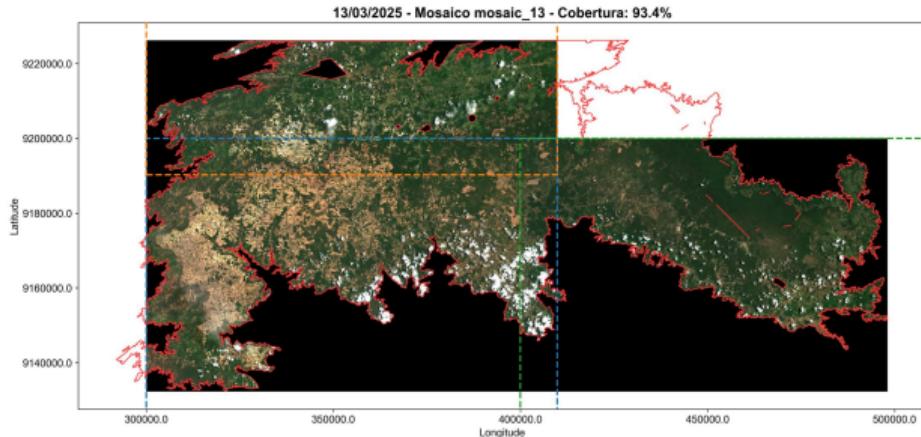
- Como observar **eficientemente** UCs ao longo do tempo?
- Milhares de imagens disponíveis
- Qualidade variável (nuvens, dados faltantes)

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



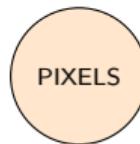
- Cada imagem cobre **parte** da região
- Com sobreposição, criam o **efeito** de uma única imagem
- **Qual a melhor combinação escolher?**

Problema NP-difícil: (Kumar & Ramesh, 1995; Masek, 1978)



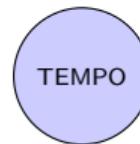
Problema 1

Até 40% da imagem inútil



Problema 2

Dados faltantes/inválidos



Problema 3

Análise multitemporal

Necessário: Selecionar a mesma área em diferentes períodos

Problemas Visuais: Nuvens e Cobertura

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



Visão da otimização multidimensional:

Trabalhos relacionados:

- 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

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:

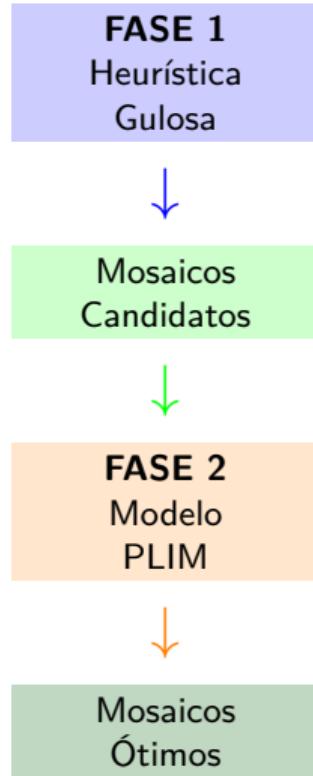
- APA Muricy (129.742 ha)
- APA Santa Rita (9.633 ha)
- APA Catolé (3.708 ha)
- APA Pratagy (20.873 ha)

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:

- 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 $\geq 80\%$

Notação

- 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
- ΔT_{\max} = Janela temporal (5 dias)
- E_i = Efetividade da imagem i
- M_{novo} = Mosaico em construção
- I_{comp} = Imagens compatíveis temporais
- ΔA^{\min} = Incremento mínimo (5%)
- A_M^{alvo} = Cobertura alvo (85%)
- Q_i = Fator de qualidade da imagem i

Algoritmo de Seleção de Mosaicos

Algorithm 1 Seleção de mosaicos candidatos

```
1 Entrada:  $I$ ,  $A$ ,  $\Delta T_{\max}$ ,  $\Delta A^{\min}$ ,  $A_{\text{alvo}}$ ,  $A_M^{\min}$ ,  $N_M^{\max}$ 
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
```

Mosaicos candidatos gerados por região:

UF	UC	Área (ha)	Imagens aceitas	Mosaicos H. Gulosa	Nuvens máx. (%)
MG-SP-RJ	PARNA Mantiqueira	437.192	179	45	37,83
RS	APA Ibirapuitã	318.767	54	16	10,77
MT	PARNA do Pantanal	33.800	52	18	9,12
AL	APAs (4 unidades)	163.956	80	24	38,91
BA	PARNAs + REVIS (4 unid.)	64.687	37	9	38,68
PI-PE-CE	APA + FLONA (2 unid.)	1.058.380	106	46	26,77
Total	13 UCs	2.076.762	524	158	—

- **Entrada:** 1.941 imagens → **Filtradas:** 508 imagens aceitas
- **Gerados:** 158 mosaicos candidatos pela heurística
- **Variação climática:** De 9,12% (MT) até 38,91% (AL) de nuvens

Variáveis do Modelo PLIM

- y_j = Variável binária de seleção do mosaico j
- E_j = Cobertura efetiva do mosaico j
- N_j = Proporção de nuvens do mosaico j
- γ = Peso de penalização por nuvens
- N_{\max} = Número máximo de mosaicos
- $I_{j,k}$ = Sobreposição entre mosaicos j e k

Maximizar:

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

Componentes da função objetivo:

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

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

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%
Total	158	32	

Destaque: Redução de 96,2% das imagens iniciais, com PI-PE-CE e MG-SP-RJ apresentando maior redução absoluta.

Qualidade dos Mosaicos Selecionados

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)

Visualização dos Mosaicos Selecionados



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

Comparação Visual: Qualidade das Imagens

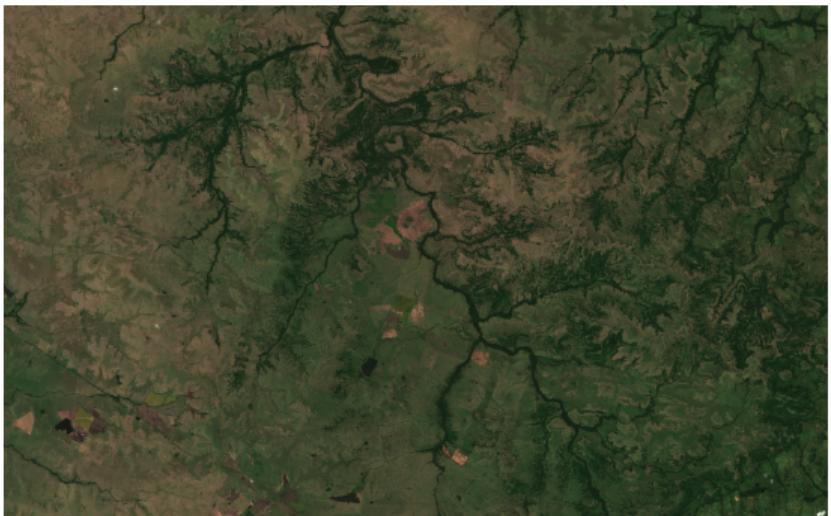
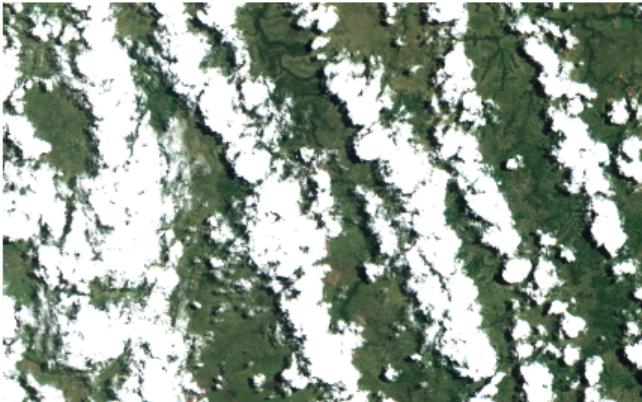


Imagen Limpa — Alta qualidade

Objetivo: Selecionar automaticamente as melhores imagens para cada período, evitando qualidade intermediária e problemas como nuvens/dados faltantes



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

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

Obrigado a todos presentes!



Perguntas?