

Otimização da Observação Ambiental em APAs com Sentinel-2: Integração entre Heurística e Programação Inteira Mista

RESUMO

Este artigo apresenta uma abordagem híbrida para otimização da cobertura de imagens Sentinel-2 (óptico) em Áreas de Proteção Ambiental (APAs) de Alagoas. A metodologia combina uma heurística construtiva gulosa com função de avaliação multicritério para identificação de grupos potenciais de mosaicos Sentinel-2, seguida por uma otimização exata via Programação Linear Inteira Mista (MILP). O objetivo é maximizar a cobertura útil qualificada das áreas monitoradas, considerando cobertura de nuvens, pixels válidos e compatibilidade de órbitas. O modelo MILP incorpora um custo proxy para penalizar a seleção de grupos, representando o desincentivo ao uso de dados SAR (Sentinel-1) como fallback. Os resultados demonstram que a abordagem híbrida proporciona soluções de alta qualidade, equilibrando eficiência computacional e otimalidade na seleção de imagens Sentinel-2.

PALAVRAS CHAVE. Heurística Construtiva Gulosa. Otimização Híbrida. Sensoriamento Remoto. Programação Linear Inteira Mista. Sentinel-2.

Sensoriamento Remoto. Pesquisa Operacional em Meio Ambiente. Otimização Combinatória.

ABSTRACT

This paper presents a hybrid approach to optimize Sentinel-2 image coverage over Environmental Protection Areas (APAs) in Alagoas, Brazil. The methodology combines a greedy constructive heuristic with a multi-criteria evaluation function to identify potential Sentinel-2 mosaic groups, followed by an exact optimization using Mixed-Integer Linear Programming (MILP). The goal is to maximize the qualified useful coverage of monitored areas, considering cloud cover, valid pixels, and orbit compatibility. The MILP model incorporates a proxy cost to penalize the use of Sentinel-1 (SAR) fallback. Results show that the hybrid approach yields high-quality solutions, balancing computational efficiency and optimality in selecting Sentinel-2 imagery.

KEYWORDS. Greedy Constructive Heuristic. Hybrid Optimization. Remote Sensing. Mixed-Integer Linear Programming. Sentinel-2.

Remote Sensing. Environmental Operations Research. Combinatorial Optimization.

1. Introdução

O monitoramento eficiente de Áreas de Proteção Ambiental (APAs) é fundamental para a conservação dos recursos naturais. Este estudo foca nas APAs de Murici, Santa Rita, Catolé e Fernão Velho, e Pratagy, em Alagoas, que somam cerca de 163.956 hectares. O objetivo é otimizar a seleção de imagens Sentinel-2 (ópticas) para maximizar a cobertura útil dessas áreas entre 13 de abril de 2024 e 13 de abril de 2025, considerando limitações climáticas, principalmente a alta cobertura de nuvens, comum na região costeira do estado.

Além da cobertura de nuvens, fatores como qualidade intrínseca dos pixels e sobreposição entre cenas adjacentes são críticos para a composição de mosaicos úteis. Para lidar com isso, o problema foi formalizado como um modelo de Programação Linear Inteira Mista (MILP) multiobjetivo, visando simultaneamente maximizar a cobertura espacial e minimizar nuvens e custo de aquisição, considerando o uso complementar de imagens Sentinel-1 (SAR) como penalidade adicional.

2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo otimizar a seleção de imagens Sentinel-2 para as APAs de Alagoas, por meio de uma abordagem híbrida que:

- Gera combinações iniciais de imagens utilizando heurística construtiva gulosa com avaliação multicritério (cobertura geográfica, qualidade dos pixels, nuvens e compatibilidade orbital);
- Aplica um modelo MILP para selecionar a combinação final de mosaicos, incorporando o uso complementar de Sentinel-1 (SAR) como custo proxy para compensar limitações ópticas.

3. Caracterização das Imagens

Os satélites Sentinel-1 (Radar de Abertura Sintética - SAR) e Sentinel-2 (multiespectral/óptico), componentes do programa Copernicus da Agência Espacial Europeia (ESA), oferecem capacidades complementares para o monitoramento ambiental. Sentinel-2 fornece imagens ópticas de alta resolução espacial (até 10 metros) em 13 bandas espectrais, ideais para análise de vegetação e uso do solo, mas sua aquisição é impedida pela cobertura de nuvens. Sentinel-1, com seu sensor SAR, opera independentemente das condições atmosféricas e de iluminação, fornecendo dados valiosos em regiões com nebulosidade frequente, embora com características de resolução e interpretação distintas das imagens ópticas.

4. Metodologia

4.1. Abordagem Híbrida de Otimização

Nossa metodologia consiste em duas fases para otimizar a seleção de imagens Sentinel-2:

- **Fase 1: Heurística Construtiva Gulosa** - Para reduzir a complexidade combinatória, usamos uma heurística construtiva gulosa baseada em fatores de qualidade extraídos dos metadados (data, nuvens e cobertura geográfica). Li, Liu & Liu propuseram o DD-RSIRA, que gera uma solução inicial ponderando data de aquisição, CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE e extensão territorial, seguida de refinamento por busca local com esquema ganho-perda. Zhang et al. apresentaram um método exato para extrair subconjuntos mínimos de um acervo altamente redundante, formulando o problema como cobertura de conjuntos e resolvendo-o de forma ótima.
- **Fase 2: Otimização Exata via MILP** - Com a lista de candidatos reduzida pela heurística, adotamos um modelo MILP com variáveis binárias para cada grupo de cenas, impondo restrições de cobertura geográfica, limite máximo de nuvens e orçamento. Essa formulação segue diretamente Combarro Simón et al. e incorpora conceitos de agendamento de janelas temporais e transição de atitude de Kim et al.

4.2. Notação Matemática Relevante

Os principais parâmetros e variáveis do modelo incluem:

- C_i : Cobertura efetiva de cada imagem
- C_g : Cobertura geográfica de uma imagem
- P_x : % Pixels válidos de cada imagem
- C_n : Cobertura geográfica normalizada
- Q : Fator de qualidade da imagem
- C_c : % Cobertura de nuvens
- G : Conjunto de grupos de mosaico candidatos
- y_g : Variável binária indicando se o grupo g é selecionado (1) ou não (0)
- E_g : Cobertura geográfica estimada do grupo g
- Q_g : Fator de qualidade médio do grupo g
- β : Peso para penalizar a seleção de qualquer grupo (proxy para custo SAR)

4.3. Fase 1: Heurística Construtiva Gulosa

4.3.1. Classificação de Imagens

As imagens Sentinel-2 são classificadas como "centrais" ou "complementos" com base na cobertura efetiva:

$$C_i = C_g \times P_x \quad (1)$$

4.3.2. Função de Avaliação Multi-Critério

A qualidade de uma imagem candidata é avaliada pela função de efetividade E :

$$E = C_n \times Q \quad (2)$$

Onde C_n é a cobertura normalizada e Q é o fator de qualidade:

$$Q = (1 - C_c) \times P_x \quad (3)$$

4.4. Fase 2: Modelo de Programação Linear Inteira Mista

4.4.1. Função Objetivo

$$\max \left(\sum_{g \in G} (E_g \times Q_g \times y_g) - \alpha \sum_{g \in G} y_g - \beta \sum_{g \in G} y_g \right) \quad (4)$$

4.4.2. Restrições Principais

$$\sum_{g \in G} y_g \leq N_{\max} \quad (5)$$

$$\sum_{g \in G: i \in \text{img}(g)} y_g \leq 1, \quad \forall i \in I' \quad (6)$$

5. Resultados

Observou-se que, com os parâmetros estimados diretamente, o espaço viável definido pelas restrições é bastante restrito, dificultando a obtenção de soluções ótimas viáveis. Para fins de análise geométrica e visualização da estrutura do modelo, aplicou-se um relaxamento controlado das restrições, permitindo identificar o poliedro viável ampliado. Essa abordagem não interfere nos resultados obtidos via programação inteira mista, sendo utilizada apenas para fins exploratórios e de análise da sensibilidade do modelo.

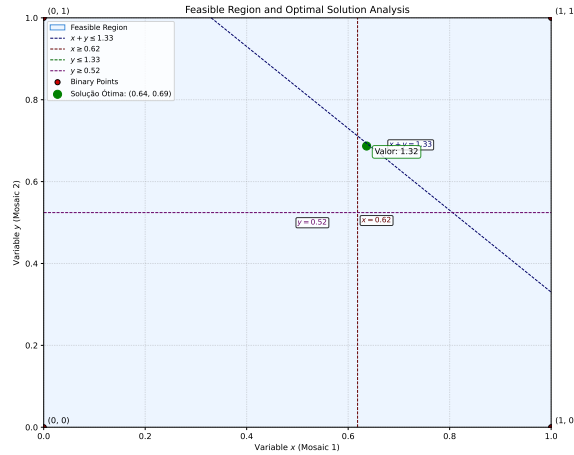


Figura 1: Região viável considerando relaxamento de 0,33 nas restrições: $y_1 + y_2 \leq E_1 + 0,33$, $y_1 \geq Q_1 - 0,33$, $y_2 \leq E_2 + 0,33$, $y_2 \geq Q_2 - 0,33$.

A aplicação da metodologia híbrida resultou na seleção otimizada de grupos de mosaicos Sentinel-2 para a cobertura das APAs estudadas. A fase heurística identificou potenciais combinações de imagens, e a subsequente otimização via MILP selecionou o conjunto final.

5.1. Estatísticas do Processamento e Otimização

- **Total de imagens Sentinel-2 consideradas no período: 310**
- **Potenciais combinações de mosaicos identificadas pela heurística: 40**
- **Total de grupos de mosaico selecionados pela otimização MILP: 24**

A otimização MILP, implementada com o solver CPLEX e utilizando os parâmetros $\alpha = 0.05$ e $\beta = 0.1$, selecionou 24 grupos de mosaicos. Este resultado representa a solução que maximiza a função objetivo (Equação 4), equilibrando a cobertura geográfica estimada (E_g) e o fator de qualidade (Q_g) dos grupos selecionados, ao mesmo tempo que aplica penalidades pelo número de grupos e pelo custo implícito associado ao fallback para SAR (modelado por β).

6. Conclusão

Este artigo apresentou uma abordagem híbrida para otimização da cobertura de imagens Sentinel-2 em APAs de Alagoas, combinando uma heurística construtiva gulosa com função de avaliação multicritério e um modelo MILP. Esta metodologia em duas fases permite lidar com a complexidade combinatória do problema: a heurística identifica eficientemente grupos potenciais de imagens para mosaicos, e o MILP otimiza a seleção final desses grupos pré-definidos.

Os resultados preliminares indicam que a abordagem híbrida proporciona soluções de alta qualidade, equilibrando eficiência computacional e otimalidade. A heurística consegue identificar eficientemente grupos de imagens compatíveis, e o modelo MILP complementa esta análise com uma otimização global, considerando as restrições e guiado por penalidades ajustáveis que permitem modelar trade-offs como o desincentivo ao uso implícito de dados SAR (representado pelo parâmetro β).