

# Adaptação do Modelo Matemático Referente ao Planejamento para Aquisição e *Download* de Dados Espaciais

Maria José Pinto<sup>1</sup>, Mônica Maria De Marchi<sup>1</sup> e Ana Isabel Barros<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Estudos Avançados (IEAv), São José dos Campos/SP – Brasil

<sup>2</sup>TNO, Haia – Holanda

**Resumo** – Este trabalho trata do planejamento para aquisição e *download* de dados, dada uma constelação de satélites e de estações de solo, visando o monitoramento de áreas de interesse (alvos) com diferentes prioridades para um dado horizonte de planejamento. Um modelo matemático foi proposto anteriormente para tratar o problema, onde a capacidade do satélite foi considerada em relação ao tempo total de processamento, mas não em relação à capacidade de armazenamento. Neste trabalho, esta capacidade será modelada e um exemplo ilustrativo será utilizado para validar o novo modelo.

**Palavras-Chave** – Sequenciamento, Aquisição e *Download* de Dados Espaciais, Modelo Matemático.

## I. INTRODUÇÃO

Pesquisas que busquem um melhor gerenciamento dos sistemas espaciais são essenciais para aumentar a soberania e a autonomia do país. Além disso, o emprego de satélites para apoiar o processo de tomada de decisão em diversos cenários de atuação vem se consolidando como uma realidade e tem norteado as pesquisas aplicadas dentro deste contexto, dado o enorme potencial de expansão para novos papéis, tanto no âmbito da defesa como em aplicações no meio civil.

Buscando contribuir com estas pesquisas, este trabalho propõe apoiar o processo de tomada de decisão quanto ao planejamento para aquisição e *download* de dados por uma constelação de satélites e estações de solo associadas para monitorar diferentes locais (alvos) com diferentes prioridades em um determinado horizonte de planejamento. O problema foi modelado matematicamente em [1], buscando respeitar restrições referentes às janelas de visibilidade, à precedência entre aquisição e *download* e à capacidade de tempo de processamento dos satélites. O modelo também formula explicitamente os requisitos *revisit time* - RT (tempo entre as aquisições sucessivas do mesmo alvo) e *due time* - DT (último momento para que os dados coletados sejam descarregados para uma estação de solo).

O problema pode ser resolvido de forma independente, ou seja, primeiro planeja-se como os dados serão adquiridos e depois como eles serão transferidos para as estações de solo. Entretanto, tratá-los desta forma pode resultar em uma solução infactível na prática. Além de [1], outros trabalhos tratam o problema de forma integrada como os trabalhos [2]-[5], ou seja, considerando tanto a aquisição das imagens quanto a transferência dos dados coletados para as estações de solo, mas nestes trabalhos, nem todos apresentam um modelo matemático para o problema ou consideram as restrições para tratar RT e DT.

M. J. Pinto, maju@ieav.cta.br; M. M. De Marchi, monica@cta.br.br; A. I. Barros, ana.barros@tno.nl.

O modelo matemático proposto em [1] não trata da capacidade de armazenamento do satélite, assumindo que esta não seria uma limitação para o problema. Entretanto, dependendo do volume de dados adquiridos é importante considerar a capacidade de armazenamento, a qual poderia permitir que novos dados sejam adquiridos considerando que espaços de armazenamento são liberados à medida que os dados já coletados são descarregados para as estações de solo.

O modelo proposto em [1] é apresentado na Seção II juntamente com a inclusão das restrições de capacidade de armazenamento. Na Seção III, o modelo é aplicado em um exemplo ilustrativo e, na Seção IV, algumas considerações finais e propostas de trabalhos futuros são apresentadas.

## II. ADAPTAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

Antes de propormos a restrição para tratar da capacidade de armazenamento, o modelo matemático proposto em [1] é apresentado novamente a seguir. Neste modelo, as seguintes variáveis são consideradas:

$H$	→	Horizonte de planejamento
$ATW$	→	Conjunto de janelas de visibilidade para aquisição
$DTW$	→	Conjunto de janelas de visibilidade para <i>download</i>
$T$	→	Conjunto de alvos
$p_i \geq 0$	→	Prioridade do alvo $i$ , $i \in T$
$S$	→	Conjunto de satélites heterogêneos da constelação
$S_i$	→	Conjunto de satélites que podem adquirir o alvo $i$ , $i \in T$
$G$	→	Conjunto de estações de solo
$G_j$	→	Conjunto de estações de solo que podem receber as informações coletadas pelo satélite $j$ , $j \in S_i$
$A_{ij}$	→	Conjunto contendo as janelas de visibilidade em que o alvo $i$ pode ser adquirido pelo satélite $j$ , $i \in T$ , $j \in S_i$
$D_{jg}$	→	Conjunto contendo as janelas de visibilidade em que o dado adquirido pelo satélite $j$ pode ser descarregado para a estação de solo $g$ , $j \in S_i$ , $g \in G_j$

- $[a_t, \bar{a}_t]$  → Corresponde ao tempo inicial e final da  $t$ -ésima janela de visibilidade para aquisição ( $a_t, \bar{a}_t \in \mathbb{R}^+$ ;  $t=1 \in ATW$ )
- $[b_d, \bar{b}_d]$  → Corresponde ao tempo inicial e final da  $d$ -ésima janela de visibilidade para *download* ( $b_d, \bar{b}_d \in \mathbb{R}^+$ ;  $d=1 \in DTW$ )
- $RT_i$  → *Revisit time* do alvo  $i$  ( $RT_i \geq 0$ ). Observe que, para  $RT_i > 0$ , o alvo  $i$  poderá ser visitado, no máximo,  $AD_i$  vezes dentro do horizonte de planejamento  $H$ , onde:  $AD_i = \left\lceil \frac{H}{RT_i} \right\rceil$ ,  $AD_i \in \mathbb{N}$ ,  $i=1 \in T$
- $DT_{ik}$  → *Due time* para a  $k$ -ésima aquisição do alvo  $i$  ( $DT_{ik} \geq 0$ ),  $i=1 \in T$ ,  $k=1, \dots, AD_i$
- $V_i$  → Volume de dados do alvo  $i$  (Mbit),  $i=1 \in T$
- $AP_j$  → Tempo de processamento do satélite  $j$  para processar os dados referentes ao alvo  $i$  (em Mbit/min),  $i=1 \in T$ ,  $j=1 \in S_j$
- $DP_{jg}$  → Tempo de processamento do satélite  $j$  para descarregar os dados do satélite  $j$  para a estação de solo  $g$  (em Mbit/min),  $j=1 \in S_j$ ,  $g \in G_j$
- $C_j$  → Capacidade de tempo de processamento do satélite  $j$  durante o horizonte de planejamento  $H$ ,  $j=1 \in S_j$

Assumindo que a aquisição e o *download* de dados dependem principalmente do tamanho do dado, o tempo de processamento para adquirir e descarregar os dados será, respectivamente:  $M_{ij} = V_i/AP_j$  e  $S_{ijg} = V_i/DP_{jg}$ .

Considere ainda as seguintes variáveis de decisão:

- $x_{ikjt} \in \{0,1\}$  → indica que a  $k$ -ésima aquisição do alvo  $i$  será obtida pelo satélite  $j$  na janela de visibilidade  $t$  ( $i \in T$ ;  $k=1, \dots, AD_i$ ;  $j \in S_i$ ;  $t \in A_{ij}$ );
- $y_{ikjgd} \in \{0,1\}$  → indica que a  $k$ -ésima aquisição do alvo  $i$  adquirida pelo satélite  $j$  será descarregada para a estação de solo  $g$  na janela de visibilidade  $d$  ( $i \in T$ ;  $k=1, \dots, AD_i$ ;  $j \in S_i$ ;  $g \in G_j$ ;  $d \in D_{jg}$ );
- $AW_{ikj} \geq 0$  → indica o momento inicial da  $k$ -ésima aquisição do alvo  $i$  pelo satélite  $j$  ( $i \in T$ ;  $k=1, \dots, AD_i$ ;  $j \in S_i$ );
- $DW_{ikjg} \geq 0$  → indica o momento inicial que a  $k$ -ésima aquisição do alvo  $i$  adquirida pelo satélite  $j$  será descarregada para a estação de solo  $g$  ( $i \in T$ ;  $k=1, \dots, AD_i$ ;  $j \in S_i$ ;  $g \in G_j$ );

O problema de sequenciamento para tratar tanto a aquisição quanto o *download* de dados proposto em [1] é apresentado a seguir.

$$\text{Max} \sum_{i \in T} p_i \sum_{k=1}^{AD_i} \sum_{j \in S_i} \sum_{t \in A_{ij}} x_{ikjt} \quad (1)$$

s.a.:

$$\sum_{j \in S_i} \sum_{t \in A_{ij}} x_{ikjt} = \sum_{j \in S_i} \sum_{g \in G_j} \sum_{d \in D_{jg}} y_{ikjgd} \leq 1, \quad i \in T, k = 1, \dots, AD_i \quad (2)$$

$$\sum_{j \in S_i} \sum_{t \in A_{ij}} x_{i,k+1,j,t} \leq \sum_{j \in S_i} \sum_{t \in A_{ij}} x_{ikjt}, \quad i \in T, k = 1, \dots, AD_i - 1 \quad (3)$$

$$\sum_{t \in A_{ij}} a_t x_{ikjt} \leq AW_{ikj} \leq \sum_{t \in A_{ij}} (\bar{a}_t - M_{ij}) x_{ikjt}, \quad i \in T, k = 1, \dots, AD_i, j \in S_i \quad (4)$$

$$\sum_{d \in D_{jg}} b_d y_{ikjgd} \leq DW_{ikjg} \leq \sum_{d \in D_{jg}} (\bar{b}_d - S_{ijg}) y_{ikjgd}, \quad i \in T, k = 1, \dots, AD_i, j \in S_i, g \in G_j \quad (5)$$

$$\sum_{j \in S_i} AW_{i,k+1,j} \geq \sum_{j \in S_i} AW_{ikj} + RT_i \sum_{j \in S_i} \sum_{t \in A_{ij}} x_{ikjt}, \quad i \in T, k = 1, \dots, AD_i - 1 \quad (6)$$

$$DW_{ikjg} + S_{ijg} \sum_{d \in D_{jg}} y_{ikjgd} \leq DT_{ik}, \quad i \in T, k = 1, \dots, AD_i, j \in S_i, g \in G_j \quad (7)$$

$$AW_{ikj} + M_{ij} \sum_{t \in A_{ij}} x_{ikjt} \leq \sum_{g \in G_j} DW_{ikjg}, \quad i \in T, k = 1, \dots, AD_i, j \in S_i \quad (8)$$

$$\sum_{i \in T} \sum_{k=1}^{AD_i} \sum_{t \in A_{ij}} M_{ij} x_{ikjt} + \sum_{i \in T} \sum_{k=1}^{AD_i} \sum_{g \in G_j} \sum_{d \in D_{jg}} S_{ijg} y_{ikjgd} \leq C_j, \quad j \in S \quad (9)$$

O objetivo do problema (1) consiste em maximizar a soma das prioridades dos alvos que tenham sido adquiridos e enviados para uma estação de solo. As restrições (2) garantem que a obtenção dos dados de um alvo é considerada completa quando estes dados são adquiridos e enviados a uma estação de solo. Além disso, estas restrições garantem que cada alvo será adquirido (por um satélite em uma janela de aquisição) e descarregado (para uma estação de solo em uma janela de *download*), no máximo uma vez. As restrições (3) garantem que, se o alvo  $i$  é adquirido a  $k$ -ésima vez ( $x_{ikjt}=1$ ), este alvo pode ser adquirido a  $(k+1)$ -vez ou não ( $x_{i,k+1,j,t}=0$  or  $x_{i,k+1,j,t}=1$ ), mas também garante que se for mais de uma vez a ordem das aquisições seguirão uma ordem cronológica, ou seja, não permite, por exemplo, que a segunda aquisição ocorra e a primeira não. As restrições (4) e (5) garantem que o tempo total de aquisição/*download* respeitem os respectivos limites das janelas de visibilidade. As restrições (6) garantem que o tempo de revisita entre as aquisições de cada alvo seja respeitado (*revisit time*). As restrições (7) garantem que os dados adquiridos do alvo serão transferidos para a estação de solo dentro do prazo solicitado

(due time). Vale ressaltar que as restrições (6) e (7) não são normalmente consideradas nos modelos da literatura. Entretanto, estes requisitos operacionais do cenário precisam ser abordados para derivar um modelo que possa ser aplicado na prática. As restrições (8) impõem a precedência entre aquisição e *download*, ou seja, os dados de um alvo específico podem ser transferidos de um satélite para uma estação de solo somente se já tiverem sido adquiridos anteriormente por aquele satélite. As restrições (9) garantem que o tempo de processamento total do satélite não exceda sua capacidade dentro do horizonte de planejamento.

No modelo (1)-(9) assume-se que  $a_t > 0$  e  $b_d > 0$ . Desta forma,  $AW_{ikj} = DW_{ikjg} = 0$  significará que os dados do  $k$ -ésimo alvo não serão adquiridos e nem descarregados.

As janelas de visibilidade podem ser obtidas através de alguma ferramenta de modelagem de sistemas espaciais, como o STK (do inglês, *Systems Tool Kit*) [6]. Este tipo de ferramenta calcula, para determinados parâmetros do satélite/sensor, os diferentes períodos de tempo (janelas de visibilidade) que os alvos são cobertos dentro do horizonte de planejamento (para mais detalhes sobre os conceitos e modelos que definem esta cobertura, veja [7]).

O modelo (1)-(9) busca atender, através das restrições (9) a capacidade de tempo de processamento dos satélites, mas não considera a capacidade de armazenamento e, como será ilustrado na Seção III, considerar esta capacidade pode ser fundamental para que mais dados sejam adquiridos já que dados podem ser descarregados para as estações de solo durante o planejamento. Para isto, as restrições (10) precisam ser atendidas.

$$\sum_{i \in T} \sum_{k=1}^{AD_i} \sum_{t \in A_{ij}} \sum_{a_t \leq a_i} V_i x_{ikjt} - \sum_{i \in T} \sum_{k=1}^{AD_i} \sum_{g \in G_j} \sum_{d \in D_{jg}} \sum_{b_d \leq a_i} V_i y_{ikjgd} \leq SC_j, \quad (10)$$

$j \in S, l \in TW$

onde:

$TW \rightarrow$  Conjunto contendo o tempo inicial de todas as janelas de visibilidade para aquisição, ordenadas, ou seja,  $TW$  contém todos os elementos de  $[a_t]$ , ordenados no tempo, considerando todo o horizonte de planejamento;

$SC_j \rightarrow$  Capacidade de armazenamento do satélite  $j$ .

As restrições (10) garantem, para cada satélite, que em cada instante possível de aquisição (tempo inicial de cada janela de visibilidade para aquisição), o volume de dados a ser adquirido naquele instante mais o que já foi adquirido até aquele instante menos o que já foi descarregado para alguma das estações de solo não ultrapasse a capacidade total de armazenamento daquele satélite.

### III. EXEMPLO ILUSTRATIVO

Um exemplo aleatório foi gerado para ilustrar a relevância de incluir as restrições (10) e mostrar sua viabilidade. Desta forma, considere um horizonte de planejamento de 3 dias, três alvos (T1, T2 e T3), dois satélites (S1, S2) e uma estação

de solo (ES), sendo 17 janelas de visibilidade geradas: 11 janelas para aquisição (A1 a A11) e 6 janelas para *download* (D1 a D6), conforme detalhado nas Tabelas I e II, respectivamente, onde as colunas  $S$ ,  $J$ ,  $T$ ,  $D$  e  $DJ$  representam, respectivamente: o satélite; a janela de visibilidade; o alvo; o dia da respectiva janela dentro do horizonte de planejamento; e, a duração da janela (em minutos).

TABELA I. JANELAS DE VISIBILIDADE PARA AQUISIÇÃO DE DADOS PARA CADA SATÉLITE.

$S$	$J$	$T$	Início			Final			$DJ$
			$D$	Hora/min	Em min	$D$	Hora/min	Em min	
1	A1	2	1	16h45m	1005	1	16h49m	1009	4
	A2	3	1	16h55m	1015	1	16h59m	1019	4
	A3	1	2	6h30m	1830	2	6h34m	1834	4
	A4	2	2	16h55m	2455	2	17h01m	2461	6
	A5	1	3	6h58m	3298	3	7h02	3302	4
	A6	3	3	16h55m	3895	3	17h00m	3900	5
2	A7	1	1	10h24m	624	1	10h29m	629	5
	A8	3	1	14h34m	874	1	14h37m	877	3
	A9	1	2	11h16m	2116	2	11h21m	2121	5
	A10	1	3	11h43m	3583	3	11h48m	3588	5
	A11	3	3	15h00m	3780	3	15h03m	3783	3

TABELA II. JANELAS DE VISIBILIDADE PARA *DOWNLOAD* DE DADOS PARA A ESTAÇÃO DE SOLO.

$J$	$S$	Início			Final			$DJ$
		$D$	Hora/min	Em min	$D$	Hora/min	Em min	
D1	1	1	23h57min	1437	2	0h02min	1442	5
D2		3	0h00min	2880	3	0h04min	2884	4
D3		3	23h57min	4317	3	24h0min	4320	3
D4	2	1	1h37m	1537	1	1h41min	1541	4
D5		2	23h38min	2858	2	23h45min	2865	7
D6		3	23h46min	4306	3	23h50min	4310	4

As janelas de visibilidade também podem ser representadas em um histograma de cobertura como mostra a Fig. 1, facilitando a interpretação e a análise.

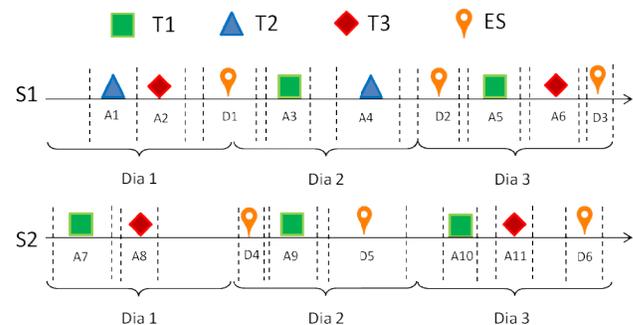


Fig. 1: Histograma de cobertura para o exemplo ilustrativo.

Considere ainda as informações referentes a  $RT$  e  $DT$ , para cada alvo, disponíveis na Tabela III. No caso, o valor apresentado para  $RT$  na tabela indica de quanto em quanto tempo o alvo precisa ser visitado, por exemplo, de 1 em 1 dia ou de 2 em 2 dias. O valor de  $RT$  definirá  $AD$ , conforme também apresentado na Tabela III. No caso do  $DT$ , o valor na

tabela indica o momento (em minutos) dentro do horizonte de planejamento de 3 dias (que corresponde a um total de 4320 minutos) até quando cada uma das aquisições do alvo (dados coletados) precisam ser descarregados. No caso dos alvos que precisam ser observados mais de uma vez durante o horizonte de planejamento, o valor DT será definido para cada uma das observações.

TABELA III. REVISIT TIME E DUE TIME PARA CADA ALVO.

T	RT	AD	Observação	DT
1	1	3	1	Início do segundo dia (1600 min)
			2	Final do segundo dia (2880 min)
			3	Final do terceiro dia (4320 min)
2	3	1	1	Final do segundo dia (2880 min)
3	2	2	1	Início do segundo dia (1500 min)
			2	Final do terceiro dia (4320 min)

Por simplificação, definimos um tempo de 1 minuto para processar os dados dos alvos para ambos os satélites e um tempo de 0,5 minutos para fazer o *download* dos dados, independente de qual satélite irá adquirir o alvo. Também consideramos as prioridades todas iguais a 1 e um valor para a capacidade de processamento, para ambos os satélites, suficiente para adquirir todos os dados.

A solução obtida com o modelo (1)-(9), que foi implementado no AMPL [7], está representada na Tabela IV. A coluna S indica qual satélite irá adquirir os dados do alvo e, a quinta e sétima colunas, denominadas de “Início”, indicam, respectivamente, quando exatamente a aquisição ou o *download* terão início dentro da respectiva janela de aquisição (colunas J).

TABELA IV. SOLUÇÃO DO MODELO (1)-(9) PARA O EXEMPLO ILUSTRATIVO.

T	Observação	S	Aquisição		Download	
			J	Início	J	Início
1	1	2	A7	624	D4	1537
	2	2	A9	2116	D5	2858
	3	2	A10	3583	D6	4306
2	1	1	A1	1005	D1	1437
3	1	1	A2	1015	D1	1437
	2	1	A6	3895	D3	4317

Observe que a solução definiu a obtenção de todos os dados de todos os alvos. No caso, o alvo 2 e a primeira observação do alvo 3 foram descarregados na mesma estação de solo. Isto é possível pois estamos assumindo que o *download* de dados para a estação de solo é feito em pacotes e, desta forma, os dados de alvos diferentes podem ser descarregados simultaneamente, desde que respeitem o tamanho da janela de visibilidade referente ao tempo para *download* do satélite, que é o caso.

Ao incluirmos as restrições (10) ao modelo e definirmos uma capacidade de armazenamento de 100 Mbits para os dois satélites ( $SC_1 = SC_2 = 100$ ) e que os alvos 1, 2 e 3 possuem, respectivamente, um volume de dados de 10, 20 e 30 Mbits ( $V_1 = 10$ ;  $V_2 = 20$  e  $V_3 = 30$ ), a mesma solução descrita na Tabela IV é obtida, mostrando que a capacidade de 100 Mbits permite esta solução. Entretanto, se reduzirmos esta capacidade para 40 Mbits, o alvo 2 deixa de ser adquirido, como mostra a Tabela V.

 TABELA V. SOLUÇÃO DO MODELO (1)-(10) COM  $SC = 40$ .

T	Observação	S	Aquisição		Download	
			J	Início	J	Início
1	1	2	A7	624	D4	1537
	2	2	A9	2116	D5	2858
	3	2	A10	3583	D6	4306
3	1	1	A2	1015	D1	1437
	2	1	A6	3895	D3	4317

Isto ocorreu pois os dados do alvo 2 e a primeira aquisição do alvo 3 somente podem ser descarregados utilizando a janela de *download* D1 pois é a única janela que permite atender o *due time* destes alvos (veja Tabela III). Desta forma, quando reduzimos a capacidade de armazenamento do satélite para 40 Mbits, esta capacidade seria excedida se estes alvos fossem adquiridos usando as janelas A1 e A2, pois o volume total de dados seria de 50 Mbits. Com isto, somente uma das aquisições será feita e o método define que as duas observações do alvo 3 serão adquiridas e que a demanda do alvo 2 não será atendida.

O conjunto TW para este exemplo ilustrativo está representado na Tabela VI. Como comentado anteriormente, este conjunto contém as janelas de visibilidade de aquisição A1-A11 ordenadas no tempo, considerando todo o horizonte de planejamento de 3 dias.

TABELA VI. REPRESENTAÇÃO DO CONJUNTO TW - EXEMPLO ILUSTRATIVO.

J	TW (em min)
A7	624
A8	874
A1	1005
A2	1015
A3	1830
A9	2116
A4	2455
A5	3298
A10	3583
A11	3780
A6	3895

Um último teste foi então realizado aumentando 50 minutos para o *due time* referente à primeira aquisição do alvo 3, resultando em  $DT_{31} = 1550$  minutos. Com isto, os dados da primeira aquisição do alvo 3 podem agora ser adquiridos usando a janela A8 e descarregados usando a janela D4, permitindo que o alvo 2 seja descarregado utilizando a janela D1, como mostra a Tabela VII.

 TABELA VII. SOLUÇÃO DO MODELO (1)-(10) COM  $SC = 40$  E  $DT_{31} = 1550$ 

T	Observação	S	Aquisição		Download	
			J	Início	J	Início
1	1	2	A7	624	D4	1537
	2	2	A9	2116	D5	2858
	3	2	A10	3583	D6	4306
2	1	1	A1	1005	D1	1437
3	1	1	A8	874	D4	1537
	2	1	A6	3895	D3	4317

#### IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, uma nova restrição para considerar a capacidade de armazenamento dos satélites é proposta para ser adicionada ao modelo matemático proposto em [1], de forma a gerar um sequenciamento mais eficiente para uma constelação de satélites para adquirir e descarregar dados de alvos diferentes com prioridades diferentes, levando em conta restrições operacionais como DT e RT.

O modelo, incluindo a nova restrição, foi aplicado em um exemplo ilustrativo para mostrar a relevância de incluir as restrições de armazenamento e para validar o novo modelo. O próximo passo do trabalho será aplicar o novo modelo em outros cenários como em cenários de Segurança e Defesa que envolvam monitoramento constante para permitir ações de mitigação como em cenários de busca e salvamento ou nos cenários tratados em [1] que consideram áreas de fronteira, de desmatamento e de derramamento de óleo.

Além disso, pretende-se incluir no modelo outras adaptações para tornar o modelo ainda mais representativo para diferentes situações práticas. Estas adaptações incluem a inclusão de tempos de transição como, por exemplo, quando aquisições consecutivas de um mesmo satélite necessitarem de diferentes modos de aquisição ou de forma a permitir movimentos do sensor para aquisições consecutivas de alvos próximos ou para que as estações de solo recebam dados de diferentes satélites ou, ainda, para que um mesmo satélite descarregue seus dados para diferentes estações de solo. Em seguida, pretende-se obter instâncias reais e com mais dados para verificar a complexidade do modelo e, caso seja necessário, desenvolver abordagens heurísticas para tratar o problema.

#### REFERÊNCIAS

- [1] M. J. Pinto, A. I. Barros, R. Noomen, P. H. A. J. M. van Gelder, T. Lamballais Tessensohn, "A new model proposal for integrated satellite constellation scheduling within a planning horizon given operational constraints", Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Operations Research and Enterprise Systems (ICORES), p. 312-319, 2018. ISBN 978-989-758-285-1. DOI: 10.5220/0006655003120319.
- [2] D-H Cho, J-H Kim, J-L Choi, J. Ahn, "Optimization-based scheduling method for agile earth-observing satellite constellation", Journal of Aerospace Information Systems, vol. 15, p. 611-626, 2018.
- [3] H. Kim, J. K. Chang, "Mission scheduling optimization of SAR satellite constellation for minimizing system response time. Aerospace Science and Technology", vol. 40, p. 17-32, 2015.
- [4] P. Wang, G. Reinelt, G., "Solving the earth observing satellite constellation scheduling problem by branch-and-price", Operations Research Proceedings 2010, Springer, Berlin, Heidelberg, p. 491-496, 2011.
- [5] P. Wang, G. Reinelt, P. Gao, Y. Tan, Y., "A model, a heuristic and a decision support system to solve the scheduling problem of an earth observing satellite constellation". Computers & Industrial Engineering, vol. 61, p. 322-335, 2011.
- [6] AGI Products: STK - Systems Tool Kit. Disponível em: <<https://agi.com/products>>. Acesso em: Junho de 2019.
- [7] J. R. Wertz, Orbit & Constellation, Design & Management. Space Technology Library. Microcosm/Kluwer, 2009.
- [8] AMPL: Streamlined modeling for real optimization. Disponível em: <[www.ampl.com](http://www.ampl.com)>. Acesso em: junho de 2019.