

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, NATURAIS E DA SAÚDE
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO**

DILEAN DO ROSÁRIO DECOTHÉ

**ADAPTIVE LARGE NEIGHBORHOOD SEARCH PARA
RESOLUÇÃO DE UM PROBLEMA DE ROTAÇÃO DE
CULTURAS COM RESTRIÇÕES DE ADJACÊNCIAS**

ALEGRE – ES

2016

DILEAN DO ROSÁRIO DECOTHÉ

**ADAPTIVE LARGE NEIGHBORHOOD SEARCH PARA
RESOLUÇÃO DE UM PROBLEMA DE ROTAÇÃO DE
CULTURAS COM RESTRIÇÕES DE ADJACÊNCIAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Computação do Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Sistemas de Informação.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Regis Mauri.

ALEGRE – ES

2016

DILEAN DO ROSÁRIO DECOTHÉ

**ADAPTIVE LARGE NEIGHBORHOOD SEARCH PARA
RESOLUÇÃO DE UM PROBLEMA DE ROTAÇÃO DE
CULTURAS COM RESTRIÇÕES DE ADJACÊNCIAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Computação do Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Sistemas de informação.

Aprovado em 28 de novembro de 2016.

BANCADA EXAMINARODA

Prof. Dr. Geraldo Regis Mauri
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. M.Sc. Dayan de Castro Bissoli
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. M.Sc. Edmar Hell Kampke
Universidade Federal do Espírito Santo

“Obstáculo é aquilo que você enxerga quando tira os olhos do seu objetivo.”

Henry Ford

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar sempre ao meu lado, guiando-me e dando saúde para superar meus os desafios diários.

A minha mãe que desde criança me ensinou que não se deve desistir sem antes tentar, por me incentivar a sempre continuar e por ceder seus ouvidos para ouvir atentamente minhas ladainhas sobre tecnologia, mesmo não entendendo nada.

A minha irmã que por muito tempo me manteve financeiramente, e sem ela não poderia ter chegado até aqui.

A esta universidade que me permitiu expandir meus conhecimentos na área de TI.

Ao corpo docente do DCOMP que mostrou o caminho do conhecimento e me fez ter vontade de trilha-lo.

A empresa Click Júnior pela oportunidade de experimentar a vivencia em um ambiente de empresa e aprender a lidar com as opiniões divergentes.

Ao professor Geraldo Regis Mauri, pela atenção com a qual me recebia em sua sala, parando seus afazeres para me receber e sanar dúvidas, desde o projeto até este trabalho de conclusão de curso.

E por todas adversidades que passei, pois sem elas não haveria o que superar.

A todos, muito obrigado.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma nova alternativa para a resolução do Problema de Rotação de Culturas com Restrições de Adjacências (PRC-A). O PRC-A consiste em elaborar um calendário de plantio no qual um conjunto de diferentes espécies de culturas é disposto em uma mesma área, dividida em lotes, obedecendo algumas restrições. O objetivo é encontrar uma programação de plantio que garanta a produção agrícola sustentável, maximizando os ganhos de lucratividade. Para solucionar o problema, é utilizada a meta-heurística *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) que, mesmo sendo um método recente, vem apresentando bons resultados quando aplicado a outros problemas complexos encontrados na literatura. Para avaliar o desempenho do ALNS aplicado ao PRC-A, os resultados obtidos via testes computacionais são comparados com resultados de outros trabalhos e/ou métodos encontrados na literatura.

Palavras-chave: *Adaptive Large Neighborhood Search*; Rotação de Culturas; Problema de Rotação de Culturas com Restrições de Adjacências.

ADAPTIVE LARGE NEIGHBORHOOD SEARCH FOR SOLVING A CROP ROTATION PROBLEM WITH ADJACENCY CONSTRAINTS

ABSTRACT

This work aims to present a new alternative to solve a Crop Rotation Problem with Adjacency Constraints (PRC-A). The PRC-A consists of drawing up a timetable for planting considering a set of different kinds of cultures to be planted in a same area, divided in batches, obeying some restrictions. The goal is finding a planting schedule to ensure a sustainable agricultural production and maximizing the profitability gains. To solve the problem, an Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) metaheuristic is used due to the fact that it has been showing good results when applied to other complex problems found in the literature. The performance of ALNS is evaluated by applying it to solve the PRC-A, and the results obtained by computational tests are compared with results from other works and/or methods found in the literature.

Keywords: Adaptive Large Neighborhood Search; Crop rotation; Crop rotation problem with adjacency constraints

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pseudocódigo ALNS.....	22
Figura 2 - Modelagem computacional da matriz de solução.	23
Figura 3 - Exemplo de solução.....	24
Figura 4 - Pseudocódigo da HDR.....	27
Figura 5 - Pseudocódigo da HDPL.....	27
Figura 6 - Pseudocódigo da HDQA.	28
Figura 7 - Pseudocódigo da HDS.....	29
Figura 8 - Relação de adjacência entre lotes de cada instancia.	32
Figura 9 - Melhor programação de plantio - ALNS - 10 lotes.	36
Figura 10 - Melhor programação de plantio - ALNS - 15 lotes.	36
Figura 11 - Melhor programação de plantio - ALNS - 20 lotes.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros utilizados pelo ALNS.....	21
Tabela 2 - Exemplo culturas disponíveis.....	23
Tabela 3 - Área (em ha) dos lotes.....	32
Tabela 4 - Culturas disponíveis para o plantio.	33
Tabela 5 - Parâmetros utilizados pelo ALNS.....	35
Tabela 6 - Penalização da função objetivo.....	35
Tabela 7 - Resultados obtidos por meio de 50 execuções da ALNS proposta.....	36
Tabela 8 - Comparação das soluções do ALNS com outros métodos da literatura. .	38
Tabela 9 - Comparação dos tempos médios obtidos.	38

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. O PROBLEMA E SUA IMPORTÂNCIA.....	12
1.2. OBJETIVOS.....	14
1.2.1. Objetivo Geral	15
1.2.2. Objetivos Específicos	15
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2. REVISÃO DA LITERATURA	16
3. MODELAGEM MATEMÁTICA	18
4. METODOLOGIA	21
4.1. PRINCIPAIS COMPONENTES DO ALNS.....	24
4.1.1. Solução Inicial	24
4.1.2. Vizinhança Ampla	24
4.1.3. Busca Adaptativa	24
4.1.4. Ajuste de Pesos	24
4.1.5. Função Objetivo Penalizada	25
4.1.6. Critérios de Aceitação	26
4.2. HEURÍSTICAS DE DESTRUIÇÃO	26
4.2.1. Heurística de Destruição de Lotes Randômica (HDR)	26
4.2.2. Heurística de Destruição de Lotes Baseada no Pior Lote (HDPL)	27
4.2.3. Heurística de Destruição de Lotes Baseada na Quantidade de Adjacências (HDQA)	28
4.2.4. Heurísticas de Destruição de Shaw (HDS)	28
4.3. HEURÍSTICAS DE RECONSTRUÇÃO	30
4.3.1. Heurística de Reconstrução de Lotes Aleatória (HRLA)	31
4.3.2. Heurística de Reconstrução de Lotes Priorizando Pior Valor (HRPV) ..	31

4.3.3. Heurística de Reconstrução de Lotes Priorizando Pior Lucro (HRPL)..	31
4.3.4. Heurística de Reconstrução de Lotes Priorizando Tamanho (HRT).....	31
4.3.5. Heurísticas de Reconstrução de Lotes Gulosa (HRG).....	31
4.4. EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS.....	32
5. RESULTADOS OBTIDOS.....	35
5.1. RESULTADOS COMPUTACIONAIS.....	35
5.2. COMPARAÇÃO COM A LITERATURA.....	37
6. CONCLUSÕES	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41

1. INTRODUÇÃO

Problemas de Otimização Combinatória (OC), em geral, exploram um vasto conjunto de soluções a fim de maximizar ou minimizar uma função matemática que é regida por restrições que ditam o comportamento de suas variáveis.

Dado o esforço computacional exigido para verificar todas as possíveis soluções de um problema de OC, torna-se inviável a procura da melhor solução. Esse cenário contribuiu para o surgimento de métodos heurísticos que evitam a verificação de todos os elementos do domínio.

Chaves (2009) afirma que heurísticas são boas ferramentas para solucionar problemas de otimização, possibilitando encontrar boas soluções em tempo computacional aceitável.

Segundo Memmah *et al.* (2015), heurísticas normalmente são específicas para um determinado problema, e utilizam informações do problema tratado para orientar sua busca por melhores soluções, de modo que, para cada novo problema, uma nova heurística deve ser criada.

A limitação do uso de heurísticas para um problema específico motivou o desenvolvimento das meta-heurísticas, algoritmos que não assumem qualquer propriedade matemática do problema tratado, possibilitando lidar com um grande número de problemas de otimização.

Partindo dessa premissa, este trabalho propõe o uso da meta-heurística *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) para encontrar um cronograma de plantio de culturas que maximize a lucratividade, atendendo um conjunto de restrições.

1.1. O PROBLEMA E SUA IMPORTÂNCIA

O sistema de monocultura, que desde o período colonial é a principal base da agricultura brasileira, foi modernizado e intensificado em meados da década de 60 pelo uso de insumos agrícolas para otimizar a produção de alimentos no mundo (ROMEIRO, 1996).

Contudo, a partir da década de 70, começaram a surgir as primeiras conscientizações dos sérios problemas decorrentes da adoção desses insumos,

como: degradação da capacidade produtiva dos solos, contaminação da água e aumento da proliferação de pragas e patógenos que acarretaram um aumento gradual dos custos de produção devido ao uso cada vez maior de fertilizantes e pesticidas (ROMEIRO, 2016; ASSAD; ALMEIDA, 2004).

Em resposta aos problemas causados pela agricultura convencional, surgiram os movimentos agrícolas alternativos que propunham uma ruptura com a monocultura, e um redesenho dos sistemas de produção, buscando minimizar a necessidade de insumos externos ao ecossistema (ASSAD; ALMEIDA, 2004)

Com o objetivo de restaurar o equilíbrio ecológico, esses movimentos agrícolas aplicam medidas preventivas, como: o plantio na época correta, a rotação de culturas, a adubação verde, a cobertura morta, o plantio direto e o manejo seletivo do mato que ajuda a evitar a erosão do solo (ALTIERI et al., 2002).

Nesse contexto, surge o problema de otimização combinatória conhecido como Problema de Rotação de Culturas (PRC), que visa diversificar a produção de alimentos, trazer melhora no ecossistema e garantir ganhos econômicos aos produtores rurais.

Se devidamente aplicada por período suficientemente longo, a rotação de culturas contribui para melhora de características biológicas, químicas e físicas do solo, ajudando a protegê-lo de agentes climáticos, além de auxiliar no controle de doenças e pragas (ALIANO FILHO et al., 2014).

Santos et al. (2007) descrevem o PRC como sendo a elaboração de um calendário de plantio de diversas espécies vegetais, dispostas em uma mesma área, que se repete após um determinado período de tempo.

Dentre as diferentes abordagens do PRC têm-se o Problema de Rotação de Culturas com Restrições de Adjacências (PRC-A), que adiciona ao problema base restrições de adjacências, impedindo assim que culturas de mesma família botânica sejam plantadas em lotes vizinhos em um mesmo período.

Arf et al. (1999), Gliessman (2005) e Altieri (2012) propuseram algumas restrições ao uso da rotação de culturas aliada a uma agricultura sustentável:

- a) Não cultivar consecutivamente culturas de mesma família botânica em um mesmo lote;
- b) Lotes adjacentes não podem receber culturas de mesma família botânica simultaneamente;
- c) Garantir o plantio de leguminosas para realizar a fixação de nitrogênio no solo (Adubação Verde);
- d) Definir um período de descanso para a recuperação do solo, comumente chamado de pousio;
- e) Respeitar os ciclos de vida das culturas e seus respectivos períodos de plantio.

A alternância de culturas de famílias botânicas diferentes contribui para reduzir a incidência de pragas, melhora o aproveitamento dos recursos naturais presentes na terra e, por consequência, evita o empobrecimento do solo.

A restrição de plantio de culturas de mesma família em lotes adjacentes pode ser compreendida como “equivalente” a restrição a), dado que também impede o plantio de culturas de mesma família botânica em um mesmo período de tempo, porém incidindo sobre os lotes vizinhos.

Segundo Sagrilo et al. (2009), o uso de adubação verde proveniente do plantio de leguminosas permite elevar o teor de matéria orgânica no solo e aumenta a fixação de nitrogênio atmosférico obtido por meio de associação de bactérias.

Já no período de pousio, é permitido o crescimento espontâneo de vegetação local, o que recupera os nutrientes do solo. Por fim, para que as culturas sejam plantadas e colhidas na época correta, faz-se necessário respeitar os ciclos de vida das culturas e seus respectivos períodos de cultivo.

1.2. OBJETIVOS

A seguir são apresentados os objetivos gerais e específicos deste trabalho.

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é aplicar a meta-heurística *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) para a resolução do PRC-A de modo a obter uma nova alternativa para a resolução do problema.

1.2.2. Objetivos Específicos

- a) Desenvolver as adaptações necessárias para a modelagem do PRC-A;
- b) Implementar o ALNS aplicando diferentes modos de destruir e reconstruir soluções;
- c) Aplicar o método proposto a instâncias (problemas teste) encontradas na literatura;
- d) Avaliar o desempenho do método por meio de experimentos computacionais comparados a outros trabalhos e/ou métodos existentes na literatura.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Os demais capítulos deste trabalho estão divididos da seguinte forma. No Capítulo 2, uma revisão bibliográfica dos principais e mais recentes trabalhos sobre o PRC é apresentada. O Capítulo 3 descreve a modelagem matemática para o PRC-A. O Capítulo 4 apresenta a metodologia utilizada neste trabalho e, no Capítulo 5, são descritos os resultados computacionais obtidos. Por fim, o Capítulo 6 apresenta algumas conclusões.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Na literatura é possível encontrar diversos trabalhos sobre o PRC e suas variantes. A seguir, em ordem cronológica, uma revisão bibliográfica de alguns dos principais trabalhos sobre esse problema é apresentada.

O trabalho de Santos et al. (2007) representa uma das principais pesquisas sobre o PRC. Tal pesquisa apresenta um modelo de otimização linear inteira voltado para produção agroeconômica de hortaliças, que busca maximizar a ocupação das áreas de plantio dos lotes por meio de uma programação de rotação de culturas. O modelo proposto foi resolvido pelo solver CPLEX 7.5 com instâncias de 1 a 10 lotes, 28 culturas de diferentes famílias botânicas, ciclos e épocas de plantio diversos.

Santos et al. (2009) definem um formulação linear inteira-mista para o problema de abastecimento de hortaliças sustentável, que visa maximizar métricas como volume de produção ou receita. Para tal, os autores determinam uma divisão da área em lotes e, para cada lote, obtêm um calendário de plantio adequado. O problema apresenta número exponencial de variáveis, de modo que, para auxiliar sua resolução, foi utilizada a abordagem Geração de Colunas. Os testes computacionais abrangem 1, 3 e 5 lotes com 12, 16, 20 e 24 culturas. As instâncias incluem informações de safra e parâmetros de produção obtidos em uma unidade de produção ecológica situada na cidade de Barbacena-MG.

Santos (2009) apresenta em sua tese métodos exatos e heurísticos para a resolução de duas variantes do problema de rotação de culturas, ambas focadas na produção de uma base sustentável de hortaliças. As variantes apresentadas são: PRC-A e PRC-D, que adiciona restrições de demanda. Alguns dos algoritmos propostos como *branch-and-bound*, *branch-and-price* e Geração de Colunas se mostraram eficientes ao provar rapidamente a otimalidade dos problemas testes considerados. Todos os algoritmos foram implementados em linguagem C++ e resolvidos com auxílio do CPLEX 11.1. Os testes computacionais realizados consideraram dados reais de 28 culturas, dispostas em 4, 8, 12, 16 e 20 lotes.

Santos et al. (2011) propõem analisar o problema de rotação de culturas a partir de um modelo binário voltado a maximização da ocupação da área. Dado o grande número de restrições e variáveis presentes no PRC-A, utilizou-se a decomposição

de Dantzig-Wolfe, que permitiu o uso de procedimentos heurísticos e exatos para a resolução do problema. Os testes computacionais realizados utilizaram instâncias de 1, 3, 5, 7 e 9 lotes, no qual 28 culturas, sendo 4 destinadas a adubação verde foram dispostas.

Aliano Filho (2012) em sua dissertação de mestrado, propõe o uso de métodos heurísticos para solucionar o PRC-A e o Problema de Rotação de Culturas com Restrições de Adjacências e Demanda (PRC-A-D). Em ambas variantes do problema original, foram utilizados um Algoritmo Genético (AG), um *Simulated Annealing* (SA) e duas abordagens híbridas, sendo elas: Algoritmo Genético com *Simulated Annealing* (SA) e Algoritmo *Memético* (AM) com Busca Local. O modelo binário proposto visa determinar uma programação de plantio de hortaliças que maximize a lucratividade da produção de modo que área e lucro/lote são variáveis centrais do problema. Em sua modelagem, considerou áreas de plantio genéricas, divididas em lotes irregulares de diferentes tamanhos, sendo que pelo menos um pousio deve ser alocado. Os experimentos abrangem três instâncias distintas, com 10, 15 e 20 lotes, sendo que cada solução dispõe de 30 culturas, sendo 25 propícias à comercialização.

Araújo e Mauri (2013) apresentam uma alternativa para resolução do PRC-A a partir da meta-heurística *Clustering Search* (CS) utilizando um *Simulated Annealing* (SA) como geradora de soluções. Foram usadas as mesmas instâncias que Aliano Filho (2012), e os resultados obtidos superaram os diversos métodos propostos pelo respectivo estudo.

Santos et al. (2015) propõem o uso do algoritmo *branch-price-and-cut* para a resolução do PRC-D, aliado a um modelo de programação inteira que busca minimizar o tamanho da área de plantio. Os experimentos consideraram três instancias com 10, 15 e 20 lotes e 26 culturas diferentes disponíveis. As rotações testadas contam com intervalos de 1 e 2 anos, divididos em 48 e 96 períodos, respectivamente.

Por fim, Memmah et al. (2015) apresentam uma revisão da literatura abordando diferentes métodos para a otimização do uso de terras.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA

Nesta seção, é descrita a formulação matemática proposta por Aliano Filho (2012), que é base para a representação do PRC-A utilizada neste trabalho.

A programação de rotação de culturas é caracterizada pela elaboração de um calendário de plantio que considera ciclos de T anos divididos em M períodos de tamanhos iguais, com uma unidade de tempo pré-estabelecida (dia, semana, quinzena, mês, bimestre, etc.).

A elaboração do calendário de plantio consiste em definir um conjunto de culturas que deverão ser plantadas, o período da rotação no qual a cultura será inserida e o lote onde será cultivada. A área de cultivo é dividida em lotes, e pode ser representada por um grafo $G(V, A)$ em que V indica o conjunto de lotes e A o conjunto de arestas, sendo que o par $(u, v) \in A$ se, e somente se, os lotes u e v forem adjacentes.

Algumas restrições ecológicas e técnicas estabelecidas por Aliano filho (2012) para se alcançar uma agricultura sustentável são descritas a seguir:

- a) Plantio Consecutivo – não é permitido o plantio consecutivo de culturas de uma mesma família botânica em um mesmo lote.
- b) Época de Plantio – deve ser respeitada a época de plantio e o ciclo de vida de cada cultura.
- c) Áreas Adjacentes – culturas pertencentes à mesma família botânica não podem ser plantadas em lotes adjacentes no mesmo período.
- d) Adubação Verde – todos os lotes, dentro de um ciclo T , devem possuir no mínimo uma cultura leguminosa, que está sujeita às condições a, b e c.
- e) Pousio – cada lote deverá reservar um período para descanso do solo.

O PRC-A neste trabalho considera alguns parâmetros e variáveis que descrevem o conjunto de programações de rotação de culturas que respeitam as restrições citadas acima, a saber:

- M – Número de períodos de mesma duração (unidade de tempo pré-estabelecida) da rotação;
- N_f – Número de famílias de plantas botânicas;

- N – Número de culturas pertencentes às N_f famílias botânicas;
- F_p – Conjunto de culturas da família botânica p , tal que $p = 1, \dots, N_f$;
- L – Quantidade de lotes para plantio das culturas;
- C – Conjunto de culturas que possuem fins comerciais e poderão ser selecionadas para a rotação, excluindo as culturas de adubação verde;
- A – Conjunto de culturas que podem ser alocadas para adubação verde (leguminosas);
- t_i – Ciclo de vida das culturas i , incluindo os períodos estimados de preparação do solo e colheita;
- $I_i = [C_i, T_i]$ – Intervalo de semeadura da cultura i , tal que C_i é o período mais cedo em que a cultura i pode ser plantada e T_i é o período mais tarde;
- l_i – Lucratividade (R\$/ha) da cultura i nos t_i períodos;
- T – Duração da programação da rotação de culturas, igual para todos os lotes;
- $area_k$ – Área do lote k em hectares (ha);
- S_k – Conjunto dos lotes adjacentes ao lote k ;
- n – Pousio.

A formulação matemática visa maximizar a lucratividade da produção e atender todas as restrições anteriormente citadas.

Maximizar

$$z = \sum_{i \in C} \sum_{j \in I_i} \sum_{k=1}^L area_k l_i x_{ijk} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in F_p} \sum_{r=0}^{t_i-1} \sum_{v \in S_k} x_{i(j-r)v} \leq L \left(1 - \sum_{i \in F_p} X_{ijk} \right), p = 1, \dots, N_f, j = 1, \dots, M, k = 1, \dots, L \quad (2)$$

$$\sum_{i \in F_p} \sum_{r=0}^{t_i} x_{i(j-r)k} \leq 1, p = 1, \dots, N_f, j = 1, \dots, M, k = 1, \dots, L \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{N+1} \sum_{r=0}^{t_i-1} x_{i(j-r)k} \leq 1, j = 1, \dots, M, k = 1, \dots, L \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^M x_{njk} \geq 1, k = 1, \dots, L \quad (5)$$

$$\sum_{i \in A} \sum_{j=1}^M x_{ijk} \geq 1, k = 1, \dots, L \quad (6)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, i = 1, \dots, N + 1, j \in I_i, k = 1, \dots, L \quad (7)$$

Sendo que:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{se a cultura } i \text{ tiver seu plantio iniciado no periodo } j \text{ no lote } k; \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A função objetivo (1) provê a maximização da lucratividade da rotação a ser realizados nos L lotes, nos M períodos, com as culturas de propósito comercial pertencentes ao conjunto C .

As restrições (2) impedem que culturas pertencentes ao mesmo conjunto de famílias botânicas sejam cultivadas em lotes adjacentes, em um mesmo período de tempo.

As restrições (3) restringem o plantio consecutivo de culturas de mesma família botânica dentro de um mesmo lote, de modo a evitar o desgaste dos nutrientes do solo.

As restrições (4) garantem que o plantio respeitará inteiramente o ciclo de vida das culturas, ou seja, duas culturas não poderão ocupar o mesmo lote em um mesmo intervalo de tempo.

Para cada lote, a presença de pelo menos um pousio, é garantida pelas restrições (5), não sendo a estas aplicadas as restrições de adjacências e plantio, visto que tais restrições são destinadas apenas a culturas pertencentes ao conjunto N .

As restrições (6) referem-se ao plantio de pelo menos uma cultura destinada à adubação verde (leguminosa), e as restrições (7) garantem que as variáveis de decisão sejam binárias.

4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho consiste na aplicação da meta-heurística *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) para a resolução do PRC-A.

Segundo Ribeiro et al. (2013), a meta-heurística ALNS vem apresentado bons resultados quando aplicada a diversos problemas de OC, e seu sucesso se dá pelo fato de possuir, dentre outros fatores, uma camada adaptativa que permite diversificar e intensificar a busca por soluções promissoras.

O ALNS é uma extensão da meta-heurística *Large Neighborhood Search* (LNS) apresentada por Shaw (1997) que se baseia no princípio de ruína e reconstrução, sendo que, a cada iteração, parte da solução atual s é destruída para em seguida ser reconstruída de modo diferente, gerando uma nova solução s' . O fator que diverge a meta-heurística ALNS da LNS é a adaptabilidade.

Os parâmetros utilizados pelo ALNS e seu pseudocódigo são apresentados na Tabela 1 e na Figura 1, respectivamente.

Tabela 1 - Parâmetros utilizados pelo ALNS.

Parâmetro	Descrição
$ALNS_{max}$	Número máximo de iterações do método
T_{max}	Tempo máximo de execução
φ	Tamanho do segmento
ω_{H^+}	Peso da heurística de reconstrução H^+
ω_{H^-}	Peso da heurística de destruição H^-
σ_1	Score se a melhor solução for superada
σ_2	Score se a solução corrente for superada
σ_3	Score se uma solução pior for aceita
π_{H^+}	Score da heurística de reconstrução H^+
π_{H^-}	Score da heurística de destruição H^-
o_{H^+}	Número de vezes que a heurística de reconstrução H^+ foi escolhida no último segmento
o_{H^-}	Número de vezes que a heurística de destruição H^- foi escolhida no último segmento
η	Fator de reação
ζ	Porcentagem máxima de lotes removidos
α	Taxa de resfriamento
T_i	Temperatura inicial
T_c	Temperatura de congelamento
s	Solução inicial do problema

Os métodos de destruição e reconstrução são selecionados de acordo com um mecanismo probabilístico que se adapta a cada iteração. Tal adaptação ocorre considerando-se o desempenho dos métodos e a contribuição dos mesmos para a melhora da solução.

ALNS ($ALNS_{max}, \varphi, \eta, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \zeta, \alpha, T_i, T_c, T_{max}, s$)
1. $s^* \leftarrow s; T \leftarrow T_0; T_e \leftarrow 0; T_{exec} \leftarrow 0; j \leftarrow 0;$
2. $\omega_{H^+} \leftarrow 1;$ Para todo H^+ $\omega_{H^-} \leftarrow 1;$ Para todo H^-
3. $\pi_{H^+} \leftarrow 0;$ Para todo H^+ $\pi_{H^-} \leftarrow 0;$ Para todo H^-
4. ENQUANTO ($T_{exec} < T_{max}$) FAÇA
5. $i \leftarrow 0;$
6. ENQUANTO ($i < ALNS_{max}$) FAÇA
7. $i \leftarrow i + 1; j \leftarrow j + 1; s' \leftarrow s;$
8. $\gamma \leftarrow$ número aleatório entre 1 e $(\zeta^* \text{ (nº de lotes)} - 1);$
9. SELECIONAR (uma heurística de destruição H^-);
10. APLICAR ($H^-(s')$);
11. SELECIONAR (uma heurística de reconstrução H^+);
12. APLICAR ($H^+(s')$);
13. $l_{H^+} \leftarrow l_{H^+} + 1; l_{H^-} \leftarrow l_{H^-} + 1;$
14. SE ($f(s') > f(s)$)
15. $s \leftarrow s';$
16. SE ($f(s) > f(s^*)$)
17. $s^* \leftarrow s; \pi_{H^+} \leftarrow \pi_{H^+} + \sigma_1; \pi_{H^-} \leftarrow \pi_{H^-} + \sigma_1;$
18. SENÃO
19. $\pi_{H^+} \leftarrow \pi_{H^+} + \sigma_2; \pi_{H^-} \leftarrow \pi_{H^-} + \sigma_2;$
20. FIM-SE;
21. SENÃO
22. TOMAR ($x \in [0,1]$)
23. SE ($x > e^{-(f(s)-f(s'))/T}$)
24. $s \leftarrow s'; \pi_{H^+} \leftarrow \pi_{H^+} + \sigma_3; \pi_{H^-} \leftarrow \pi_{H^-} + \sigma_3;$
25. FIM-SE;
26. FIM-SE;
27. SE ($j = \varphi$)
28. $j \leftarrow 0;$
29. ATUALIZAR ($\omega_{H^+}, \omega_{H^-}, o_{H^+}, o_{H^-}, \pi_{H^+}, \pi_{H^-}$)
30. FIM-SE;
31. $T \leftarrow \alpha * T;$
32. FIM-ENQUANTO;
33. $T_{exec} \leftarrow$ tempo de execução;
34. FIM-ENQUANTO;
35. RETORNAR (s^*);

Figura 1 - Pseudocódigo ALNS.

Fonte: Adaptado de Ribeiro et al. (2013).

Partindo de uma solução inicial s arbitrariamente gerada, a meta-heurística ALNS começa a realizar uma busca por vizinhos de s . A cada iteração, o algoritmo seleciona uma quantidade γ de lotes e, com base em um algoritmo de roleta, escolhe uma heurística de destruição que será responsável por retirar os lotes escolhidos da solução. Depois de realizadas as remoções, uma heurística de

reconstrução é chamada para reinserir culturas nos lotes destruídos, de modo a criar uma solução vizinha de s .

O algoritmo de roleta altera as probabilidades de escolha de cada heurística de destruição e reconstrução conforme seu desempenho nas rodadas anteriores, de modo a tornar a busca por vizinhos dinamicamente adaptada.

A função objetivo utilizada na implementação do ALNS penaliza as violações das restrições, de modo a evitar que soluções inviáveis sejam aceitas pelo algoritmo.

A modelagem computacional do problema é baseada em uma estrutura contendo variáveis responsáveis por representar as inviabilidades da solução, o valor total do lote, e o valor da função objetivo. Uma matriz de dimensões proporcionais ao número de lotes e períodos tratados no problema (Figura 2) é usada para representar uma solução.

		Períodos				
		X	1	2	3	4
Lotes	1					
	2					

Figura 2 - Modelagem computacional da matriz de solução.

No exemplo apresentado abaixo, suponha disponíveis as culturas listadas na Tabela 2. Uma possível solução apresentada na Figura 3 contém uma inviabilidade de adjacência, caracterizada pelas culturas 3 e 4 que possuem a mesma família botânica.

Tabela 2 - Exemplo culturas disponíveis.

Id	Cultura	Família Botânica	Época de Plantio		Ciclo de vida (mês)	Lucratividade (R\$)
			Início	Fim		
1	A	Família B. 1	3	5	2	200
2	B	Família B. 1	4	2	3	430
3	C	Família B. 2	1	4	2	170
4	D	Família B. 2	Ano todo		2	220
5	E	Família B. 3	3	5	2	0
6	F	Família B. 4	1	3	1	0
0	Pousio	-	Ano todo		1	0

		Períodos				
		X	1	2	3	4
Lotes	1	3	3	0	1	1
	2	0	2	2	5	5

Figura 3 - Exemplo de solução.

4.1. PRINCIPAIS COMPONENTES DO ALNS

4.1.1. Solução Inicial

Neste trabalho, a solução inicial é gerada de forma aleatória. Para cada lote l uma cultura $c \in C$ é randomicamente escolhida e, dentre o mês de início e de término do plantio de c , um mês m é aleatoriamente selecionado. Enquanto houver meses não plantados no lote l , após cada plantio, o mês m é atualizado e uma nova cultura c' é aleatoriamente selecionada. Porém, c' somente é plantada caso o mês atual estiver entre o seu mês de início e de término de plantio.

4.1.2. Vizinhaça Ampla

A cada iteração uma heurística de remoção é escolhida e remove de γ lotes todas as culturas neles plantado. Após remoção das culturas, os lotes anteriormente selecionados passam por uma heurística de reconstrução que iria criar um novo calendário de plantio. A quantidade lotes selecionados para destruição e reconstrução é definida randomicamente e limitada pelo parâmetro ζ , que indica a porcentagem máxima de lotes a serem removidos e inseridos.

4.1.3. Busca Adaptativa

A escolha das heurísticas de destruição e reconstrução é regida por um mecanismo de roleta, no qual para cada heurística i é atribuído um peso w_i que indica quão boa foi a heurística i nas rodadas anteriores. Desse modo, considerando a existência de h heurísticas, a probabilidade de uma heurística j ser selecionada é dada pela fórmula $w_j / \sum_{i=1}^h w_i$. Vale ressaltar que as heurísticas de destruição são independentes das heurísticas de reconstrução.

4.1.4. Ajuste de Pesos

O ajuste dos pesos segue o tamanho dos segmentos φ , que define a quantidade de iterações consecutivas que antecedem um ajuste. No primeiro segmento, todas as

heurísticas de destruição e reconstrução possuem o mesmo peso. Após φ iterações, os pesos usados para auxiliar a escolha das heurísticas de destruição e reconstrução são atualizados com base no *score* obtido durante o segmento. Os *scores* mostram o comportamento da heurística no último segmento, sendo estes incrementados por um parâmetro igual a σ_1 , σ_2 ou σ_3 quando se identifica novas soluções.

Considerando s^* a melhor solução encontrada e s a solução corrente, o *score* é incrementado em σ_1 quando uma solução s' encontrada for melhor que a solução s^* . Caso a solução s' seja melhor que a solução s , é aplicado o incremento por σ_2 e, se a solução s' for pior que a s , usa-se o *score* σ_3 mediante um critério de aceitação.

Ao final de cada segmento, os pesos são recalculados com base nos *scores* obtidos e, em seguida, os *scores* são zerados para o próximo segmento. Seja Π_i o *score* da heurística i e o_{ij} o número de vezes que a heurística i foi escolhida no último segmento j , tem-se:

$$\omega_{(ij+1)} = \begin{cases} \omega_{ij} & \text{se } o_{ij} = 0 \\ (1 - \eta)\omega_{ij} + \eta\Pi_i/o_{ij} & \text{se } o_{ij} \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

O parâmetro η é chamado de “fator de reação”, e regula a velocidade com a qual o algoritmo ajusta o peso das heurísticas em caso de mudança de sua eficiência.

4.1.5. Função Objetivo Penalizada

A função objetivo utilizada no ALNS visa maximizar a lucratividade da programação de rotação de culturas de forma relaxada, utilizando pesos para penalizar a violação das restrições do modelo. Para cada restrição violada, o peso correspondente é aplicado e o valor obtido é subtraído da lucratividade total.

Maximizar

$$f(s) = \sum_{i \in C} \sum_{j \in I_i} \sum_{k=1}^L area_k l_i x_{ijk} - [(nLP \times pLP) + (nLA \times pLA) + (nAV \times pAV)] \quad (9)$$

Sendo que:

- nLA Indica o número períodos em que lotes adjacentes possuem culturas de mesma família botânica plantadas no mesmo período; pLA é o peso correspondente às violações dessa restrição.
- nAV Indica o número de lotes que não possuem adubação verde; pAV é o peso correspondente às violações dessa restrição.
- nLP Indica o número de lotes que não possuem pousios durante o calendário de rotação; pLP é o peso correspondente às violações dessa restrição.

Para as restrições listadas abaixo, não houve necessidade de atribuição de penalidade, dado que, antes que uma cultura i seja inserida na solução, é verificado se o período atual está contido no intervalo de cultivo da cultura, se a cultura plantada no período anterior pertence à mesma família botânica da cultura i e se o espaço livre para plantio é suficiente para comportar o plantio da mesma.

- Número de culturas plantadas fora de época.
- Culturas de mesma família botânica plantadas consecutivamente em um mesmo lote;
- Culturas que não respeitam seu ciclo de plantio.

4.1.6. Critérios de Aceitação

O critério de aceitação de soluções do *Simulated Annealing* foi utilizado no ALNS. Dada uma solução s , uma solução vizinha s' é aceita se $f(s') > f(s)$. Caso contrário, é aplicada uma probabilidade de aceitação $e^{\frac{-(f(s')-f(s))}{T}}$, na qual T indica a temperatura. A cada iteração, a temperatura iniciada em T_i é multiplicada pela taxa de resfriamento α , que compreende um valor no intervalo $[0,1]$.

4.2. HEURÍSTICAS DE DESTRUIÇÃO

Neste trabalho, foram implementadas seis heurísticas de destruição, que são responsáveis selecionar γ lotes da solução s e remover as culturas neles plantada.

4.2.1. Heurística de Destruição de Lotes Randômica (HDR)

A heurística de destruição de lotes randômica ajuda a diversificar o conjunto de lotes removidos. Porém, tende a degradar a solução, dado que não utiliza critérios

definidos para a escolha dos lotes. Enquanto a quantidade $|Z|$ de lotes atualmente removidos pela heurística não alcança o limite γ , é escolhido um lote l aleatoriamente dentre os lotes remanescentes na solução e, em seguida, este é removido da solução s e do conjunto de lotes disponíveis para remoção Z . O pseudocódigo é apresentado na Figura 4.

HDR (s, γ)	
1.	$W \leftarrow$ conjunto de lotes de s ;
2.	PARA i DE 0 ATE γ FAÇA
3.	$pos \leftarrow$ número inteiro aleatório no intervalo $[0, (W - 1)]$;
4.	$l \leftarrow$ lote de W na posição pos ;
5.	$Z \leftarrow l$;
6.	REMOVER (l de s e de W);
7.	FIM-PARA ;

Figura 4 - Pseudocódigo da HDR.

4.2.2. Heurística de Destruição de Lotes Baseada no Pior Lote (HDPL)

A heurística de destruição do pior lote identifica os lotes que apresentam os menores lucros e os remove da solução atual. O cálculo do lucro associado a um lote l é obtido por :

$$Lucro(l, s) = Valor(l, s) - \sum_{j=1}^R P_{l_j} \quad (10)$$

Sendo que o valor do lote l é dado por:

$$Valor(l, s) = \left(\sum_{i=1}^N V_{c_i} \right) * A_l \quad (11)$$

O número de culturas plantadas é representado por N , o valor da cultura i é dado por V_{c_i} e A_l indica a área do lote l . O valor total do lote é então subtraído do somatório das penalizações do lote P_{l_j} . O pseudocódigo é apresentado na Figura 5.

HDPL (s, γ)	
1.	$W \leftarrow$ conjunto de lotes de s ;
2.	ORDENAR (W de acordo com o $Lucro(l, s)$);
3.	PARA i DE 0 ATÉ γ FAÇA
4.	$l \leftarrow$ lote de W na posição 0;
5.	$W \leftarrow l$;
6.	REMOVER (l de s e de W);
7.	FIM-PARA ;

Figura 5 - Pseudocódigo da HDPL.

4.2.3. Heurística de Destruição de Lotes Baseada na Quantidade de Adjacências (HDQA)

A heurística de destruição baseada na quantidade de adjacências considera que lotes com grande número de adjacências são mais propensos a limitar o desempenho da solução. Dessa forma, removê-los pode ajudar a diversificar a melhorar a solução.

Inicialmente, o conjunto de lotes W é ordenado de acordo com o número de adjacências dos lotes. Após ordenado, um lote l do conjunto W é escolhido segundo a regra $\lfloor y^\delta |W| \rfloor$ no qual o parâmetro y é um número aleatório no intervalo $[0,1]$, é $|W|$ o número de lotes do conjunto W . O parâmetro δ é empregado a fim de evitar o determinismo na escolha dos lotes, sendo que $\delta \geq 1$.

HDQA (s, γ)	
1.	$W \leftarrow$ conjunto de lotes de s ;
2.	ORDENAR (W de acordo com o número de adjacências dos lotes);
3.	$y \leftarrow$ número aleatório no intervalo $[0,1]$;
4.	$pos \leftarrow \lfloor y^\delta W \rfloor$;
5.	$l \leftarrow$ lote de W na posição pos ;
6.	$Z \leftarrow l$;
7.	REMOVER (l de s);
8.	$Ad_l \leftarrow$ conjunto de lotes adjacentes ao lote l ;
9.	ENQUANTO ($(Z < \gamma)$ e $(Z < Ad_l)$) FAÇA
10.	$pos \leftarrow$ número inteiro aleatório no intervalo $[0, Ad_l]$;
11.	$l_i \leftarrow$ lote de Ad_l na posição pos ;
12.	$Z \leftarrow l_i$;
13.	REMOVER (l_i de s e de Ad_l);
14.	FIM-ENQUANTO ;

Figura 6 - Pseudocódigo da HDQA.

Assim que o lote l é escolhido, guarda-se o conjunto dos lotes adjacentes a ele em Ad_l , e enquanto o número de lotes removidos for inferior ao $MIN(|Ad_l| \gamma)$, um lote aleatório dentre os lotes adjacente de l será escolhido e removido do conjunto Ad_l e da solução. O pseudocódigo é apresentado na Figura 6.

4.2.4. Heurísticas de Destruição de Shaw (HDS)

A heurística de destruição de Shaw utiliza a ideia de similaridade para determinar quais lotes devem ser removidos. O grau de similaridade entre dois lotes é calculado por meio da medida $Sm(l_1, l_2)$, na qual valores mais baixos representam maior semelhança entre os lotes.

Dada uma solução inicial s e um conjunto W de lotes passíveis de remoção, um lote aleatório é escolhido, adicionado ao conjunto Z e removido de s . Enquanto $|Z| < \gamma$, a heurística seleciona um lote l de Z e ordena W pela similaridade $Sm(l_1, l_2)$ do lote l com os demais lotes remanescentes em W .

Após ordenado, um novo lote l é escolhido, adicionado ao conjunto Z e removido de s e W . Para evitar o determinismo na escolha do lote, é aplicado o critério $\lfloor y^\delta |W| \rfloor$, no qual y é um número aleatório no intervalo $[0,1]$ e $\delta \geq 1$ é um parâmetro auxiliar. O pseudocódigo é apresentado na Figura 7.

HDS (s, γ)	
1.	$W \leftarrow$ Conjunto de lotes de s ;
2.	$pos \leftarrow$ número inteiro aleatório no intervalo $[0, W]$;
3.	$l \leftarrow$ lote de W na posição pos ;
4.	$Z \leftarrow l$;
5.	REMOVER (l de s e de W);
6.	ENQUANTO ($ Z < \gamma$) FAÇA
7.	$pos \leftarrow$ número inteiro aleatório no intervalo $[0, Z]$;
8.	$l \leftarrow$ lote de Z na posição pos ;
9.	ORDENAR (W de acordo com $Sm(l, W_i)$);
10.	$y \leftarrow$ número aleatório no intervalo $[0,1]$;
11.	$pos \leftarrow \lfloor y^\delta W \rfloor$;
12.	$l \leftarrow$ lote de W na posição pos ;
13.	REMOVER (l de s e de W);
14.	FIM-ENQUANTO ;

Figura 7 - Pseudocódigo da HDS.

Foram implementadas três variações da heurística de Shaw, que possuem o mesmo comportamento, porém, diferindo-se quanto ao cálculo da similaridade.

- *Heurísticas de Destruição de Shaw Baseada no Valor dos Lotes (HDS-VL):*
 $Sm(l_1, l_2) = |V_{l_1} - V_{l_2}|$, sendo V_{l_i} o valor (conforme descrito na subseção 4.2.2) do lote i .
- *Heurísticas de Destruição de Shaw Baseada no Lucro dos Lotes (HDS-LL):*
 $Sm(l_1, l_2) = |Lc_{l_1} - Lc_{l_2}|$, sendo Lc_{l_i} o lucro do lote i ;
- *Heurísticas de Destruição de Shaw Baseada no Tamanho dos Lotes (HDS-TL):* $Sm(l_1, l_2) = |T_{l_1} - T_{l_2}|$, sendo T_{l_i} o tamanho do lote i .

4.3. HEURÍSTICAS DE RECONSTRUÇÃO

Seis heurísticas de reconstrução foram implementadas seguindo uma mesma lógica de execução. Contudo, estas se diferenciam pela ordem com a qual os lotes do conjunto Z são reinseridos. A variação do critério de ordenação dos lotes em Z permite uma melhor alocação de culturas nos lotes que apresentaram baixo desempenho na solução.

Dado o conjunto de lotes Z , para cada reinserção, uma cultura c_o inicial é escolhida aleatoriamente. Em seguida, um mês m , pertencente ao intervalo $[m_i, m_f]$ é escolhido aleatoriamente, sendo m_i e m_f , os meses de início e de término de plantio de c_o . Caso não haja inviabilidade de adjacência da cultura inicial c_o com outros lotes, esta é plantada, e o mês m é atualizado considerando o ciclo de vida da cultura.

Enquanto houver meses livres, uma cultura é escolhida e plantada, segundo os seguintes critérios:

1. A cultura atual não deve ser da mesma família da cultura anterior plantada;
2. Possuir ciclo de vida menor que o número de meses livres;
3. O mês corrente estar entre os meses possíveis de plantio da cultura atual e
4. Não haver inviabilidades de adjacência quanto às culturas de outros lotes.

Se após testar todas culturas nenhuma passar nos critérios listados acima ou o número de meses livres for inferior ao ciclo de vida da cultura que ocupa menor tempo de plantio, um ajuste será aplicado na solução.

Dois tipos de ajuste são aplicados nessas heurísticas:

- **Ajuste leve:** ignora o primeiro critério listado acima, visando encontrar culturas que atendam aos demais critérios. Se não houver cultura apta para plantio, considera o mês atual como pousio e passa a considerar o mês seguinte como período para plantio.

- **Ajuste pesado:** difere-se do ajuste leve, pois, quando não há cultura apta para plantio, a última cultura plantada é removida da solução, reinserida no conjunto de culturas C , e o mês corrente é atualizado.

4.3.1. Heurística de Reconstrução de Lotes Aleatória (HRLA)

Embaralha inicialmente o conjunto de lotes removidos Z com o objetivo de reduzir o determinismo na ordem de reinserção dos lotes, e aplica o ajuste leve.

4.3.2. Heurística de Reconstrução de Lotes Priorizando Pior Valor (HRPV)

Ordena o conjunto de lotes removidos Z pelos valores associados a eles antes da remoção, segundo a fórmula $Valor(l, s)$ apresentada na Seção 4.2.2, e prioriza a inserção dos lotes com pior valor. O ajuste leve é aplicado a esta heurística, pois sua execução é mais rápida.

4.3.3. Heurística de Reconstrução de Lotes Priorizando Pior Lucro (HRPL)

Ordena o conjunto de lotes removidos Z pelos lucros associados a eles antes da remoção, segundo a fórmula $Lucro(l, s)$ apresentada na Seção 4.2.2, e prioriza a inserção dos lotes com pior lucro. O ajuste leve é aplicado nesta heurística por ser mais rápido.

4.3.4. Heurística de Reconstrução de Lotes Priorizando Tamanho (HRT)

Ordena os lotes do conjunto Z pelo seu tamanho, pois considera que quanto maior o lote, mais importante é uma boa disposição de culturas plantadas, dado que o fator tamanho influencia diretamente na lucratividade dos lotes. Por ser mais rápido, o ajuste leve foi utilizado.

4.3.5. Heurísticas de Reconstrução de Lotes Gulosa (HRG)

Foram implementadas duas heurísticas de reconstrução de lotes gulosas, HRG-L e HRG-P, sendo a única diferença entre elas o tipo de ajuste utilizado, leve e pesado, respectivamente.

Essas heurísticas ordenam o conjunto de culturas C pelo seu valor de mercado e tentam plantar sempre as culturas que possuem maior valor associado. Diferente das heurísticas de reconstrução apresentadas anteriormente, essas heurísticas

reconstroem os lotes destruídos na mesma ordem com a qual eles foram removidos da solução.

4.4. EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

A fim de verificar o desempenho do método proposto para a resolução do PRC-A, foram realizados experimentos computacionais utilizando três instâncias distintas com 10,15 e 20 lotes, como ilustrado na Figura 8.

Todas as instâncias foram obtidas do trabalho de Aliano Filho (2012) e contam com 29 culturas diferentes disponíveis para plantio, sendo 25 comerciais e 4 destinadas à adubação verde.

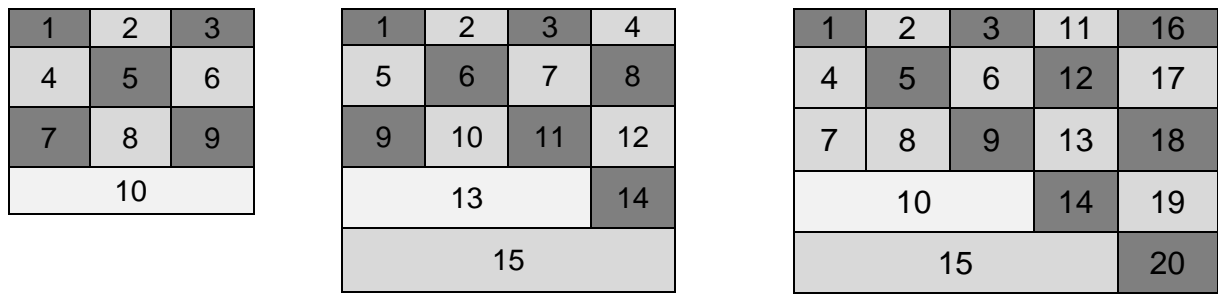


Figura 8 - Relação de adjacência entre lotes de cada instancia.
Fonte: Aliano Filho (2012).

A Tabela 3 descreve os lotes e suas respectivas áreas (em hectare), e a Tabela 4 apresenta os dados referentes às culturas disponíveis para plantio, sendo: nome da cultura, nome da família botânica, época de plantio (início e término), ciclo de vida (em meses) e lucratividade associada (em R\$).

Tabela 3 - Área (em ha) dos lotes.
Fonte: Aliano Filho (2012).

Lote	Área	Lote	Área
1	1,50	11	2,00
2	2,00	12	3,00
3	2,00	13	4,00
4	2,25	14	3,00
5	3,00	15	5,50
6	3,00	16	2,50
7	3,00	17	3,75
8	4,00	18	5,00
9	4,00	19	3,75
10	8,25	20	2,50

Tabela 4 - Culturas disponíveis para o plantio.
Fonte: Aliano Filho (2012).

Id	Cultura	Família	Época de Plantio		Ciclo de vida (mês)	Lucratividade (R\$)
			Início	Fim		
1	Alface	Compositae	Ano todo		2	300
2	Almeirão	Compositae	Ano todo		4	150
3	Couve	Brassicaceae	Março	Junho	3	300
4	Brócolis	Brassicaceae	Fevereiro	Junho	7	400
5	Repolho	Brassicaceae	Fevereiro	Junho	4	400
6	Couve-Flor	Brassicaceae	Março	Junho	4	900
7	Beterraba	Chenopodiaceae	Março	Julho	2	810
8	Espinafre	Chenopodiaceae	Fevereiro	Julho	2	600
9	Abobrinha	Cucurbitaceae	Agosto	Março	4	400
10	Moranga	Cucurbitaceae	Setembro	Janeiro	5	200
11	Pepino	Cucurbitaceae	Ano todo		4	450
12	Melancia	Cucurbitaceae	Agosto	Outubro	3	900
13	Alho	Liliaceae	Março	Abril	6	810
14	Cebola	Liliaceae	Março	Junho	4	430
15	Quiabo	Malvaceae	Agosto	Março	7	710
16	Milho	Gramineae	Agosto	Abril	3	350
17	Aveia	Gramineae	Março	Maió	6	350
18	Tomate	Solanaceae	Ano todo		5	810
19	Pimentão	Solanaceae	Ano todo		5	550
20	Batata	Solanaceae	Agosto	Outubro	3	240
21	Cenoura	Umbelliferae	Março	Julho	4	620
22	Salsinha	Umbelliferae	Setembro	Março	6	400
23	Feijão-Vagem	Leguminosae	Agosto	Abril	4	750
24	Ervilha	Leguminosae	Março	Abril	3	830
25	Feijão	Leguminosae	Agosto	Setembro	3	720
26	Crotalália	Leguminosae	Setembro	Dezembro	3	-
27	Feijão-de-Porco	Leguminosae	Setembro	Dezembro	3	-
28	Mucuna	Leguminosae	Setembro	Janeiro	3	-
29	Ervilha Peluda	Leguminosae	Março	Junho	4	-
30	Pousio	-	Ano todo		1	-

Para cada instância do PRC-A o ALNS foi submetido a 50 execuções, com o objetivo de avaliar seu desempenho mediante às seguintes informações:

- **Melhor Função Objetivo (MFO):** valor da melhor solução encontrada dentre as 50 execuções do ALNS.
- **FO média (MED):** média aritmética das melhores FOs encontradas nas 50 execuções do ALNS.

- **Desvio (D)**: calculado da seguinte forma:

$$D = (((MFO - MED / MFO) * 100)$$

- **Tempo médio (TM)**: A média aritmética dos tempos computacionais para encontrar a MFO (em segundos).

5. RESULTADOS OBTIDOS

A seguir, são apresentados os resultados obtidos por meio dos experimentos computacionais e uma comparação desses resultados com os obtidos por outros métodos encontrados na literatura.

5.1. RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Para a calibração dos parâmetros da ALNS, tomou-se como instância teste a de 15 lotes. Tal instância passou por uma bateria de testes no qual um parâmetro por vez era variado enquanto os demais tinham seus valores fixos. Ao final da bateria de testes, foi adotado o valor que resultou nos melhores resultados, conforme apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 - Parâmetros utilizados pelo ALNS.

Parâmetro	Valor
$ALNS_{max}$	150.000
T_{max}	500 <i>segs.</i>
φ	50
σ_1	50
σ_2	25
σ_3	20
η	0.05
ζ	0.2
α	0.250
T_i	80.000
T_c	0.01

Tabela 6 - Penalização da função objetivo.

Penalização	Valor
pLA	1000
pAV	15000
pLP	1000

Após calibrados os parâmetros, o ALNS foi executado 50 vezes para cada instância (10, 15 e 20 lotes). Todas as soluções foram obtidas a partir de uma solução inicial diferente (geradas aleatoriamente).

A Tabela 7 apresenta, para cada instância, a FO da melhor solução encontrada, a FO média das soluções, o desvio e o tempo médio (em segundos).

Tabela 7 - Resultados obtidos por meio de 50 execuções da ALNS proposta.

Instancia	Melhor Solução (R\$)	Solução média (R\$)	Desvio (%)	Tempo Médio (seg.)
10 Lotes	92665,00	91151,6	1,63	270,05
15 Lotes	140147,50	137818,85	1,66	301,21
20 Lotes	187867,50	184511,46	1,78	343,80

As Figuras 9, 10 e 11 ilustram, respectivamente, as melhores soluções obtidas pelo ALNS para as três instâncias do PRC-A (10, 15 e 20 lotes). Nessas figuras, os números correspondem às culturas listadas na Tabela 4 (Coluna Id), e as cores iguais representam culturas de mesma família botânica.

Lote/Mês	Ano 1											
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	30	8	8	6	6	6	6	25	25	25	1	1
2	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23
3	1	8	8	30	6	6	6	6	25	25	25	1
4	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23
5	1	8	8	30	6	6	6	6	25	25	25	1
6	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23
7	30	8	8	6	6	6	6	25	25	25	1	1
8	16	16	30	24	24	24	18	18	18	18	18	16
9	30	8	8	6	6	6	6	25	25	25	1	1
10	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23

Figura 9 - Melhor programação de plantio - ALNS - 10 lotes.

Lote/Mês	Ano 1											
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	1	8	8	30	6	6	6	6	25	25	25	1
2	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23
3	1	8	8	6	6	6	6	30	25	25	25	1
4	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23
5	1	8	8	6	6	6	6	30	25	25	25	1
6	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23
7	30	8	8	24	24	24	21	21	21	21	1	1
8	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23
9	30	8	8	24	24	24	21	21	21	21	1	1
10	1	1	6	6	6	6	1	1	25	25	25	30
11	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23
12	1	8	8	30	6	6	6	6	25	25	25	1
13	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23
14	30	8	8	24	24	24	21	21	21	21	1	1
15	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23

Figura 10 - Melhor programação de plantio - ALNS - 15 lotes.

Lote/Mês	Ano 1											
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23
2	30	8	8	6	6	6	6	23	23	23	23	30
3	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23
4	1	8	8	30	6	6	6	6	25	25	25	1
5	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23
6	1	8	8	30	6	6	6	6	25	25	25	1
7	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23
8	1	1	6	6	6	6	1	1	25	25	25	30
9	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23
10	30	8	8	24	24	24	21	21	21	21	1	1
11	1	8	8	6	6	6	6	30	25	25	25	1
12	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23
13	1	8	8	6	6	6	6	30	25	25	25	1
14	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23
15	11	11	11	30	6	6	6	6	25	25	25	11
16	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23
17	1	8	8	30	6	6	6	6	25	25	25	1
18	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23
19	1	8	8	30	6	6	6	6	25	25	25	1
20	23	23	23	7	7	30	7	7	12	12	12	23

Figura 11 - Melhor programação de plantio - ALNS - 20 lotes.

5.2. COMPARAÇÃO COM A LITERATURA

A Tabela 8 apresenta uma comparação entre as FOs médias das soluções encontradas pelo ALNS para cada instância com os diversos métodos propostos por Aliano Filho (2012) e por Araújo e Mauri (2013). Observa-se que o método desenvolvido neste trabalho obteve melhora significativa quando comparado à média da lucratividade apresentada nos demais trabalhos, sendo 46,67% maior que o AG, 27,83% maior que o SA, 36,77% maior que o AM, 28,53% maior que o AG+SA e 11,80% maior que o CS.

Tabela 8 - Comparação das soluções do ALNS com outros métodos da literatura.

Método	Instâncias			Total	Melhora (%)
	10 lotes	15 lotes	20 lotes		
ALNS	91151,60	137818,85	184511,46	413481,91	-
Métodos propostos por Aliano Filho (2012)					
AG	55022,00	74910,00	90590,00	220522,00	46,67
SA	68304,00	101200,00	128890,00	298394,00	27,83
AM	55369,00	86916,00	119140,00	261425,00	36,77
AG+SA	66985,00	91796,00	136708,00	295489,00	28,53
Método proposto por Araújo e Mauri (2013)					
CS	78149,40	118457,90	168048,33	364655,63	11,80

O tempo computacional médio para as 50 execuções de cada instância do PRC-A é apresentado na Tabela 9, sendo que o tempo limite de cada execução foi de 500 segundos.

Tabela 9 - Comparação dos tempos médios obtidos.

Método	Tempo computacional (seg.)			Tempo médio (seg.)	Melhora (%)
	10 lotes	15 lotes	20 lotes		
ALNS	270,05	301,21	343,80	305,02	-
Métodos propostos por Aliano Filho (2012)					
AG	19,50	36,20	56,30	37,33	-87,76
SA	49,34	104,26	181,16	111,58	-63,42
AM	4,13	9,71	22,62	12,15	-96,02
AG+SA	6,38	10,65	13,67	10,23	-96,65
Método proposto por Araújo e Mauri (2013)					
CS	8,35	12,53	15,71	12,19	-96,00

Comparando o algoritmo proposto neste trabalho com os algoritmos apresentados por Aliano Filho (2012) e Araújo e Mauri (2013) quanto ao tempo médio para encontrar a melhor solução, o ALNS se mostrou 87,76% pior que o AG, 63,42% pior que o AS, 92,02% pior que o AM, 96,65% pior que o AG+SA e 96% pior que o CS.

Todos os experimentos foram realizados utilizando a linguagem de programação C++ em um computador de processador Intel Core I5 2.60GHz com 8GB de memória RAM e rodando o sistema operacional Windows 7.

Os experimentos computacionais de Aliano Filho (2012) foram realizados no *software* Matlab versão 7.4.0 R2007a, em um computador com processador Core 2 Quad com 2GB de memória RAM, e os testes realizados por Araújo e Mauri (2013)

foram realizados utilizando a linguagem de programação C++ em um computador com processador Intel Core I5 2,67GHz com 4GB de memória RAM.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho propôs uma alternativa para resolução de um Problema de Rotação de Culturas com Restrições de Adjacências (PRC-A). O PRC-A é um problema de otimização combinatória que envolve um número grande de variáveis com limitações e características variadas.

Para a resolução do PRC-A, foi implementado o *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS), que ainda não havia sido explorado para a resolução do PRC-A e vem apresentando bons resultados quando aplicado em outros problemas combinatoriais.

A partir dos resultados obtidos, o ALNS, mesmo necessitando de maior tempo computacional, se mostrou eficiente em todas as instâncias (10,15 e 20 lotes), encontrando soluções melhores que as apresentadas por Aliano Filho (2012), e Araújo e Mauri (2013). Por fim, é possível concluir que o método proposto neste trabalho pode ser considerado uma nova alternativa para a resolução do PRC-A.

Como trabalhos futuros, pode-se citar a inclusão de novas heurísticas de destruição e reconstrução para buscar uma melhora no desempenho do algoritmo e a redução do tempo de convergência da solução.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALIANO FILHO, A. Metaheurísticas em um problema de rotação de culturas. Dissertação (*Mestrado em Biometria*) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2012.
- ALIANO FILHO, A.; FLORENTINO, H. O.; PATO, M. V. Metaheuristics for a crop rotation problem. *International Journal of Metaheuristics*, v. 3, n. 3, p. 199-222, 2014.
- ALTIERI, M. Agroecologia: bases científicas para uma agricultura sustentável. Porto Alegre: Agropecuária, 2002.
- ALTIERI, M. Agroecologia: bases científicas para uma agricultura sustentável. 3 ed., Rio de Janeiro: Expressão Popular, 2012.
- ARF, O.; SILVA, L. S.; BUZETTI, S; ALVES, M. C.; SÁ, M. E.; RODRIGUES, R. A. F.; HERNANDEZ. F. B. T. Efeito da rotação de culturas, adubação verde e nitrogenada sobre o rendimento do feijão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 34, n. 11, p. 2029-2036, 1999.
- ARAÚJO, D. L.; MAURI, G. R. Clustering Search para resolução de um problema de rotação de culturas com restrições de adjacências. Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional – XLV SBPO, Natal/RN, Setembro de 2013.
- ASSAD, M. L. L.; ALMEIDA, J. Agricultura e sustentabilidade. *Revista Ciência & Ambiente*, n. 29, p.15-30, 2004.
- CHAVES, A. A. Uma meta-heurística híbrida com busca por agrupamentos aplicada a problemas de otimização combinatória. Tese (*Doutorado em Computação Aplicada*) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José Dos Campos, 2009.
- GLIESSMAN, S. R. Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável. 3 ed. Porto Alegre: Editora Universidade/UFRGS, 2005.
- MEMMAH, M. M.; LESCOURRET, F.; YAO, X.; LAVIGNE, C. Metaheuristics for agricultural land use optimization. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 35, n. 3, p. 975-998, 2015.

RIBEIRO, G. M.; LAPORTE, G.; MAURI, G. R. A comparison of three metaheuristics for the workover rig routing problem. *European Journal of Operational Research*, v. 220, n. 1, p. 28-36, 2012.

ROMEIRO, A. R. Agricultura sustentável, tecnologia e desenvolvimento rural. *Agricultura sustentável*, v. 3, n. 1/2, 1996.

SAGRILO, E.; LEITE, L. F. C.; GALVÃO, S. R. S.; LIMA, E. F. Manejo agroecológico do solo: os benefícios da adubação verde. *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa*, 2009.

SANTOS, L. M. R. Programação de rotação de culturas – modelos e métodos de solução. Tese (Doutorado em Ciências de Computação) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2009.

SANTOS, L. M. R.; COSTA, A. M.; ARENALES, M. N., SANTOS, R. H. S. Sustainable vegetable crop supply problem. *European Journal of Operational Research*, v. 204, p. 639-647, 2009.

SANTOS, L. M. R.; MICHELON, P.; ARENALES, M. N.; SANTOS, R. H. S. Crop rotation scheduling with adjacency constraints. *Annals of Operations Research*, v. 190, p. 165-180, 2011.

SANTOS, L. M. R.; MUNARI, B. P.; COSTA, A. M.; SANTOS, R. H. S. A branch-price-and-cut method for the vegetable crop rotation scheduling problem with minimal plot sizes. *European Journal of Operational Research*, 245, p 581-590, 2015.

SANTOS, L. M. R.; SANTOS, R. H.; ARENALES, M. N.; RAGGI, L. A. Um modelo para a programação de rotações de culturas. *Pesquisa Operacional*, v.27, n. 3, p. 535-547, 2007.

SHAW, P. A new local search algorithm providing high quality solutions to vehicle routing problems. Relatório Técnico - University of Strathclyde - Glasgow, 1997. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.51.1273&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 27 de Mai de 2016.