

## CLUSTERING SEARCH PARA RESOLUÇÃO DE UM PROBLEMA DE ROTAÇÃO DE CULTURAS COM RESTRIÇÕES DE ADJACÊNCIAS

**Diego Lucindo de Araújo**

Universidade Federal do Espírito Santo - UFES  
Alto Universitário, s/n, Alegre-ES  
diego\_lucindo@hotmail.com

**Geraldo Regis Mauri**

Universidade Federal do Espírito Santo - UFES  
Alto Universitário, s/n, Alegre-ES  
mauri@cca.ufes.br

### RESUMO

O Problema de Rotação de Culturas (PRC) consiste em alternar culturas em um determinado período de tempo e em um número pré-fixado de lotes com o objetivo de encontrar uma programação de plantio que maximize o lucro da produção levando em consideração algumas restrições. Dentre essas restrições, pode-se considerar um tempo para descanso e recuperação do solo, o não cultivo consecutivo de plantas da mesma família botânica, a época de sementeira de cada cultura, etc. Neste trabalho, é proposta uma aplicação da meta-heurística *ClusteringSearch* (CS) como uma nova alternativa para resolução de um PRC que considera um conjunto de restrições de adjacências. Para avaliação do desempenho da CS, foram realizados experimentos computacionais considerando um conjunto de instâncias utilizado em outro trabalho recente encontrado na literatura. Os resultados obtidos demonstram o potencial da CS, uma vez que as soluções encontradas superam aquelas conhecidas até então.

**PALAVRAS CHAVES.** *ClusteringSearch*, Problema de Rotação de Culturas, Meta-Heurísticas.

**Área principal:** AG&MA - PO na Agricultura e Meio Ambiente.

### ABSTRACT

The Crop Rotation Problem (CRP) consists in alternating crops in a given period of time and in a pre-set number of lots in order to find a planting schedule that maximizes the profit of the production assuming some constraints. Among these constraints, it can be considered the time for soil to rest and recovery, the non-consecutive cultivation of plants from the same botanical family, the sowing period of each crop, etc. In this paper, we propose an application of the *Clustering Search* (CS) meta-heuristic as a new alternative to solve a CRP that considers a set of adjacencies constraints. To evaluate the performance of the CS, computational experiments were performed considering a set of instances used in other recent work found in the literature. The obtained results demonstrate the potential of the CS improving the best-known solutions reported so far.

**KEYWORDS.** *Clustering Search*, Crop Rotation Problem, Metaheuristics.

**Main area:** AG&MA - OR in Agriculture and Environment.

## 1. Introdução

O Brasil é um país onde a produção agrícola é baseada principalmente na monocultura, devido a seu baixo custo de operacionalidade e fácil implantação. Porém, uma série de problemas é gerada como consequência, tais como o uso de pesticidas tóxicos que, além de ser altamente prejudicial ao meio ambiente, facilita a ação e prevalência de pragas e patógenos. A exaustão do solo também é uma consequência gerada da monocultura, implicando assim em uma dosagem de adubos químicos cada vez maior (ALTIERI, 2002).

Para uma policultura sustentável, pode-se evitar tais problemas, considerando juntamente o controle de pragas, o uso correto de agrotóxicos, a preservação ambiental de plantio e os ganhos econômicos.

A rotação de culturas aplicada de modo correto por um período razoavelmente longo melhora as características biológicas, físicas e químicas do solo, repõe matéria orgânica e protege o solo da erosão e dos ataques dos agentes climáticos, além de oferecer uma diversificada produção de alimentos (ALTIERI, 2002; ARF et al., 2009; GLIESSMAN, 2000).

Nesse contexto, o Problema de Rotação de Culturas – PRC (RODRIGUES, 2009) tem sido objeto de estudo nas áreas agrônomicas e ecológicas, devido a uma grande variedade de benefícios, além da diversificada produção de alimentos. A ideia básica consiste em alternar, em um determinado período de tempo, diferentes famílias botânicas de vegetais numa mesma área agrícola, sendo que as espécies escolhidas devem ter propósitos comerciais e de recuperação do solo.

Assim, de uma forma geral, algumas restrições de cultivo propostas por Arf et al. (2009), Altieri (2002) e Gliessman (2000) devem ser consideradas:

1. Separação de cultivos de mesma família botânica em lotes adjacentes;
2. Uma mesma família botânica de plantas não pode ser cultivada em uma mesma área consecutivamente;
3. Restrição de adubação verde (cultivo de leguminosas);
4. Descanso do solo ou período de pousio;
5. Atendimento dos ciclos e períodos de plantio referentes a cada cultura.

Alguns trabalhos como Lemalade et al. (2011) e Santos et al. (2011) descrevem a complexidade dos problemas de rotação de culturas devido às características das variáveis envolvidas e ao alto número de restrições a serem respeitadas. Diferentes abordagens para o PRC são apresentadas por Santos et al. (2010) e Costa et al. (2011), que consideram, por exemplo, a demanda e a estocagem da colheita, respectivamente.

Combinando cultivos de famílias botânicas diferentes, diminui-se a ação de pestes e aumenta-se a estabilidade da produção diante dos impactos ambientais. Já a alternância entre diferentes espécies botânicas em uma mesma área reduz o empobrecimento do solo, garantindo um melhor aproveitamento dos recursos naturais da terra.

O cultivo de leguminosas traz diversos benefícios, tais como uma maior quantidade de matéria orgânica no solo e a introdução de nitrogênio na terra por meio de suas raízes. Esse processo de fertilização natural evita a erosão do solo, mantém a umidade, controla a variação térmica e protege da intensidade da luz solar. No descanso do solo ou pousio, é deixado crescer livremente a vegetação por certo período de tempo, com o intuito de recuperar a estrutura do solo. Já o ciclo e o período de plantio das culturas devem ser respeitados durante a programação da rotação, permitindo assim que as culturas sejam plantadas e colhidas na época correta.

Este artigo tem como objetivo propor uma nova alternativa para resolver o PRC. É proposta uma aplicação da meta-heurística conhecida como *Clustering Search* (CS), utilizando um *Simulated Annealing* (SA) como gerador de soluções ao longo do processo de busca. A escolha da CS é baseada no fato desse método vir apresentando bons resultados para diferentes tipos de problemas combinatoriais, além de ainda não ter sido utilizado para resolução do PRC.

Os resultados da CS são comparados com os obtidos por diversos métodos apresentados em um trabalho recente encontrado na literatura, e as soluções obtidas são superiores em todos os casos.

Na Seção 2 é apresentada uma modelagem matemática para o Problema de Rotação de Culturas com Restrições de Adjacências (PRC-A), proposta por Filho (2012). A CS é apresentada em detalhes na Seção 3. Na Seção 4 são apresentados os experimentos computacionais, e algumas conclusões são reportadas na Seção 5.

## 2. Modelagem Matemática

Nessa seção, é descrita a formulação matemática proposta por Filho (2012), que é utilizada como base neste trabalho para representação do Problema de Rotação de Culturas com Restrições de Adjacências (PRC-A).

Considerando uma rotação de culturas de  $T$  anos divididos em  $M$  períodos, define-se uma *programação de rotação de culturas* de tamanho  $M$  como um calendário de plantio e cultivo na unidade de tempo adotada (dia, semana, mês, bimestre, etc.).

A programação de rotação consiste em decidir quais culturas deverão ser plantadas, em que período da rotação e os lotes onde estas deverão ser cultivadas. Pode-se associar um grafo  $G(V,A)$  à área de cultivo dividida em lotes, sendo que  $V$  é o conjunto dos lotes e  $A$  é o conjunto de arestas de modo que o par  $(u,v) \in A$  se e somente se os lotes  $u$  e  $v$  são adjacentes.

Entre os possíveis critérios, as mesmas restrições técnicas e de base sustentável foram seguidas, naquele e neste trabalho, como horizonte no plano de rotação. Esses critérios são apresentados a seguir:

- a) *Época de Semeadura* – a época de plantio e o ciclo de vida (intervalo de tempo do plantio à colheita) de cada cultura devem ser respeitados rigorosamente.
- b) *Plantio Consecutivo* – culturas de uma mesma família botânica não podem ser plantadas consecutivamente em um mesmo lote.
- c) *Áreas Adjacentes* – culturas de uma mesma família botânica não podem ser plantadas em lotes adjacentes em um mesmo período de tempo.
- d) *Pousio* – É necessário estabelecer período de descanso na programação de rotação em cada lote.
- e) *Adubação Verde* – no mínimo uma cultura leguminosa que faz a adubação verde deverá ser plantada em cada lote durante o período de programação e se sujeita às restrições (a), (b) e (c).

Alguns parâmetros e variáveis foram considerados para descrever o conjunto de programações de rotações de culturas que respeitam as restrições (a)–(e), 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 à  $N_f$  famílias botânicas;
- $L$  – número de lotes para plantio;
- $C$  – conjunto de culturas que podem ser selecionadas para fins comerciais, excluindo as culturas de adubação verde;
- $A$  – conjunto de culturas que podem ser alocadas para adubação verde (leguminosas);
- $F_p$  – conjunto de culturas da família botânica  $p$ , tal que  $p = 1, \dots, N_f$ ;
- $t_i$  – ciclo de vida da cultura  $i$ , 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 e  $T_i$  é o período mais tarde;
- $l_i$  – lucratividade (R\$/ha) da cultura  $i$  nos  $t_i$  períodos;
- $T$  – duração da programação, igual para todos os lotes;
- $area_k$  – área do lote  $k$  em hectares (ha);
- $S_k$  – o conjunto dos lotes adjacentes ao lote  $k$ .

Por simplicidade, o pousio é considerado como sendo a cultura indicada por  $n = N + 1$ . A variável decisória é representada da seguinte forma:

$x_{ijk} = 1$ , se a cultura  $i$  é plantada no período  $j$  no lote  $k$ , e 0 caso contrário, para  $i = 1, \dots, N+1, j \in I_i$  e  $k = 1, \dots, L$ .

A formulação matemática para maximizar a lucratividade da produção a fim de atender a todas as restrições impostas pode ser descrita da seguinte forma:

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

Sujeito a

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

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

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

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

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

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

A função objetivo (1) fornece a maximização da lucratividade da rotação a ser realizados nos  $L$  lotes, nos  $M$  períodos, com as culturas comerciais pertencentes ao conjunto  $C$ .

A restrição (2) proíbe que culturas da mesma família botânica sejam cultivadas em lotes adjacentes em um mesmo período de tempo. A restrição (3) impede que culturas de mesma família botânica possam ser cultivadas em períodos consecutivos dentro de um mesmo lote.

A restrição (4) é referente ao ciclo de vida de uma cultura, ou seja, impede que duas culturas ocupem o mesmo lote em um mesmo intervalo de tempo.

A obrigatoriedade de haver pelo menos um pousio em cada lote durante programação de rotação é garantida pela restrição (5). Para o pousio não são considerados as restrições de lotes adjacentes e plantio consecutivo. A restrição (6) se refere ao plantio de pelo menos uma cultura de adubação verde, e a restrição (7) garante que as variáveis de decisão sejam binárias.

Com o intuito de resolver esse modelo descrito pelas restrições (1)-(7), Filho (2012) utilizou diferentes meta-heurísticas, como: Algoritmo Genético (AG), Algoritmo Memético (AM) e *Simulated Annealing* (SA), além de uma heurística híbrida combinando o AG com o SA. Mais detalhes dessas meta-heurísticas aplicadas ao PRC-Asão apresentadas por Filho (2012).

### 3. ClusteringSearch para Resolução do PRC-A

A *ClusteringSearch*– CS (OLIVEIRA; LORENA, 2007) é uma meta-heurística híbrida que surgiu após modificações realizadas com a intenção de se generalizar o algoritmo *Evolutionary Clustering Search* (ECS) proposto por Oliveira e Lorena (2004). A ideia geral consiste em aplicar uma busca intensificada nas regiões supostamente promissoras, detectadas por meio de um processo de concentração de soluções.

Segundo Chaves e Lorena (2010), a CS é um método iterativo que procura dividir o espaço de busca e localizar regiões promissoras por meio do agrupamento dessas em *clusters*. Um *cluster* pode ser descrito como sendo um conjunto de três atributos  $C = \{c, v, r\}$ . Sendo assim,

um *cluster*  $j$  é representado pelo seu centro  $c_j$ , que marca sua localização dentro da região de busca. A quantidade de soluções associadas ao *cluster*  $j$  é definida pelo seu volume  $v_j$ . Quando o volume alcança certo limitador  $\lambda$ , a região do *cluster* se torna promissora. O atributo  $r_j$  atua verificando se o centro do *cluster*  $j$  está ou não sendo melhorado pela busca local. Quando a busca local é aplicada no *cluster*  $j$  e não melhora a solução, o valor de  $r_j$  é incrementado agindo como um contador para o número de vezes em que a solução não melhorou, sendo assim,  $r_j$  representa o índice de ineficácia do *cluster*. Uma variável  $r_{max}$  é definida como um número máximo de vezes que  $r_j$  pode alcançar. Essa estratégia evita que regiões que já tenham sido suficientemente exploradas sejam consideradas na busca local.

A Figura 1 ilustra o fluxograma de execução da CS, que pode ser descrita basicamente por meio de quatro componentes principais:

- uma meta-heurística geradora de soluções;
- um processo de agrupamento iterativo;
- um analisador de agrupamentos;
- uma heurística de busca local.

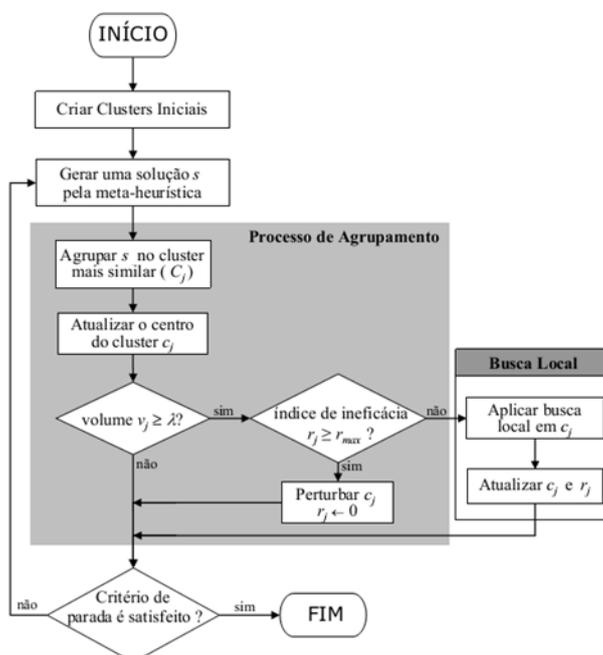


Figura 1 - Fluxograma da CS (CHAVES; LORENA, 2010).

A meta-heurística geradora de soluções trabalha em tempo integral, gerando soluções ao longo das iterações e as enviando para o processo de agrupamento. Neste trabalho, um *Simulated Annealing* (SA), baseado no proposto por Mauri e Lorena (2009), é usado como gerador de soluções. Uma solução inicial é criada por meio da distribuição aleatória, em cada lote, das culturas disponíveis (Tabela 1). Nos dois últimos períodos da programação de plantio para cada lote, foram inseridas uma cultura de adubação verde e um pousio, respectivamente. Neste momento, foram consideradas somente as restrições de descanso do solo e de recuperação do solo por meio da adubação verde. As demais restrições foram consideradas na função objetivo, conforme Equação (8). A partir dessa solução, o SA executa movimentos de troca a fim de melhorar a solução atual. A vizinhança  $N$  utilizada pelo SA foi baseada em dois movimentos de troca, sendo que, para cada iteração do SA, apenas um deles é executado, e sua escolha é definida de forma aleatória e uniformemente distribuída. O primeiro diz respeito à troca entre 2 lotes, no qual simplesmente é feita a troca de todas as culturas plantadas em um lote com todas as culturas plantadas em outro lote, sendo que ambos os lotes são escolhidos de forma aleatória entre todos os possíveis lotes da programação de plantio. O segundo movimento de troca consiste

em escolher aleatoriamente uma cultura plantada dentro da programação de plantio e retirá-la, substituindo-a por outra cultura também escolhida aleatoriamente entre todas as culturas disponíveis. Caso a cultura escolhida possua uma época de plantio e um ciclo de vida inconsistente com a cultura retirada, ela é então descartada e uma nova cultura é escolhida. Esse processo de escolha de cultura é repetido até que se encontre uma cultura com um ciclo de vida menor ou igual ao da cultura retirada e que respeite a época de plantio. Se após o movimento de troca algum período da programação de plantio ficar sem nenhuma cultura, este período é então preenchido com pousio.

O processo de agrupamento iterativo consiste em reunir soluções similares a *cluster* e o centro  $c_j$  desse *cluster* é atualizado com as informações da nova solução alocada, fazendo com que o centro do *clusters* sofra uma perturbação. Neste trabalho, a partir de um número  $\gamma$  de *clusters*, uma nova solução  $s$  gerada pelo SA é atribuída ao *cluster*  $j$  mais similar a solução corrente de acordo com a distância Hamming  $H_j$  (HAMMING, 1950) que, neste trabalho, foi calculada de acordo com o número de desigualdades encontradas entre a solução  $s$  e o centro do *cluster*. Concluindo este processo, a solução  $s$  é atribuída ao *cluster*  $j$  que minimiza esta distância. Para isso, é utilizada a “assimilação direta”, ou seja, caso a solução  $s$  represente uma solução melhor do que o centro do *cluster* atual ( $c_i$ ),  $s$  passará a ser o novo centro *cluster*.

```

1. Criar  $\gamma$  novas soluções (clusters) aleatoriamente
2.  $v_i \leftarrow 0$  e  $r_i \leftarrow 0 \forall i = 1, \dots, \gamma$   $s \leftarrow$  solução inicial  $s^* \leftarrow s$   $T \leftarrow T_0$ 
3. ENQUANTO  $T > T_c$  FAÇA
4.   iter  $\leftarrow 0$ 
5.   ENQUANTO iter  $< SA_{max}$  FAÇA
6.     iter  $\leftarrow$  iter + 1  $s' \leftarrow N(s)$ 
7.     SE  $f(s') > f(s)$  ENTÃO
8.        $s \leftarrow s'$ 
9.     SENÃO
10.      Com probabilidade  $e^{-(f(s)-f(s'))/T}$   $s \leftarrow s'$ 
11.     FIM-SE
12.   FIM-ENQUANTO
13.    $T \leftarrow \alpha T$   $i \leftarrow \arg \min_{i \in \{1, \dots, \gamma\}} \{H_i\}$   $v_i \leftarrow v_i + 1$   $c_i \leftarrow$  melhor( $s, c_i$ )
14.   SE  $v_i = \lambda$  ENTÃO
15.      $v_i \leftarrow 0$   $s \leftarrow$  busca local( $c_i$ )
16.     SE  $f(s) = f(c_i)$  ENTÃO
17.        $r_i \leftarrow r_i + 1$ 
18.       SE  $r_i = r_{max}$  ENTÃO
19.          $r_i \leftarrow 0$   $c_i \leftarrow N(c_i)$ 
20.       FIM-SE
21.     SENÃO
22.        $r_i \leftarrow 0$ 
23.     FIM-SE
24.   FIM-SE
25.    $s^* \leftarrow \max(s^*, c_i)$ 
26. FIM-ENQUANTO
27. Retornar  $s^*$ 

```

Figura 2 - Pseudocódigo da CS implementada.

O analisador de agrupamentos objetiva realizar uma análise do volume  $v_j$  de cada *cluster*, observando se esse volume atingiu um limitante  $\lambda$  definido previamente. Sempre que  $\lambda$  for atingido, significa que algum padrão de solução está sendo predominantemente gerado pela meta-heurística geradora. Portanto, tal *cluster* pode estar indicando uma possível região promissora e precisa ser mais bem investigado. O analisador de agrupamentos também é responsável por gerar uma perturbação no centro dos *clusters* com baixa densidade por meio do seu índice de ineficácia ( $r_j \geq r_{max}$ ), permitindo assim escapar de ótimos locais.

Por outro lado, se  $r_j < r_{max}$ , a heurística de busca local é aplicada no centro  $c_j$  do *cluster* provendo a exploração de uma suposta região promissora. Neste trabalho, a busca local é baseada na troca de todas as culturas na programação de plantio entre dois lotes escolhidos de forma aleatória dentre todos os lotes disponíveis. Esse processo é repetido até que se encontre uma solução melhor do que o centro do *cluster*. Caso o índice de ineficiência  $r_j$  atinja seu limite  $r_{max}$ , que indica o número de vezes que a busca local foi executada sem encontrar nenhuma melhora, uma perturbação é aplicada ao centro do *cluster*.

Por fim, encerrado o processo de agrupamento e análise, retorna-se para a meta-heurística geradora de soluções, que irá gerar uma nova solução. O critério de parada da CS é geralmente definido pela meta-heurística escolhida que, no caso deste trabalho, foi utilizado o critério do SA (temperatura de congelamento).

O pseudocódigo da CS implementada para resolução do PRC-A é apresentado na Figura 2.

Neste trabalho, a função objetivo utilizada na CS é descrita pela Equação (8), que trata o problema de forma relaxada, utilizando pesos para penalizar a violação das restrições do modelo. Para cada restrição violada na programação de plantio, um peso no valor de  $p$  unidades é subtraído da lucratividade total obtida pela função objetivo.

$$\sum_{i \in C} \sum_{j \in I_i} \sum_{k=1}^L area_k l_i x_{ijk} - [(nCE + nLA + nPC + nAV + nLP + nCI) \times p] \quad (8)$$

Nessa função objetivo,  $nCE$  indica o número de culturas plantadas fora da época de plantio;  $nLA$  representa o número de lotes adjacentes que possuem culturas de mesma família botânica;  $nPC$  indica o número de vezes em que uma cultura de mesma família botânica é plantada consecutivamente em um mesmo lote;  $nAV$  indica o número de lotes que não possuem adubação verde durante o calendário de rotação;  $nLP$  denota o número de lotes que não possuem nenhum pousio durante o calendário de rotação;  $nCI$  indica o número de culturas plantadas com o ciclo de vida incorreto; e por fim,  $p$  representa o peso utilizado para “penalizar” as violações nas restrições.

#### 4. Experimentos Computacionais

Com o intuito de verificar a eficiência da *ClusteringSearch* (CS) proposta para a resolução do Problema de Rotação de Culturas com Restrições de Adjacência (PRC-A), foram realizados experimentos computacionais utilizando três diferentes instâncias. Essas instâncias são formadas com base nos dados apresentados por Filho (2012), sendo todas com 29 culturas (Tabela 1) de plantio e considerando 12 meses como o período para rotação. A diferença entre as instâncias está no número de lotes disponíveis para o plantio que, no caso, são 10, 15 e 20, respectivamente.

A Figura 3 apresenta um esquema com a relação de adjacência entre os lotes para as três instâncias consideradas (10, 15 e 20 lotes), e a área (em ha) de cada lote é descrita na Tabela 2.

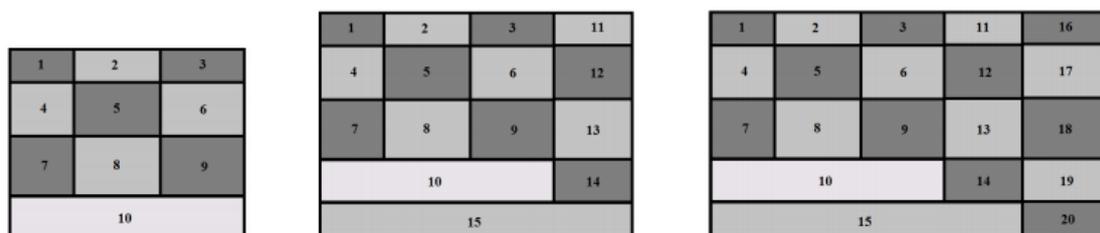


Figura 3 - Relação de adjacência entre os lotes para cada instância (FILHO, 2012).

Na Tabela 1, são apresentados os dados das culturas disponíveis para o plantio, sendo: nome da cultura, família botânica, época de plantio, ciclo de vida (em meses) e suas respectivas lucratividades (em R\$).

Tabela 1 - Culturas disponíveis para o plantio (FILHO, 2012).

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

Tabela 2 - Área (em ha) dos lotes (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

Para calibração dos parâmetros da CS, as três instâncias (10, 15 e 20 lotes) foram resolvidas 5 vezes pela CS, variando sempre os valores de cada parâmetro. Assim, um parâmetro recebeu vários valores em quanto os demais continuaram com valores fixos e, então, foi adotado como valor final para cada parâmetro aqueles que obtiveram melhor resultado médio encontrado entre as 5 execuções para cada instância. Após definir o valor mais adequado para um parâmetro, outro parâmetro foi escolhido por meio do mesmo processo, até que todos os fossem definidos. Ao final da calibração, os parâmetros foram definidos conforme apresentado na Tabela 3. Os

principais parâmetros da CS,  $\gamma$ ,  $\lambda$  e  $r_{max}$ , foram variados nos intervalos [5,12], [3,10] e [2,5], respectivamente.

Um processo similar foi adotado para calibração do “peso”  $p$  utilizado na função objetivo (8). Nesse caso, foram utilizados os valores 1000, 10000, 100000 e 1000000. Para os dois primeiros valores, a CS resultou, alguns casos, em soluções inviáveis. Já para o último valor, foi possível notar uma piora no desempenho do SA (devido ao critério de aceitação), que atua como gerador de soluções para a CS. Assim, foi utilizado o valor de 100000, para o qual a CS resultou em soluções viáveis em todos os casos.

Tabela 3- Valores dos parâmetros da CS após a calibração.

Parâmetro	Significado	Valor
$\gamma$	Número máximo de <i>clusters</i>	10
$\lambda$	Volume máximo para aplicação da busca local	7
$r_{max}$	Limite para aplicação da perturbação	4
$T_0$	Temperatura inicial para o SA	1000
$T_c$	Temperatura de congelamento para o SA	0,001
$\alpha$	Taxa de resfriamento para o SA	0,975
$SA_{max}$	Número máximo de iterações para o SA	1000
$p$	Valor da penalização utilizada na função objetivo (8)	100000

Após a calibração dos parâmetros da CS, a mesma foi executada por 100 vezes para cada instância. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4. Nessa tabela, é apresentado, para cada instância, o valor da melhor solução encontrada e a solução média (entre as 100 execuções), o desvio (((Melhor – Média)/Melhor)\*100) e o tempo médio de execução.

Tabela 4- Resultados obtidos por meio de 100 execuções da CS proposta.

Instância	Melhor Solução (R\$)	Solução Média (R\$)	Desvio (%)	Tempo Médio (seg.)
10 Lotes	86330,00	78149,40	9,47	8,35
15 Lotes	126572,50	118457,90	6,41	12,53
20 Lotes	176362,50	168048,33	4,71	15,71

As Figuras 4, 5 e 6 ilustram, respectivamente, as melhores programações de plantio (soluções) obtidas pela CS para as 3 instâncias do PRC-A (10, 15 e 20 lotes). Nessas figuras, os números representam as culturas listadas na Tabela 1 (coluna Id).

Lote/Mês	Ano 1											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	30	8	8	6	6	6	6	30	25	25	25	30
2	16	30	24	24	24	7	7	12	12	12	16	16
3	1	1	7	7	6	6	6	6	25	25	25	30
4	23	23	23	23	7	7	30	12	12	12	1	1
5	1	1	7	7	6	6	6	6	25	25	25	30
6	23	23	23	1	1	7	7	12	12	12	30	23
7	1	1	7	7	6	6	6	6	25	25	25	30
8	16	30	30	24	24	24	21	21	21	21	16	16
9	1	1	7	7	6	6	6	6	25	25	25	30
10	23	23	23	1	1	7	7	12	12	12	30	23

Figura 4 - Melhor programação de plantio encontrada para o PRC-A com 10 lotes.

Lote/Mês	Ano 1											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	1	1	7	7	30	29	29	29	29	1	1	30
2	16	16	24	24	24	7	7	30	12	12	12	16
3	1	1	7	7	6	6	6	6	25	25	25	30
4	16	30	24	24	24	7	7	12	12	12	16	16
5	1	1	30	7	7	1	1	30	25	25	25	30
6	23	23	23	1	1	7	7	12	12	12	30	23
7	1	1	30	7	7	1	1	30	25	25	25	30
8	23	23	23	6	6	6	6	1	1	30	30	23
9	16	30	30	7	7	1	1	25	25	25	16	16
10	30	8	8	24	24	24	7	7	12	12	12	30
11	16	30	24	24	24	7	7	12	12	12	16	16
12	1	1	7	7	6	6	6	6	25	25	25	30
13	30	30	24	24	24	7	7	1	1	12	12	12
14	16	30	6	6	6	6	30	25	25	25	16	16
15	23	23	30	30	7	7	21	21	21	21	23	23

Figura 5 - Melhor programação de plantio encontrada para o PRC-A com 15 lotes.

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

Figura 6 - Melhor programação de plantio encontrada para o PRC-A com 20 lotes.

A Tabela 5 apresenta uma comparação entre a média das soluções obtidas pela CS com os diversos métodos propostos por Filho (2012). Como pode ser observado nessa tabela, a CS apresentou uma melhora significativa em relação à média da lucratividade, sendo 65,36% maior que o AG, 22,20% maior que o SA, 39,48% maior que o AM e 23,40% maior que a heurística híbrida AG+SA.

Tabela 5 - Comparação das soluções obtidas com outros métodos da literatura.

Método	Instância			Total	Melhora (%)
	10 lotes	15 lotes	20 lotes		
CS	78149,40	118457,90	168048,33	364655,63	-
AG	55022,00	74910,00	90590,00	220522,00	65,36
SA	68304,00	101200,00	128890,00	298394,00	22,20
AM	55369,00	86916,00	119140,00	261425,00	39,48
AG+SA	66985,00	91796,00	136708,00	295489,00	23,40

O tempo computacional médio para as 100 execuções de cada método para cada instância é apresentado na Tabela 6. Nessa tabela, pode-se observar que todos os métodos apresentaram pequenos tempos computacionais.

Tabela 6 - Comparação dos tempos computacionais médios obtidos.

Método	Tempo computacional (s)			Tempo Médio (seg.)	Melhora (%)
	10 lotes	15 lotes	20 lotes		
CS	8,35	12,53	15,71	12,19	-
AG	19,50	36,20	56,30	37,33	67,34
SA	49,34	104,26	181,16	111,58	89,07
AM	4,13	9,71	22,62	12,15	-0,32
AG+SA	6,38	10,65	13,67	10,23	-19,15

Todos os experimentos foram realizados utilizando a linguagem de programação C++ em um computador com processador *Intel Core I5 2.67GHz* com 4GB de memória RAM. Os experimentos computacionais de Filho (2012) foram realizados no software Matlab versão 7.4.0 R2007a, em um computador com processador *Core 2 Quadcom* 2GB de memória RAM.

## 5. Conclusões

Este trabalho apresentou uma nova alternativa para resolução de um dos problemas encontrados no planejamento agrícola de produção de hortaliças, conhecido como Problema de Rotação de Culturas com Restrições de Adjacências (PRC-A). O PRC-A é um problema de otimização combinatória complexo, pois envolve um número grande de culturas com limitações particulares e características muito variadas.

Para resolução do PRC-A, foi proposta uma aplicação da meta-heurística *ClusteringSearch*(CS), que vem apresentando bons resultados na resolução de outros problemas combinatoriais e que ainda não foi utilizada para resolução do PRC-A.

Os resultados obtidos demonstram a eficiência do método proposto, uma vez que soluções factíveis melhores do que as reportadas por outros métodos encontrados na literatura foram obtidas. Assim, fica evidente que a CS pode ser considerada como uma nova e boa alternativa para resolução do PRC-A.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (processos 300747/2010-1 e 477148/2011-5) e à FAPES (processo 59830042/2012) pelo apoio financeiro.

## Referências

- Altieri, M.A.** *Agroecologia: bases científicas para uma agricultura sustentável*. Editora Agropecuária, Guaíba, 2002.
- Arf, O., Silva, L. S. e Buzetti, S.** (1999), Efeito da rotação de culturas, adubação verde e nitrogenada sobre o rendimento do feijão, *Pesquisa agropecuária brasileira*, 34, 2029-2036.
- Chaves, A. A. e Lorena, L. A. N.** (2010), Clustering search algorithm for the capacitated centered clustering problem, *Computers & Operations Research*, 37, 552-558.
- Costa, A. M., Santos, L. M. R., Alem, D. J. e Ricardo, H. S. S.** (2011), Sustainable vegetable crop supply problem with perishable stocks. *Annals of Operations Research*, Doi: 10.1007/s10479-010-0830-y.
- Filho, A.A.** Metaheurísticas em um problema de rotação de culturas, *Dissertação de Mestrado em Biometria*, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - IBB-UNESP, 2012, ([www.ibb.unesp.br/posgrad/teses/biometria\\_me\\_2012\\_angelo\\_filho.pdf](http://www.ibb.unesp.br/posgrad/teses/biometria_me_2012_angelo_filho.pdf)), 5, 2013.
- Gliessman, S.R.** *Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável*. UFRG, Porto Alegre, 2000.

- Hamming, R. W.**(1950), Error detecting and error correcting codes,*Bell System Technical Journal*, 26, 147-160.
- Lemalade, J. L., Nagih, A. e Plateau, G.** (2011), A MIP flow model for crop-rotation planning in a context of forest sustainable development. *Annals of Operations Research*, 190, 149-164.
- Mauri, G.R.e Lorena, L.A.N.**(2009), Uma nova abordagem para o problema dial-a-ride. *Produção*, 19, 41-54.
- Oliveira, A. C. M. e Lorena, L. A. N.**(2007), Hybrid evolutionary algorithms and clustering search, *Hybrid Evolutionary Algorithms - Studies in Computational Intelligence*, 75, 77-99.
- Oliveira, A. C. M. e Lorena, L. A. N.**(2004), Detecting promising areas by evolutionary clustering search,*Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 3171, 385-394.
- Rodrigues, L.M.S.** Programação de rotação de culturas: modelos e métodos de solução. *Tese de Doutorado em Ciências da Computação e Matemática Computacional*, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação – ICMC-USP,2009, ([www.teses.usp.br/teses/disponiveis/55/55134/tde-09062009-110129/pt-br.php](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/55/55134/tde-09062009-110129/pt-br.php)),5, 2013.
- Santos, L. M. R., Costa, A. M., Arenales, M. N., e Ricardo, H. S. S.** (2010), Sustainablevegetablecropsupply problem. *European Journal of Operational Research*, 204, 639–647.
- Santos, L. M. R.,Michelon, P. R. H., Arenales, M. N. e Ricardo, H. S. S.**(2011),Crop rotation scheduling with adjacency constraint. *Annals of OperationsResearch*, 190, 165-180.