

# Um Sistema Classificador de Imagens de Sensoriamento Remoto baseado em Algoritmos Genéticos

Maria Isabel G. Moreira, Marilton S. de Aguiar

Escola de Informática, UCPel - Universidade Católica de Pelotas,

Rua Felix da Cunha, 412

96010-000, Pelotas, RS

E-mail: belm@atlas.ucpel.tche.br, marilton@atlas.ucpel.tche.br

## 1 Introdução

Esse artigo tem por principal finalidade demonstrar as funcionalidades e estudos feitos para se obter o Sistema Classificador para Imagens de Sensoriamento Remoto baseado em Algoritmos Genéticos. Esse sistema tem como objetivo principal avaliar a viabilidade da utilização de Algoritmos Genéticos (AG's) em classificação de imagens obtidas por sensoriamento remoto e mostrar que AG's são capazes de gerar uma solução muito próxima da ótima para o problema através de sua análise probabilística, apesar de mostrar soluções aproximadas.

Nesse artigo serão mostrados os objetivos específicos desse sistema, o qual foi implementado usando a linguagem de programação Java e a primitiva gráfica JAI, um sistema baseado em algoritmos genéticos para fazer o mapeamento das classes de uso da região em torno da Lagoa Pequena, região situada na zona sul do RS, próxima à Lagoa dos Patos, na divisa dos municípios de Pelotas e Turuçu.

O mapeamento foi feito através de um processamento da imagem, da área em questão, com a finalidade de fragmentar essa região em unidades homogêneas considerando algumas de suas características como, por exemplo: (i) formações herbáceas naturais antropizadas (campos litorâneos utilizados para o cultivo de arroz), (ii) formações arbustivas naturais (mata de restinga, aluvial e corpos d'água) e (iii) formações herbáceas naturais (vegetação de banhados e campos).

Preliminarmente, a fim de estudo de técnicas classificadoras existentes e de validar os resultados utilizou-se o software SPRING para gerar imagens, onde as principais informações das imagens para o reconhecimento de padrões e objetos homogêneos foram extraídas. Após isso, essas imagens geradas foram comparadas com as imagens geradas pelo Sistema Classificador baseado em Algoritmos Genéticos e geraram os primeiros resultados analisados nesse artigo. Afim de validar também os resultados do sistema foi feita uma simulação da evolução da ocupação e uso do solo dessa área

baseada em séries históricas de dados de imagens do satélite LANDSAT, os quais serão mostrados nesse artigo.

## 2 Sensoriamento Remoto

Define-se Sensoriamento Remoto como uma ciência que obtém-se informações sobre um determinado objeto, área ou fenômeno através da análise de dados obtidos por um aparelho, sem que o mesmo esteja diretamente em contato com o objeto analisado [Lillesand e Kiefer 1994].

As imagens de Sensoriamento Remoto, obtidas por intermédio de um sensor, são constituídas por um arranjo de elementos sobre a forma de uma matriz. Os elementos ou *pixels* que compõem esta matriz tem sua localização definida por um sistema de coordenadas, denominadas x e y.

Além disso, estas imagens trabalham com o conceito de composição de imagens, onde três bandas espectrais geradas pelo sensor utilizado, são combinadas para se obter a composição colorida. Esta composição, tem por objetivo aprimorar a capacidade humana visual, onde se torna mais fácil discriminar cores do que tons de cinza [CROSTA 1993].

Para obter a classificação de imagens é necessário utilizar técnicas de processamento, como a segmentação e classificações, para uma melhor obtenção dos resultados.

### 2.1 Segmentação e Classificação de Imagens

A técnica de segmentação de imagens é um procedimento que deve ser adotado sempre antes de ocorrer as técnicas de classificação de imagens afim de se obter os critérios mais relevantes das imagens de satélite. Nela as imagens são particionadas em áreas mais similares, onde as áreas são formadas por um conjunto de *pixels* contínuos que se apresentam uniformemente a um dado atributo [Moreira 1996].

A técnica de classificação de imagens é a maneira mais utilizada para a extração de

informação que possibilita a incorporação de um sistema de informação geográfica (SIG), onde existem três principais tipos de classificação de imagens de Sensoriamento Remoto. A classificação não-supervisionada é definida quando o classificador não utiliza nenhum conhecimento sobre as classes ou vegetações existentes na região e com base nisso define sem influências externas a qual classe a região já segmentada pertence.

A classificação supervisionada é utilizada e definida quando tem-se algum conhecimento prévio sobre a região que se quer obter a classificação. Isto porque, o método necessita ser previamente treinado de forma confiável para que se obtenha amostras as quais, após o treinamento, seja possível associar as regiões segmentadas as classes. Por fim, a classificação híbrida traz a junção das principais vantagens das técnicas abordadas acima, onde obtém-se uma maior eficiência para a caracterização de uma região em específico.

### 3 Algoritmos Genéticos

John Holland estava intrigado com o processo de evolução natural, pois acreditava que incorporando os princípios da evolução em um programa de computador pudesse resolver, por simulação, problemas complexos assim como fazia a natureza. Então em 1970, junto com colegas e alunos da Universidade de Michigan, dedicou-se ao estudo de processos naturais adaptáveis e criou os Algoritmos Genéticos (AG's).

O algoritmo criado por eles é capaz de resolver problemas complexos de uma maneira muito simples, e assim como na natureza o algoritmo não sabe o tipo de problema que estava sendo resolvido.

Os AG's são técnicas baseadas na teoria da evolução, no quais as variáveis são representadas como genes de um cromossomo. Juntamente com estratégias evolucionais e programação evolutiva formam uma classe de pesquisa baseado em evolução natural [CONCILIO 2000], buscando resolver problemas de otimização onde o espaço de busca é muito grande e os métodos convencionais não se demonstram eficientes.

Eles ocupam lugar de destaque entre os paradigmas da computação evolutiva, por conter de forma simples e natural os conceitos necessários da computação evolutiva. Além disso, têm resultados bastante aceitáveis com relação aos recursos empregados e pela ampla gama de problemas aplicáveis. A principal vantagem deles é de trabalhar com o conceito de população, ao contrário de outros métodos que trabalham com um só ponto, avaliando apenas um candidato à solução por vez.

Os algoritmos genéticos são compostos por algumas principais etapas e faz a evolução em suas

sucessivas gerações, mediante aos três operadores (mutação, seleção e cruzamento), as quais serão descritas a seguir (Figura 1).

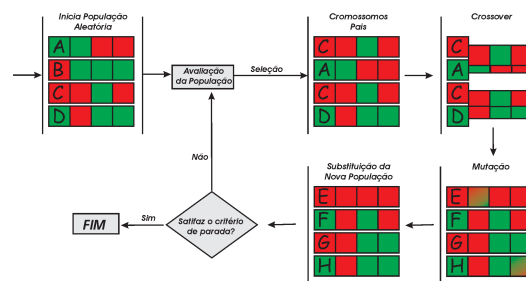


Figura 1: Etapas e Operadores Genéticos dos AG's

#### 3.1 Etapas dos Algoritmos Genéticos

A **geração inicial da população** sorteia indivíduos que tentaram obter a melhor solução para um determinado problema. A sua geração pode ser feita através de forma aleatória, sem haver influência do meio externo, ou através de uma seleção heurística. Todo conhecimento sobre o problema deve ser utilizado nesta etapa para minimizar o tempo de computação e encontrar mais rápido o valor ótimo [CONCILIO 2000].

Após isto, os indivíduos dessa população passam por uma **avaliação**, obtida pela função objetivo, que determinará o grau de adaptação de cada cromossomo. O retorno dessa função ordena os indivíduos conforme a sua adaptação e é uma característica intrínseca ao indivíduo, que indicará qual é a habilidade que esse possui para sobreviver e produzir a melhor resposta. No Algoritmo Genético essa etapa é a mais crítica, pois já que as funções deverão ser avaliadas para cada cromossomo de cada população durante todo o processo evolutivo [Tavares 2000].

Os indivíduos que obtiverem na fase de avaliação um maior grau de aptidão são escolhidos para serem geneticamente alterados nos operadores genéticos. O operador **seleção** baseia-se no princípio da sobrevivência dos melhores indivíduos, onde os cromossomos com mais alta probabilidade de sobrevivência são copiados de forma semirandômica uma ou mais vezes para um novo conjunto que formará a próxima geração da população. Os indivíduos que foram definidos por baixa aptidão na fase anterior são descartados.

Os cromossomos selecionados na etapa anterior passam pelo operador genético **cruzamento** que mistura materiais genéticos de dois indivíduos chamados de pais, produzindo dois novos indivíduos conhecidos como filhos, que herdam as características genéticas de seus progenitores. Durante esta troca de material genético, há uma tendência de transmissão de características dominantes para as futuras

gerações [Larsen 2002]. Funciona fazendo rupturas no código genético, e quanto maior esta ruptura menor será a semelhança entre pais e filhos, dificultando a convergência e quanto maior for a taxa de cruzamento, maior é a quantidade de indivíduos introduzidos na nova população de cruzamento [BARCELLOS 2000]. Este operador pode ser implementado de três maneiras: cruzamento de um ponto, cruzamento de 2 ou mais pontos e cruzamento uniforme.

O operador genético **mutação** é responsável pela introdução e manutenção da diversidade genética da população, alterando um ou mais componentes de uma estrutura escolhida dos cromossomos orneendo meios para introdução de novos elementos da população.

A **substituição** consiste na alteração da antiga população pela nova população gerada com os cromossomos escolhidos e modificados na fase dos operadores genéticos. Os critérios com que selecionam os pais não necessariamente têm que ser os mesmos usados para selecionar os filhos. Para atender o critério de substituição existem quatro modelos: Substituição Imediata, Substituição por Fator Cheio, Substituição por Inserção, Substituição por Inclusão.

O critério de parada de um AG é verificado através de um teste, e se a condição de parada for satisfatória é parada a execução do algoritmo mas se caso não atinja o critério de parada estabelecido, a população retorna às fases do algoritmo para que se ache a melhor solução. O critério de parada pode ser quando o AG atingir um dado número de gerações ou quando a função objetivo chegar a um determinado valor definido previamente. Outro critério poderá ser a convergência, ou seja, quando não ocorrer melhoramento significativo no cromossomo de maior aptidão por um dado número de gerações, o processamento pára.

## 4 Lagoa Pequena

Para se obter a avaliação da viabilidade da aplicação de Algoritmos Genéticos em classificação de imagens de Sensoriamento Remoto foram utilizadas as imagens e os dados da Região em torno da Lagoa Pequena (Figura 2).

A Lagoa Pequena está localizada na zona sul do estado do Rio Grande do Sul (RS), próximo a Lagoa dos Patos, na divisa dos municípios de Pelotas e Turuçu. A lagoa tem sido apontada por inúmeros órgãos governamentais nacionais e internacionais (como a MMA e a JICA) como uma área de extrema relevância a conservação e uso sustentável dos seus recursos naturais.

Além dos banhados, a região apresenta uma grande variedade de tipos de vegetações como: campo, mata de restinga, mata de pinus, aluvial,

solo exposto. Apresenta área urbana e grande número de regiões onde é cultivado arroz, além delas apresenta locais que estão em repouso que posteriormente serão cultivados novamente, pois entre um cultivo e outro é necessário a espera de três ou quatro anos.



Figura 2: Área de Estudo do Sistema: a Lagoa Pequena

## 5 Sistema Classificador baseado em Algoritmos Genéticos

O Sistema Classificador baseado em Algoritmos Genéticos é uma ferramenta que visa classificar as imagens de satélites em relação a ocupação e utilização do uso do solo. Este foi implementado na linguagem JAVA, com a principal característica de acoplar primitivas gráficas, como a utilizada nesse projeto, a JAI.

O sistema foi implementado em três módulos. A primeira parte foi chamada de segmentação, que deverá ocorrer sempre antes dos próximos módulos desse projeto. Esse módulo tem por objetivo dividir-se em métodos que sejam capazes de desenvolver as principais etapas do algoritmo genético, como sorteio aleatório da população, *crossover*, mutação e testes dos critérios de parada, bem como fazer com que a segmentação ou divisão da imagem em quadrantes menores com tonalidades dos *pixels* mais parecidas, seja possível através das recursões dos mesmos.

Além disso, essa classe deve ser sempre executada antes das fases seguintes do Sistema Classificador baseado em Algoritmos Genéticos pelo fato de que a mesma é responsável por gerar os arquivos com as coordenadas dos *pixels* e as suas tonalidades médias que serão os principais aspectos para a classificação.

O algoritmo de recursão dos quadrantes na imagem só pára quando obter determinadas condições nas quais se considera que o Algoritmo Genético encontrou uma solução aceitável ou tenha fracassado no processo de busca e não faça sentido continuar. Para testar se o Sistema Classificador encontrou esta solução foram estipulados três

critérios de parada:

- Quando o sistema não puder mais sortear, baseado na população inicial, *pixels* aleatórios. Isto porque o tamanho do quadrante é muito pequeno e o valor da população aleatória para o novo sorteio será igual a 0. Com isso, o quadrante que está sendo analisado atingirá sua convergência pois não apresentará nenhuma mudança significativa na próxima recursão.
- Quando o quadrante em questão, obtiver valor do *fitness* dentro do intervalo formado pelo menor valor e maior valor do *fitness*, esses informados como parâmetros de entrada do sistema.
- Quando o quadrante não atingiu o segundo critério, então é feito *crossover* e mutação nos *pixels* sorteados com número de iterações definidas nos parâmetros de entrada. Caso cada uma destas etapas atinja o intervalo de *fitness* o algoritmo pára com a recursão no quadrante em questão, caso contrário repete-se o processo com o número de iterações, e se mesmo assim não obtiver os critérios, faz com o que o quadrante passe pelo processo de recursão.

Os critérios de parada são testados de forma independente entre os quadrantes, com o objetivo que a avaliação seja feita separadamente sem que influencie uns aos outros. Isso é, por exemplo, se o primeiro quadrante atingiu um dos critérios de parada, mas os outros três quadrantes não obtiverem o mesmo resultado, a recursão pára somente no primeiro e os valores desses salvos em arquivo. Para os outros as etapas do algoritmo de segmentação seguem sua ordem normalmente.

Os outros dois módulos desse Sistema Classificador baseado em Algoritmos Genéticos são baseados nas técnicas de classificação de sensoriamento remoto. A classificação não-supervisionada utiliza os arquivos gerados ao término da fase de segmentação do Sistema Classificador, para que se tenha as informações de localização de quadrante e os tons médios dos *pixel* e assim associá-los a uma tonalidade. Baseado no fato que um método é dito não-supervisionado quando o classificador não utiliza nenhum conhecimento sobre as classes existentes na imagem e define sem a influência externa quando o *pixel* pertence a uma determinada classe, o algoritmo trabalha de forma independente, sem que anteriormente tenha sido treinado. Por isso, nessa fase do Sistema não é necessário informar qual o tipo da composição da imagem inicial informado como parâmetro na fase de segmentação.

Visto que a classificação Supervisionada é utilizada quando se tem um conhecimento prévio

da área analisada, o algoritmo implementado foi treinado com base nas imagens aéreas da região e as imagens geradas no **software Spring**. Isso permite a seleção de intervalos para as classes com o objetivo de tornar a classificação mais confiável. Essa parte do sistema foi treinado para as composições das bandas do satélite LANDSAT 345 e 234, onde cada classe possui um intervalo para que os *pixels* sejam associados a uma dessas. Ao iniciar a execução dessa fase do sistema, deverá ser informado como parâmetro de entrada qual tipo de composição a imagem que foi segmentada possui. Ambas classificações utilizam os arquivos gerados na fase de segmentação e ao término dessa classificação com todos os quadrantes associados a uma classe obtém-se uma imagem **TIFF** classificada.

## 6 Resultados

O Sistema Classificador foi testado e avaliado com 64 parâmetros de entrada diferentes, com o objetivo de validar os resultados apresentados pelo mesmo e mostrar para quais parâmetros o algoritmo tem a capacidade de ser mais preciso perante as classificações.

Foram utilizados para essa validação três tipos de composições das bandas do Sensor LANDSAT 7 TM+. A mais utilizada foi à composição 543 por suas bandas possuírem mais destaques nas áreas com o uso do solo ocupado por vegetação e cultivos. Alguns aspectos foram observados em relação às imagens geradas e ao tempo de processamento. Primeiramente o que foi notado está relacionado ao fato de quanto maior o intervalo do *fitness* menos precisa a imagem de saída se torna e obtém-se segmentos maiores pois os mesmos conseguem chegar aos critérios de parada precipitadamente.

Outro aspecto que pode ser notado está relacionado ao tempo de processamento de, quanto maior a população, ou mais preciso for o intervalo do *fitness* ou mais altas forem as taxas de *crossover* e mutação, apesar de gerar imagens mais precisas e corretas o tempo de execução se torna maior, pelo fato de aumentar o custo do arquivamento das coordenadas e tonalidades dos *pixels* em arquivos e a limpeza da memória *heap* do Java.

As Imagens geradas pelo Sistema apresentam alguns aspectos diferentes se comparadas às imagens gerados no software do INPE, o SPRING. Os resultados das imagens de classificação supervisionada do Sistema mostra com mais precisão o mapeamento das classes de uso do solo da região de entorno da Lagoa Pequena. Esse tipo de classificação, comparado com as imagens geradas no SPRING, pode-se notar que as obtidas através do Sistema Classificador para Imagens de Sensoriamento Remoto baseado em Algoritmos Genéticos ficaram mais precisas e mais próximas

do que as regiões da Lagoa Pequena realmente possuem em seu solo.

As imagens do Sistema Classificador foram capazes de mostrar uma solução mais correta pelo fato do Algoritmo Genético testar várias vezes uma população, além de geneticamente alterá-la dando assim a chance de obter um dos critérios de parada estipulado para o sistema. O que basicamente ocorre nestas alterações é, por exemplo, um segmento possuir todos os *pixels* em tonalidade 67 e apenas dois com tonalidades 69 e no sorteio inicial esses dois *pixels* foram sorteados o quadrante já não atingirá o intervalo do *fitness* 1.0 e 1.0, e portanto não atingirá o critério de parada. Só que nesse quadrante esses dois *pixels* não mostraram diferença quando passaram pela classificação, já que as tonalidades apresentam valores bem próximos. Para resolver esse problema o algoritmo genético com sua capacidade de *crossover* e mutação as quais podem deixar fora da população esse *pixels*, que possuem um baixo grau de adaptação, e com isso atingir um dos critérios de parada e classificar a imagem de forma mais correta do que são as classes de uso do solo da região de entorno da Lagoa Pequena (Figura 3).

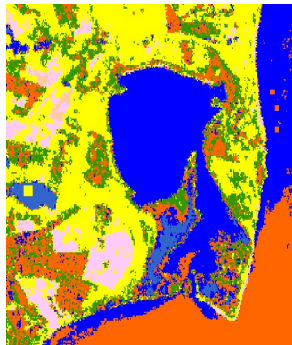


Figura 3: Imagem Gerada pelo Sistema Classificador

## 6.1 Simulação da evolução da ocupação e uso do solo da Região da Lagoa Pequena

Imagens de Sensoriamento Remoto devem possuir conhecimento atualizado da distribuição e da área ocupada pelas classes de uso do solo, como: agricultura, vegetação natural e áreas urbanas, bem como informações sobre as proporções das mudanças nesta regiões o que se tornam cada vez mais necessárias a planejadores. Com o intuito de mostrar as mudanças ocorridas na região de entorno da Lagoa Pequena, bem com a situação atual da mesma foi desenvolvido uma Simulação da evolução da ocupação e uso do solo desta área baseada em séries históricas de dados de imagens do satélite LANDSAT, dos anos de 1987, 1995, 2002 e 2003.

As imagens escolhidas para mostrar a evolução

da região foram geradas pelo Sistema e estipulando os seguintes parâmetros de entrada. Baseados nas estatísticas geradas pelo Sistema Classificador pode-se concluir que nos anos de 1987 e 2002 as áreas de cultivo de arroz se mantiveram equilibradas, enquanto que no ano de 1995 houve um diminuição e em 2003 apresentou um grande aumento relacionado com os outros anos. As regiões que apresentavam vegetação de campo em 1987 sofreram grande queda ao passar dos anos até 1995 e a partir disso pode-se notar que nos anos de 2002 e 2003 estas áreas tiveram uma aumento considerável e se mantiveram constantes nesses últimos anos.

## 7 Conclusão

Na busca de uma melhor relação entre o custo e benefício, no tratamento de dados de satélite, espera-se dispor de uma série de dados confiáveis para a tomada de decisão. As técnicas de segmentação e classificação de dados de sensoriamento remoto, conjugados com técnicas que ajudam a uma convergência mais correta, têm se consolidado como ferramentas primordiais na obtenção e manipulação de informações geradas pelos sensores, da qual obtem-se imagens do uso da terra classificadas que ajudam a mapear e planejar as áreas de uma determinada região.

Baseado no fato que os Algoritmos Genéticos são apropriados para problemas de otimização complexos, como problemas que modelam e avaliam fenômenos ecológicos, que envolvem inúmeras variáveis e um espaço de soluções de dimensão elevada, os mesmos são capazes de abranger um grande número de aplicações.

O Sistema Classificador para Imagens de Sensoriamento Remoto baseado em Algoritmos Genéticos é uma destas aplicações, a qual se propõe e obteve o estudo e o mapeamento das classes de uso do Solo da Região de em torno da Lagoa Pequena. Esse sistema conciliou os principais conceitos de Sensoriamento Remoto, como a segmentação e classificações, e conceitos de destaque dos Algoritmos Genéticos.

Já que o Sensoriamento Remoto e suas técnicas de classificação fornecem, apesar do baixo custo computacional, resultados que perante a estudos de campo mostram que não são tão precisos e por este motivo foi utilizado AG's para que essas classificações se tornassem mais corretas conforme o mapeamento do solo do que realmente há na Lagoa Pequena. Utilizando uma configuração correta dos parâmetros de entrada conclui-se que esses são os aspectos mais relevantes dentre as estratégias dos AG'S. Com a informação dos parâmetros de entrada obteve-se um sistema mais dinâmico e com isto o controle sobre aplicação, ajudando a convergência de forma mais rápida.

Outro aspecto analisado é o do sorteio da população inicial e o fato de que quanto maior for esse melhor será a sua diversidade e mais precisa será a classificação final. Conforme os testes feitos nesse Sistema prova-se que torna-se computacionalmente dispendioso, necessitando efetuar tantas avaliações no sorteio inicial. Assim, as principais influências desse parâmetro de entrada estão relacionadas com o desempenho global e com a eficiência do AG. Porém com um sorteio pequeno da população inicial, o desempenho do Sistema Classificador aumenta e os resultados obtidos são menos precisos, pois o mesmo representaria apenas uma pequena parte do espaço de busca do problema, o que pode ser observado nesse projeto através dos testes obtidos com populações baixas.

Um problema que foi detectado durante os testes do Sistema Classificador baseia-se no surgimento de um conjunto de *pixels* com valor de tonalidade iguais e que possuem alta aptidão, porém as suas tonalidades quando passam pelas classificações mostram que esse conjunto de *pixels* apresentou uma aptidão não ótima, ou seja, os *pixels* na hora da classificação não iriam apresentar o resultado correto comparado às imagens finais, devido aos *pixels* com característica realmente ótimas ficarem de fora dos valores sorteados, gerando assim um problema conhecido como convergência prematura.

Esse problema foi resolvido com a implementação das duas principais fases dos AG'S. A fase de crossover visa fazer a troca de material genético, no caso as coordenadas, entre pares de pixels gerando assim novos indivíduos. Esses ajudam a diminuir o grau de confusão que sempre ocorre nas classificações de imagens de satélite. A nova população formada por esses novos indivíduos ajuda a diminuir os erros de inclusão, quando os pixels que não pertencem à classe são atribuídos a mesma, e os erros de omissão, quando os pixels que pertencem à classe em questão não forem atribuídos a ela.

A fase de mutação utilizando a taxa muito alta obtém rapidamente novos indivíduos introduzidos na população inicial geneticamente alterada, em contrapartida, essas taxas fazem com que indivíduos com boa aptidão sejam retirados da população. Por esses motivos os testes desenvolvidos com o Sistema utilizaram taxas de mutação bastante baixas, que apesar da convergência lenta do algoritmo, não deixa com que se alterem os segmentos a qual o pixel pertence.

O tempo de execução para gerar a segmentação de uma imagem foi um problema encontrado devido ao grande número de variáveis que o Sistema Classificador trata. Quanto mais elevada for a taxa da população ou maior for o número de iterações, gerando assim novas gerações para a cobertura do espaço de solução, faz com que o Sistema possua um custo computacional muito elevado, deixando assim o tempo de processamento bastante lento.

Para resolver o problema citado acima pode-se desenvolver como trabalho futuro, com base nas fases deste Sistema Classificador baseado em Algoritmos Genéticos, a sua paralelização já que o sistema tem a capacidade de que seus métodos ocorram de forma naturalmente paralela assim como todas as suas etapas de avaliação, como a recursão dos quadrantes que ocorrem de forma independente das demais. Assim, esta estratégia deve ser considerada para que se resulte em um ganho no tempo de processamento, o qual é o principal problema desse projeto quando trabalha-se com populações extremamente grandes.

## Referências

- [BARCELLOS 2000]BARCELLOS, J. C. H. Algoritmos genéticos adaptativos: Um estudo comparativo. In: *Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Setor de Engenharia*. USP,São Paulo/SP.: [s.n.], 2000. p. 143.
- [CONCILIO 2000]CONCILIO, R. Contribuições à solução de problemas de escalonamento pela aplicação conjunta de computação evolutiva e otimização com restrições. In: *Dissertação de Mestrado apresentado a Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Departamento de Engenharia de Computação e Automação Industrial*. Unicamp, São Paulo/SP: [s.n.], 2000. p. 121.
- [CROSTA 1993]CROSTA, I. P. *Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto*. 1ª edição. ed. Campinas - SP: UNICAMP, 1993.
- [Larsen 2002]LARSEN, O. Construção de atributos x-of-n usando algoritmos genéticos. In: *Dissertação de Pós-Graduação apresentado a Universidade Católica do Paraná, Setor de Informática Aplicada*. Paraná/PR: [s.n.], 2002. p. 73.
- [Lillesand e Kiefer 1994]LILLESAND, T.; KIEFER, R. *Remote Sensing and image interpretation*. 4ª edição. ed. [S.l.]: Wiley Text Books, 1994. 750 p.
- [Moreira 1996]MOREIRA, M. A. *Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação*. 2ª edição. ed. São Paulo: UFV, 1996. 307 p.
- [Tavares 2000]TAVARES, J. A. d. R. Geração de configuração de sistemas industriais com o recurso a tecnologia das restrições e computação evolucionária. In: *Tese de Doutorado apresentado a Universidade do Minho, Setor de Informática*. Minho/Portugal.: [s.n.], 2000. p. 238.