



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada

MINERAÇÃO DE IMAGENS USANDO ONTOLOGIAS

Marcelino Pereira dos Santos Silva

Monografia da Proposta de Tese do Doutorado em Computação Aplicada, orientada
pelo Dr. Gilberto Câmara Neto.

INPE
São José dos Campos
2004



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada

MINERAÇÃO DE IMAGENS USANDO ONTOLOGIAS

Marcelino Pereira dos Santos Silva

Monografia da Proposta de Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais de São José dos Campos, como requisito parcial para obtenção do título de doutor em Computação Aplicada.

Banca Examinadora:

Dr. Antônio Miguel V. Monteiro (Presidente)

Dr. Gilberto Câmara Neto (Orientador)

Dra. Leila Maria Garcia Fonseca

Dr. Luiz Antônio Nogueira Lorena

São José dos Campos, 01 de junho de 2004.

RESUMO

Instituições governamentais, corporativas e científicas têm realizado grandes investimentos na geração, processamento e distribuição de imagens de sensoriamento remoto. Tal investimento tem causado um crescimento explosivo nos acervos e bancos de imagens das instituições, superando em muito a atual capacidade de interpretar e analisar estes dados. O desafio do uso das técnicas de mineração de dados em grandes bancos de dados de imagens é duplo: além de reconhecer e extrair informações semanticamente significativas, é necessário fazer isto de maneira eficiente nestes acervos. Uma das abordagens propostas na literatura é o uso de ontologias. A combinação das técnicas de mineração de imagens com ontologias é ainda recente e pouco explorada. Este trabalho aborda a mineração de acervos de imagens através de ferramentas computacionais semi-automáticas que permitam ao especialista obter informações de alto nível a partir destas imagens usando ontologias. É proposto que a partir dos conceitos de ontologia de imagens, processamento digital de imagens e mineração de dados seja possível projetar e construir uma arquitetura de reconhecimento de informação semântica em grandes bancos de dados de imagens de sensoriamento remoto.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 - Introdução.....	6
CAPÍTULO 2 - Revisão Bibliográfica	10
2.1 Mineração de Imagens.....	10
2.2 Conceitos Gerais.....	10
2.3 Trabalhos Relacionados.....	13
2.4 Segmentação de Imagens	14
2.5 Representação de Imagens como Grafos.....	16
2.6 Mineração de Grafos	17
2.6.1 Padrões Frequentes, Sub-Estruturas e Detecção de Anomalias em Grafos.....	17
2.6.2 Agrupamento Conceitual Hierárquico.....	19
2.6.3 Regionalização por Árvore Mínima Geradora	21
2.6.4 Aprendizagem Relacional.....	22
2.7 Ontologias.....	24
2.7.1 Conceituação	24
2.7.2 Ontologia como Mecanismo de Especificação.....	25
2.8 Ontologia de Imagens.....	26
2.8.1 Contexto Ontológico Multi-Camada para Extrair Informações de Imagens... ..	26
2.8.2 Mediação Semântica e Configuração Espacial.....	28
2.9 Ontologias e Grafos.....	28
CAPÍTULO 3 - Metodologia	30
3.1 Descrição Geral	30
3.2 Domínio de Aplicação: Mudança de Uso e Cobertura do Solo na Amazônia	32
3.3 Formalismo de Representação de Objetos: Grafos.....	34
3.4 Suporte Ontológico.....	35
3.4.1 Ontologia Estrutural Baseada em Grafos e Métricas.....	36
3.4.2 Ontologia de Aplicação Baseada em Tipologia de Padrões Espaciais.....	36
3.5 Extração de Padrões, Esquema de Mediação e Casamento de Padrões	38
3.5.1 Extração de Padrões de Grafos.....	38
3.5.2 Esquema de Mediação	39
3.5.3 Casamento de Padrões.....	39
3.6 Exemplo de Processo de Mineração de Imagens.....	40
3.7 Protótipo da Ferramenta de Mineração	42
CAPÍTULO 4 - Cronograma.....	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: O Processo De Mineração De Imagens [Zhang Et Al., 2002]	11
Figura 2.2: Mineração De Imagens Dirigida À Informação [Zhang Et Al., 2001]	12
Figura 2.3: Segmentação De Imagem	15
Figura 2.4: Hierarquia De Regiões Representada Por Um Hrag [Thies Et Al., 2003]...	17
Figura 2.5: Estrutura Atômica Da Borracha Natural E A Compressão De Seu Grafo Através De Subestrutura Descoberta [Holder Et Al., 2002].....	18
Figura 2.6: Etapas Do Processo De Agrupamento Hierárquico [Qian & Zhang, 2004]	20
Figura 2.7: Arquitetura Geral Do Chameleon [Karypis Et Al., 1999]	21
Figura 2.8: Regionalização Em Agm [Neves Et. Al., 2004]	22
Figura 2.9: Aprendizagem De Gramática De Grafos [Holder & Cook, 2003].....	23
Figura 2.10: Contexto Ontológico Para Extrair Informações A Partir De Imagens [Câmara Et Al., 2001]	27
Figura 3.1: Processo De Construção De Padrões Ontológicos.....	31
Figura 3.2: Processo De Identificação De Configurações Espaciais.....	32
Figura 3.3: Construção Da Ontologia Estrutural	36
Figura 3.4: Exemplos De Padrões Espaciais De Desflorestamento Tropical.....	37
Figura 3.5: Construção Da Ontologia De Aplicação.....	38
Figura 3.6: Extração De Padrões De Grafos.....	39
Figura 3.7: Obtenção De Padrões Ontológicos	39
Figura 3.8: Casamento De Padrões – Grafos Inexatos	40
Figura 3.9: Exemplo Da 1ª Fase Do Processo De Mineração De Imagens.....	41
Figura 3.10: Exemplo Da 2ª Fase Do Processo De Mineração De Imagens.....	42

CAPÍTULO 1

Introdução

Instituições governamentais, corporativas e científicas têm realizado grandes investimentos na geração, processamento e distribuição de imagens de sensoriamento remoto. Este contexto tem causado um crescimento explosivo nos acervos e bancos de imagens das instituições, superando em muito a atual capacidade de interpretar e analisar estes dados. O INPE, por exemplo, possui um acervo de 30 anos de imagens de sensoriamento remoto que está sendo armazenado em um Centro de Dados para acesso on-line, totalizando cerca de 130 Tb em dados. Existe ainda uma forte demanda econômica, política, social e governamental por resultados em tempo hábil, oriundos de informações estratégicas destas imagens.

No reconhecimento de imagens de sensoriamento remoto, é usual distinguir-se três níveis de processamento para visão computacional [Marr, 1982]: nível de estratégia de processamento da informação, nível de algoritmos e estruturas de dados, e nível de mecanismos físicos. No nível mais imediato, o processamento de imagens consiste num conjunto de técnicas de processamento de sinais bidimensionais, como filtragem, transformada de Fourier, realçamento. No nível intermediário, utiliza-se técnicas de segmentação de imagens [Mather, 1999] para distinguir objetos e suas propriedades nas imagens. No nível de processamento de informações, os objetos são identificados como unidades semânticas.

Depois de mais de 20 anos de pesquisa, já foi desenvolvido um conjunto de técnicas capaz de realizar a segmentação de imagens de forma adequada para diferentes aplicações [Schowengerdt, 1997]. No entanto, a transformação de objetos para entidades semânticas representa um desafio científico ainda não resolvido. Uma das abordagens propostas na literatura é o uso de ontologias [Câmara et al., 2001; Bittner & Winter, 1999]. Em [Câmara et al., 2001] foi proposta uma arquitetura de reconhecimento de informações de imagens baseada em ontologia. Uma das aplicações

propostas para esta arquitetura é a mineração de dados em grandes bancos de dados de sensoriamento remoto.

O desafio do uso das técnicas de mineração de dados [Han & Kamber, 2001] em grandes bancos de dados de imagens é duplo: além de reconhecer e extrair informações semanticamente significativas, é necessário fazer isto de maneira eficiente nestes acervos. Para tanto, a literatura recente apresenta um grande número de estudos e pesquisas neste campo [Zhang et al., 2002; Thies et al., 2003; UAH, 2003]. A combinação das técnicas de mineração de imagens com ontologias é ainda mais recente e pouco explorada. Pode-se definir ontologia como teorias de conteúdos, as quais possuem um conjunto geral de fatos a serem compartilhados, cuja principal contribuição é identificar classes específicas de objetos e relacionamentos que existam em determinado domínio [Câmara et al., 2001]. Visando a eliminação da lacuna “objeto-semântica”, a contribuição da ontologia é fundamental, pois focando o aspecto semântico do processo propicia a ligação entre o objeto/estrutura e o conhecimento/aplicação das imagens no seu domínio.

Neste cenário, o objetivo geral da tese é viabilizar a mineração de acervos de imagens através de ferramentas computacionais semi-automáticas que permitam ao especialista obter informações de alto nível a partir destas imagens usando ontologias. Tais recursos visam permitir que um considerável número de imagens, após processadas, forneçam informações a respeito do domínio que retratam.

O objetivo específico do trabalho é o desenvolvimento de uma arquitetura e de um protótipo de mineração de imagens usando ontologias, contemplando os seguintes pontos:

- Geração de grafos e métricas a partir da segmentação de imagens, obtendo assim uma “ontologia estrutural” do acervo analisado;

- Mineração destes grafos, com o objetivo de obter padrões que permitam identificar “assinaturas” dos processos retratados nos grafos oriundos das imagens;
- Especificação da ontologia de aplicação, a partir de uma tipologia de padrões espaciais e de domínios de aplicação inerentes ao acervo de imagens analisado;
- Casamento de padrões, que permitam associar assinaturas de grafos aos padrões ontológicos da imagem (obtidos a partir da ontologia de aplicação).

As premissas adotadas nesta tese são:

1. A disponibilidade de grandes acervos de imagens de sensoriamento remoto como o Centro de Dados do INPE representa um grande desafio científico para o desenvolvimento de técnicas de recuperação de informação em imagens.
2. O reconhecimento de informação semântica em imagens ainda é um desafio científico relevante e não resolvido.
3. A idéia de ontologias é útil como base para a construção de sistemas de informação com maior conteúdo semântico.
4. Dispomos hoje de técnicas eficientes de processamento de imagens em nível físico e de reconhecimento de objetos (segmentação e classificação de regiões). O maior desafio é integrar estas técnicas num ambiente de recuperação de informação e operá-las de forma eficiente.

A partir destas premissas, a hipótese base da tese é: a partir dos conceitos de ontologia de imagens, processamento digital de imagens e mineração de dados, é possível projetar e construir uma arquitetura de reconhecimento de informação semântica em grandes bancos de dados de imagens de sensoriamento remoto.

Esta tese, se realizada a contento, irá representar um avanço significativo sobre os sistemas de mineração de imagens existentes, pela capacidade de integrar informações semânticas às técnicas de extração de informação em imagens.

O próximo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre os conceitos, técnicas e ferramentas envolvidas no trabalho, enquanto o terceiro capítulo descreve a metodologia e demais elementos relevantes desta proposta. O capítulo subsequente traz o cronograma dentro do qual as atividades devem ser desenvolvidas.

CAPÍTULO 2

Revisão Bibliográfica

Processos de extração de conhecimento a partir de acervos de dados envolvem diferentes domínios, metodologias e técnicas. Para a presente proposta de mineração de informações estratégicas a partir de imagens, os pontos de pesquisa e aplicação são levantados neste capítulo, sob a ótica do uso de ontologias.

2.1 Mineração de Imagens

Descoberta de conhecimento em bancos de dados (DCBD) é o processo de identificar em dados padrões que sejam válidos, previamente desconhecidos, potencialmente úteis e compreensíveis, visando melhorar o entendimento de um problema ou um procedimento de tomada de decisão [Fayyad et al., 1996]. Mineração de dados é a etapa em DCBD responsável pela seleção dos métodos a serem utilizados para localizar padrões nos dados, seguida da efetiva busca por padrões de interesse numa forma particular de representação, juntamente com a busca pelo melhor ajuste dos parâmetros do algoritmo para a tarefa em questão. Mineração de dados em imagens utiliza técnicas de DCBD respeitando a complexidade do domínio, conforme apresentado a seguir.

2.2 Conceitos Gerais

O processo de mineração de dados em imagens é apresentado na Figura 2.1. As imagens de um acervo são recuperadas segundo critérios inerentes à aplicação. A seguir, uma fase de pré-processamento aumenta a qualidade dos dados, os quais são então submetidos a uma série de transformações e de extração de características que geram importantes informações a respeito das imagens. A partir destas informações, a mineração pode ser realizada através de técnicas específicas, com o intuito de descobrir padrões significativos. Os padrões resultantes são então interpretados e avaliados para a obtenção do conhecimento final, que pode ser aplicado no entendimento de problemas, na tomada de decisões ou em outras atividades estratégicas [Zhang et al., 2002].

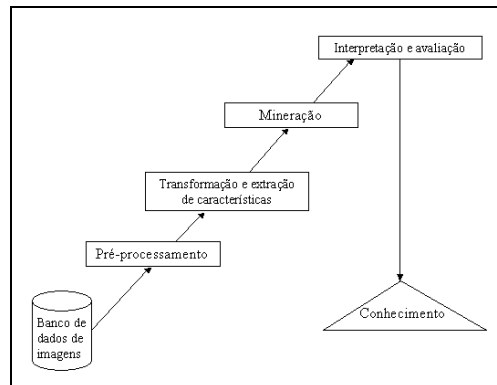


Figura 2.1: O processo de mineração de imagens [Zhang et al., 2002]

A mineração de dados em imagens não consiste simplesmente na aplicação de técnicas de mineração de dados em bancos “convencionais” ao domínio de imagens. Segundo [Zhang et al., 2002], diferenças importantes entre estes bancos convencionais e os de imagens incluem:

- Valores relativos e valores absolutos - em bancos de dados relacionais (por exemplo), os valores de dados são semanticamente significativos. Valores de imagens em si podem não possuir significância sem o suporte de um contexto.
- Informação espacial - a informação espacial implícita é crítica para a interpretação da imagem, o que não ocorre com bancos de dados relacionais.
- Interpretação única e interpretação múltipla - uma característica das imagens é a interpretação múltipla dos elementos visuais.
- Representação visual dos padrões descobertos – a forma como padrões de imagens são representados, visando reter no esquema de representação a informação contextual e espacial, é muito relevante.

Um desafio fundamental na mineração de imagens é determinar como a representação de pixel (baixo nível) que está contida numa imagem “bruta”, ou numa seqüência de imagens, pode ser processada para identificar objetos e relacionamentos espaciais em alto nível. A proposta de uma arquitetura direcionada à informação (Information-Driven

Framework) [Zhang et al., 2001] destaca o papel da informação em vários níveis de representação (Figura 2.2). Quatro níveis de informação são distintos na arquitetura:

- Nível de Pixel, que consiste das informações da imagem “bruta”, tais como pixels, e de características primitivas da imagem, tais como cor e textura.
- Nível de Objeto, o qual lida com informações de objetos ou regiões homogêneas baseadas nas características primitivas do Nível de Pixel, cujos algoritmos podem particionar as imagens em objetos ou regiões significativas.
- O Nível de Conceito Semântico coloca os objetos e regiões (identificados no Nível de Objeto) no contexto das imagens, tentando capturar conceitos abstratos no cenário formado. Raciocínio em alto nível e técnicas de descoberta de conhecimento são utilizadas para gerar conceitos semânticos de alto nível e para descobrir padrões interessantes.
- O Nível de Padrões e Conhecimento integra dados alfanuméricos relacionados ao domínio com relacionamentos semânticos descobertos nos dados da imagem. Passos de mineração são efetuados para descobrir correlações úteis entre dados alfanuméricos e padrões de imagem.

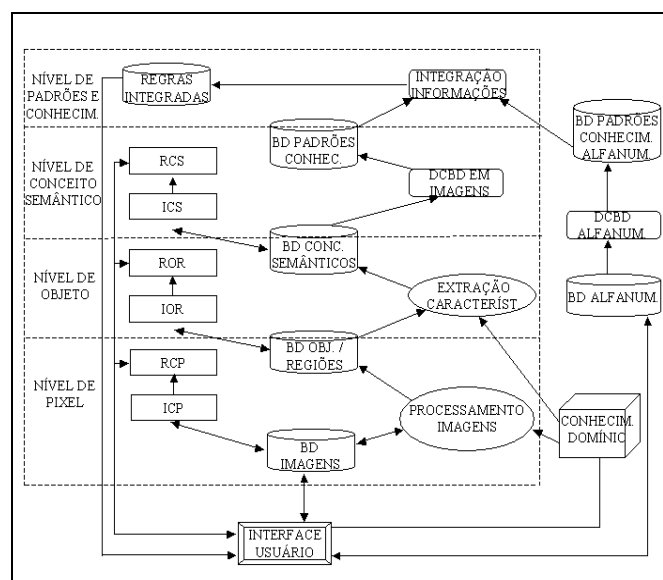


Figura 2.2: Mineração de imagens dirigida à informação [Zhang et al., 2001]

Nomenclaturas abreviadas na Figura 2.2: *Indexação*: ICP (características primitivas), IOR (objetos/regiões), ICS (conceito semântico); *Recuperação*: RCP (características primitivas), ROR (objetos/regiões), RCS (conceito semântico).

Componentes de arquiteturas para mineração em imagens dependem de técnicas de extração de informação. A precisão e eficiência destas técnicas são determinantes nos procedimentos de descoberta de conhecimento nos acervos de imagens. Dentre elas podemos citar: reconhecimento de objetos, classificação e agrupamento de imagens, mineração de regras de associação, redes neurais.

2.3 Trabalhos Relacionados

[Nagao & Matsuyama, 1980] desenvolveram na Universidade de Kyoto o primeiro sistema de visão de alto nível para interpretação de imagens aéreas. Os módulos de processamento do sistema operam em função de uma base de dados comum. O processo de análise no sistema é dividido nas seguintes etapas: suavização, onde imagens são suavizadas para remover ruídos e manchas nas bordas; segmentação, para extrair regiões elementares através de um algoritmo básico de crescimento de regiões sem incorporar qualquer informação adicional ao objeto; exame global da cena, para estimar domínios de objetos aproximados utilizando metadados da imagem; análise detalhada de áreas, quando subsistemas de detecção de objetos analisam uma base de conhecimento para localizar objetos específicos; comunicação entre subsistemas de detecção de objetos, que controla o fluxo da análise gerenciando a informação na base de dados, soluciona conflitos entre subsistemas de detecção e corrige erros de segmentação.

O GeoMiner [Han et al., 1997], desenvolvido na Simon Fraser University, é um protótipo de sistema de mineração de dados espaciais com recursos para caracterizar dados espaciais através de regras, comparar, associar, classificar e agrupar conjuntos de dados, analisar padrões e realizar mineração em diferentes níveis. O protótipo possui também uma linguagem para tarefas de mineração de dados espaciais (GMQL), além de contar com interface gráfica para o usuário e ferramentas de visualização de dados e resultados de mineração espacial. O software possui ainda integração com tecnologias

de data warehousing, podendo utilizar diferentes servidores de banco de dados espaciais: MapInfo, ESRI, Oracle, Informix.

O projeto SPIN! [May & Savinov, 2002], desenvolvido pelo Fraunhofer Institute for Autonomous Intelligent Systems (Alemanha), está focado no desenvolvimento de um sistema de mineração de dados espaciais que integre Sistemas de Informação Geográfica e mineração de dados numa arquitetura fortemente acoplada, aberta e extensível. O projeto prioriza fatores como escalabilidade, segurança, acesso multi-usuário, robustez e independência de plataforma. Seus níveis de funcionalidade incluem acesso e gerenciamento de dados, mapeamento temático interativo para a visualização de dados estatísticos, detecção de clusters espaciais e explicação de clusters e fenômenos espaciais. Seus principais componentes são implementados em Java, utilizando RMI para o acesso a servidores.

ADaM, projeto da NASA em conjunto com a Universidade de Alabama em Huntsville, é um conjunto de ferramentas de mineração de dados científicos e de imagens [UAH, 2003]. Suas funcionalidades incluem reconhecimento de padrões, processamento de imagens, otimização, mineração de regras de associação, dentre outros. O sistema é composto por uma série de componentes individuais que podem ser utilizados em conjunto para realizar tarefas complexas. O software possui módulos implementados em C, C++ e componentes Python, cuja versão atual (4.0.1) possui programas executáveis para linha de comando. Um dos focos do projeto é a implementação eficiente de componentes de desempenho crítico, além do cuidado de manter cada componente do sistema o mais independente possível, visando possibilitar a utilização de subconjuntos de módulos apropriados para determinadas aplicações, inclusive aproveitando componentes de terceiros. O software encontra-se disponível para as plataformas Linux e Windows, com código fonte fechado.

2.4 Segmentação de Imagens

No processo de análise e extração de informações a partir de imagens são utilizados algoritmos de segmentação, os quais particionam a imagem em regiões correspondentes às áreas de interesse do ponto de vista da aplicação (Figura 2.3). Uma região é definida

como um conjunto de pixels contíguos, com espalhamento bidimensional, os quais apresentam uniformidade em relação a determinado atributo. Área, forma, elementos estatísticos e textura são exemplos de atributos que podem ser obtidos e utilizados na análise da imagem. Os algoritmos de segmentação utilizam basicamente três abordagens: crescimento de regiões, detecção de bordas e combinação de ambas [Fonseca, 2000].

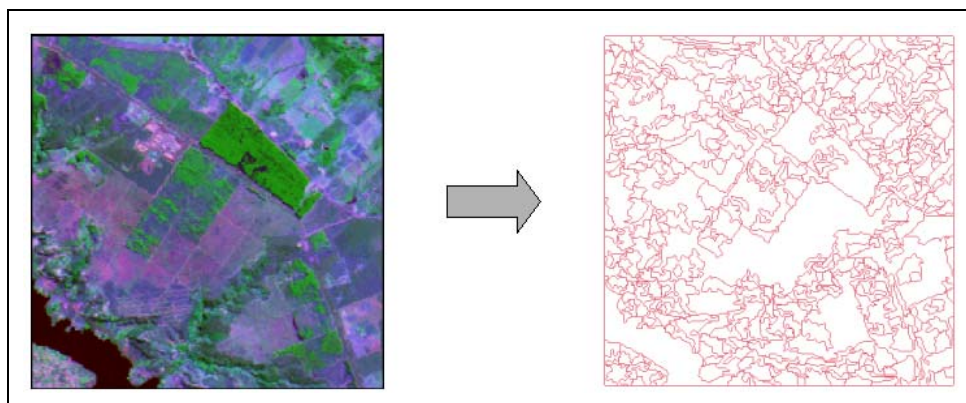


Figura 2.3: Segmentação de imagem

Na técnica de crescimento de regiões, o algoritmo divide a imagem em um número de regiões homogêneas, cada uma identificada por um rótulo, cujo processo iterativo faz com que regiões espacialmente adjacentes sejam agrupadas segundo algum critério de similaridade. O resultado final é uma imagem rotulada. No método de detecção de bordas, as posições de pixels com variações abruptas de níveis de cinza entre regiões homogêneas (bordas) são extraídas gerando como resultado um mapa de bordas, cujos pontos caracterizam as transições entre objetos distintos. A seleção de uma destas abordagens ou a combinação delas depende fortemente dos tipos de dados usados na análise e da área de aplicação.

Além da extração de objetos relevantes, é possível descrevê-los para melhorar sua representação. Descritores de forma (representação de retângulo orientado ou plano alfa binário), de cores (e.g., cores dominantes), textura (regularidade, direção, rugosidade) dentre outros, fornecem medidas de similaridade de objetos, ampliando a relevância da informação e oferecendo tanto métricas comparativas como combinações ponderadas da diferença de seus atributos [Newsam et al., 2001]. Uma vez segmentada e descrita, a

imagem terá uma representação de objetos que pode ser mapeada para uma representação em grafos (por isto, o interesse em imagens como grafos). O próximo tópico apresenta abordagens relevantes para este problema.

2.5 Representação de Imagens como Grafos

A abordagem de busca por similaridades, desenvolvida inicialmente para uso em imagens médicas [Petrakis & Faloutsos, 1997], visa suportar consultas a partir de conteúdos num banco de dados de imagens (BDI). Pontos relevantes neste domínio estão relacionados à extração de características da imagem, representação de conteúdo da imagem, organização da informação armazenada, e estratégias de busca e recuperação. A implementação do método requer que todas as imagens sejam analisadas antes do armazenamento, pois desta forma descrições apropriadas de seus conteúdos podem ser extraídas e armazenadas no banco juntamente com as imagens originais. Estas descrições são utilizadas então para realizar buscas no BDI, permitindo determinar quais imagens satisfazem o critério de seleção de consultas. Descrições das imagens são elaboradas em termos de propriedades dos objetos e em termos de relacionamentos entre os objetos. As descrições são efetuadas através de Grafos Relacionais de Atributos (ARGs) [Ballard & Brown, 1982].

Grafos de adjacência de regiões (RAG's) são utilizados em [Wang et al., 2002] para agregar regiões de imagens. O trabalho propõe um algoritmo baseado em detecção de borda e crescimento de regiões e, com o intuito de evitar uma super segmentação da imagem, suas regiões são mapeadas para um RAG. Neste grafo cada vértice representa uma sub-região, e arcos conectam os vértices que representem regiões adjacentes (cujos pesos determinam diferenças entre estas regiões). Com base no peso destes arcos, o algoritmo agrega ou não regiões adjacentes durante o processo.

[Thies et al., 2003] realiza particionamento hierárquico de imagens médicas baseado em regiões significativas para a percepção visual humana. A proposta utiliza segmentação e uma organização hierárquica de regiões, onde cada região de menor escala está totalmente contida numa região de maior escala. O processo gera grafos de adjacência de regiões hierárquicas (hRAG's) para representar cada região como um vértice com

atributos, e os arcos para descrever a escala topológica da região (Figura 2.4). Na realidade, as partições de imagens formam RAG's, que por sua vez são estendidos a hRAG's segundo o nível topológico da partição, cujos vértices possuem descritores de região (forma, textura, etc.).

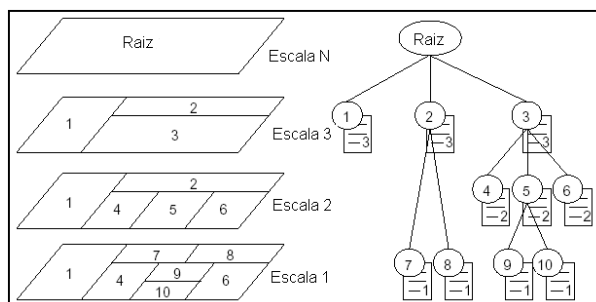


Figura 2.4: Hierarquia de regiões representada por um hRAG [Thies et al., 2003]

2.6 Mineração de Grafos

O aumento do volume e da complexidade das bases de dados têm motivado a pesquisa de novas técnicas de mineração de dados. Muitas destas bases possuem características estruturais, cujos dados são compostos por segmentos e relacionamentos entre estes. Assim, a mineração de grafos tem contemplado diferentes tarefas sobre bases de dados estruturais.

2.6.1 Padrões Frequentes, Sub-Estruturas e Detecção de Anomalias em Grafos

[Holder et al., 2002] aborda a descoberta de padrões em dados relacionais representados por grafos, com base no princípio MDL (comprimento mínimo da descrição) que mede o quão bem padrões comprimem a base de dados original. De acordo com a heurística MDL, a melhor subestrutura é aquela que minimiza o tamanho da descrição do grafo quando comprimido através dessa subestrutura. Esta abordagem está implementada no Subdue [UTA, 2004], que além de minerar subestruturas e padrões, realiza agrupamento, compressão, aprendizagem relacional e isomorfismo inexato de grafos.

A mineração de subestruturas busca subgrafos semelhantes num conjunto de grafos. Subestruturas descobertas são utilizadas para comprimir os dados originais, permitindo abstrair estruturas detalhadas e representar conceitos estruturais nestes dados. Assim,

uma subestrutura descoberta é usada para simplificar os dados, substituindo instâncias da subestrutura por um ponteiro para esta nova subestrutura descoberta, conforme exemplo da Figura 2.5. Agrupamentos permitem obter um melhor entendimento dos dados, destacando topologias hierárquicas e representando conhecimento que interesse ao usuário. Casamento inexato de grafos é utilizado para identificar instâncias da subestrutura, abstraindo variações menores e permitindo que um padrão seja descoberto, mesmo que os dados contenham ruídos ou diferenças não relevantes.

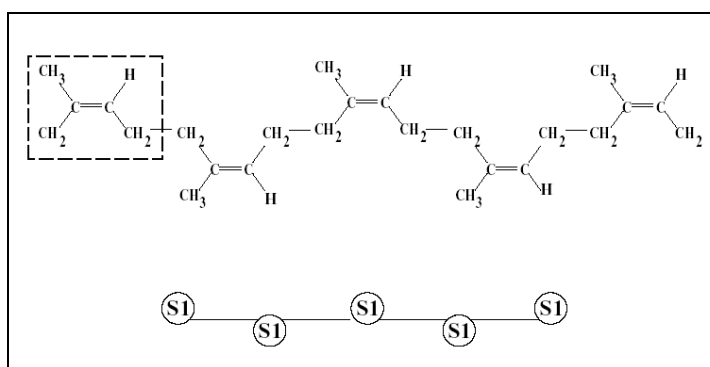


Figura 2.5: Estrutura atômica da borracha natural e a compressão de seu grafo através de subestrutura descoberta [Holder et al., 2002]

A mineração de padrões de subestruturas também é proposta por [Yan & Han, 2003] utilizando a busca em profundidade em grafos (DFS). O trabalho argumenta que uma DFS gera uma ordem linear, que pode ser mapeada para um “código DFS”, que por sua vez é minerado por um algoritmo específico. Esta abordagem reduz a complexidade do grafo a uma estrutura linear, passível de mineração através de técnicas já consolidadas de mineração de dados convencionais.

A detecção de anomalias possui diferentes aplicações, como identificação de fraudes e descoberta de intrusões em redes de computadores. [Noble & Cook, 2003] introduz duas técnicas para este domínio: a detecção de subestrutura anômala e a detecção de subgrafo anômalo. A primeira examina um grafo inteiro e indica estruturas incomuns contidas nele, utilizando uma variante do princípio MDL, uma vez que uma anomalia pode ser encarada como o oposto de padrão (padrões ocorrem frequentemente num grafo, anomalias não). Isto significa que subgrafos anômalos tendem a permitir menos compressão, pois possuem poucos padrões comuns. Já a segunda técnica consiste na

partição do grafo em estruturas distintas (subgrafos) visando determinar o quão anômalo cada subgrafo é em comparação aos outros. Ambas abordagens utilizam recursos do Subdue, as quais encontram-se implementadas neste sistema.

2.6.2 Agrupamento Conceitual Hierárquico

Uma abordagem comum para manipular dados espaciais é a aplicação de algum tipo de compressão nos dados antes do processamento propriamente dito. [Qian & Zhang, 2004] propõe um método de compressão de dados espaciais denominado GraphZip, com o intuito de preservar nos dados comprimidos o padrão espacial dos dados originais, obtendo processamento eficiente e automático, e reduzindo consideravelmente a complexidade do agrupamento hierárquico proposto no trabalho.

O agrupamento espacial, que agrega objetos espaciais semelhantes em classes, é um importante recurso para mineração espacial. GraphZip desempenha esta tarefa utilizando a construção iterativa de grafos com vizinhos mais próximos nos dados originais, agregando os dados até que o tamanho destes tenham redução significativa, e garantindo que estes representem a densidade natural dos dados originais. A informação do mapeamento entre os dados e o conjunto comprimido é gravada num arquivo de mapeamento. O agrupamento hierárquico é então realizado nos dados comprimidos, através de um processo híbrido descrito abaixo.

Quatro passos realizam o processo de agrupamento (Figura 2.6). No primeiro, GraphZip transforma dados originais num conjunto de dados comprimidos, onde cada ponto deste conjunto representa pontos de dados do conjunto original. O segundo passo gera grupos nos dados comprimidos, representados por grafos de vizinhança. No terceiro passo, a informação de agrupamento nos dados comprimidos é mapeada de volta aos dados originais para obter os subgrafos correspondentes, utilizando informações do arquivo de mapeamento. O quarto passo agrupa os subgrafos hierarquicamente, de acordo com um critério de agregação pré-definido.

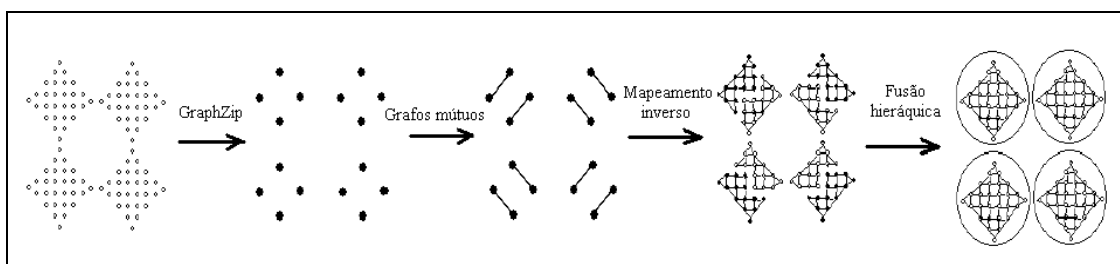


Figura 2.6: Etapas do processo de agrupamento hierárquico [Qian & Zhang, 2004]

Outro trabalho referenciado na literatura é [Karypis et al., 1999], que aborda a melhora da qualidade do agrupamento através de um elaborado critério para a fusão de grupos, usando uma definição objetiva de similaridade composta pela interconectividade e proximidade relativas dos dados espaciais. O algoritmo de agrupamento hierárquico Chamaleon mede a similaridade de dois clusters baseado num modelo dinâmico, os quais são agregados somente se a interconectividade e proximidade entre eles for alta em relação à interconectividade interna dos clusters e à proximidade dos itens dentro destes. Os autores defendem que esta abordagem facilita a descoberta de clusters homogêneos e naturais.

Neste processo (Figura 2.7), Chamaleon opera num grafo esparso no qual vértices representam itens de dados, e arcos ponderados representam similaridades entre estes itens. Esta representação em grafo esparso do conjunto de dados permite que o algoritmo seja escalável para grandes bases de dados. Um algoritmo de particionamento de grafos agrupa os itens de dados num grande número de subgrupos relativamente pequenos. A seguir, o algoritmo aglomerativo hierárquico localiza clusters genuínos combinando iterativamente estes subgrupos (dois clusters seriam agrupados se a interconectividade e proximidade do novo cluster fossem muito semelhantes à interconectividade e proximidade individuais destes clusters antes do agrupamento). Através desta abordagem, o processo tende a adaptar-se automaticamente às características internas dos clusters que estão sendo agregados.

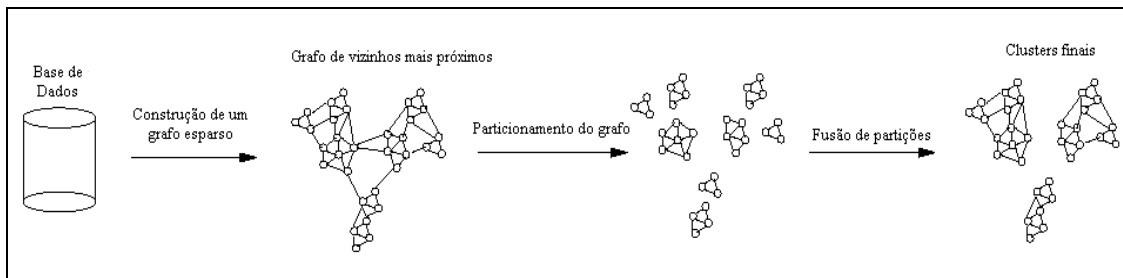


Figura 2.7: Arquitetura geral do Chameleon [Karypis et al., 1999]

2.6.3 Regionalização por Árvore Mínima Geradora

Árvore geradora mínima (AGM) é aquela gerada a partir de um grafo, de tal forma que a soma dos custos associados às arestas seja o menor possível. Regionalização é o procedimento de agrupamento de objetos em regiões homogêneas no espaço, permitindo a definição de grupos naturais onde objetos de um mesmo grupo possuam alto grau de similaridade, e baixo entre membros de grupos distintos.

[Neves et. al., 2004] propõe um método de regionalização de AGM que visa eficiência utilizando técnicas de otimização. O método utiliza dois passos: geração e particionamento. A geração da AGM é recursiva e incremental, sempre buscando minimizar a soma dos pesos dos arcos. No particionamento, arcos são eliminados sucessivamente através de divisão hierárquica, que provoca a divisão de cada região em duas (eliminando um arco da AGM), separando os objetos em grupos mais homogêneos através de procedimento heurístico - que tenta a melhor solução para uma região sem ter que examinar todas as arestas da árvore. O método ainda permite que restrições sejam definidas para certos atributos de uma região.

Este tipo de abordagem é bastante útil para a localização de agrupamentos, especialmente quando o volume de dados é alto e a homogeneidade de regiões é importante. Um exemplo de regionalização em oito regiões é apresentado na Figura 2.8.

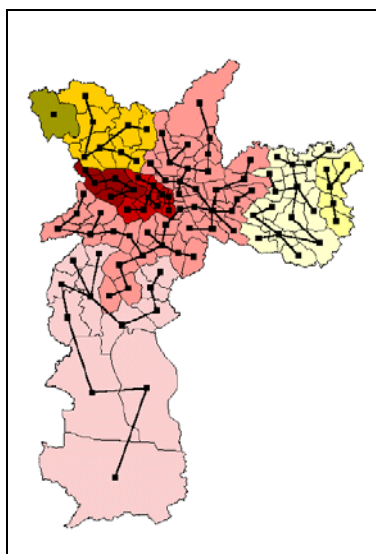


Figura 2.8: Regionalização em AGM [Neves et. al., 2004]

2.6.4 Aprendizagem Relacional

Aprendizagem relacional envolve a habilidade de aprender hipóteses recursivas e restrições em variáveis. Sistemas baseados em grafos possuem o potencial de serem competitivos na tarefa de aprendizagem, pois fornecem uma representação poderosa, expressiva e flexível. Sistemas de aprendizagem que utilizam representação de grafos podem aprender conceitos mais ricos se tiverem a capacidade de manipular o crescente volume do espaço de hipóteses.

Subdue Concept Learner (SubdueCL) [Gonzalez et al., 2001], que é uma extensão do sistema Subdue, aceita tanto exemplos positivos como negativos em formato de grafos. Embora utilize funções básicas do Subdue para realizar operações sobre grafos, o processo de aprendizagem do SubdueCL é diferente, pois este opera como um aprendiz supervisionado, diferenciando exemplos positivos e negativos através de uma abordagem de cobertura de conjunto, ao invés de compressão de grafos.

O sistema utiliza uma fórmula de avaliação para atribuir valor a todas as subestruturas geradas, de acordo com a precisão da descrição dos exemplos positivos, e da ausência de descrições de exemplos negativos. Exemplos positivos cobertos pela subestrutura aumentam seu valor, enquanto valores negativos o diminuem. SubdueCL seleciona

regras que maximizem o valor da subestrutura, e desta forma, diminui o número de erros cometidos pelas subestruturas para formar o conceito.

Gramáticas de grafos apresentam-se como outra promissora abordagem, já que são semelhantes a gramáticas convencionais, com a exceção de que os símbolos podem ser grafos arbitrários ao invés de elementos de um alfabeto. Pesquisas recentes iniciaram o desenvolvimento de técnicas para a aprendizagem de gramáticas de grafos [Holder & Cook, 2003], uma vez que técnicas de mineração em grafos podem ser estendidas para considerar a produção de gramáticas de grafos através da análise de instâncias de um subgrafo, verificando como se relacionam entre si.

A Figura 2.9b apresenta um exemplo de uma gramática de grafo recursiva, cujas regras de produção foram aprendidas do grafo da Figura 2.9a. Estas produções podem ser disjuntivas, como na Figura 2.9c, que representa a produção final aprendida da Figura 2.9a. A regra disjuntiva é aprendida buscando-se extensões semelhantes, mas não idênticas, para as instâncias de um subgrafo. Para isso, uma nova regra é construída para capturar a variabilidade das extensões, sendo incluída no conjunto de regras de produção com base na sua capacidade de comprimir o grafo de entrada. Assim, verifica-se que a abordagem de gramática de grafos não é restrita à inclusão de uma relação em particular, mas essencialmente produz relações que comprimam os dados relacionais.

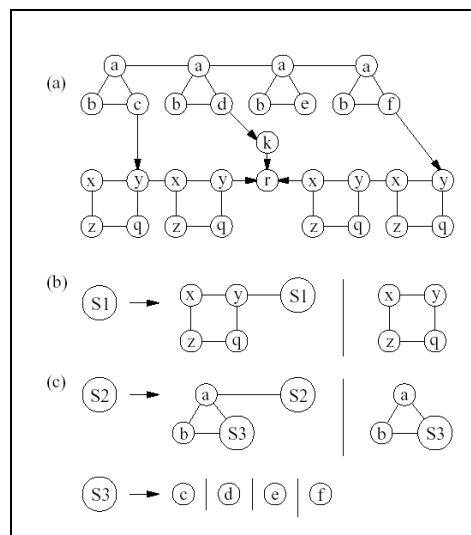


Figura 2.9: Aprendizagem de gramática de grafos [Holder & Cook, 2003]

2.7 Ontologias

2.7.1 Conceituação

Uma ontologia (como artefato de engenharia) descreve uma certa realidade com um vocabulário específico, utilizando um conjunto de hipóteses relativas ao significado intencional das palavras deste vocabulário [Fonseca & Egenhofer, 1999]. Pode-se também definir ontologia como teorias de conteúdos, as quais possuem um conjunto geral de fatos a serem compartilhados, cuja principal contribuição é identificar classes específicas de objetos e relacionamentos que existam em determinado domínio [Câmara et al., 2001].

Dentre os benefícios almejados pela utilização de ontologias, podemos citar interoperabilidade (acesso mútuo de componentes a informações e funcionalidades), pesquisa e navegação (utilização e meta-conhecimento para auxiliar engenhos de busca e estender consultas), reuso (evitando a reconstrução de componentes já existentes), e base de estruturação (redução de prazos e investimentos na construção de novos componentes) [Menzies, 1999]. Os principais custos ligados a ontologias residem no investimento necessário para sua criação e manutenção. Estes aspectos podem ser verificados nos trabalhos abaixo descritos.

Visando alcançar alto nível de interoperabilidade e permitir integração parcial de informações geográficas quando a integração total não for possível, Sistemas de Informação Geográfica Orientados por Ontologias [Fonseca & Egenhofer, 1999] propõe um mapeamento de ontologias orientado a objetos. Levando em consideração a oferta e o crescente uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG's), bem como o volume, complexidade e a riqueza de informações espaciais disponíveis, o trabalho apresenta uma arquitetura de SIG caracterizada por objetos interoperáveis, nos quais toda a funcionalidade e semântica do sistema estão embutidas. A ontologia é então vista como estruturas orientadas a objetos dinâmicas que possam ser navegadas.

Descoberta de Conhecimento em Bancos de Dados Guiada por Ontologias [Phillips & Buchanan, 2001] apresentam um sistema que explora informações contidas em

ontologias para auxiliar no processo de descoberta de conhecimento. O trabalho busca a sugestão e geração automática de novos atributos a partir de restrições e informações semânticas do domínio, a captura de conhecimento útil para reutilização, e a redução da carga de trabalho do usuário na interpretação de novas informações.

2.7.2 Ontologia como Mecanismo de Especificação

De acordo com [Menzies, 1999], um conceito é uma visão abstrata e simplificada do universo que se deseja representar para determinado objetivo, e uma ontologia é a especificação de uma conceitualização. Este processo de especificação exige o estabelecimento de axiomas que restrinjam as possíveis interpretações dos termos definidos. Assim, ontologias podem representar o conhecimento de um domínio através de um formalismo declarativo, que permite a descrição de objetos, suas propriedades e relacionamentos. “Compromissos” podem então ser especificados para determinado domínio de discurso, sem necessariamente abranger contextos globais. Desta forma, acordos de compromissos em determinado contexto asseguram coerência e consistência através da definição do vocabulário para a realização, por exemplo, de operações no âmbito desta ontologia.

Como mecanismo de especificação, ontologias devem ser projetadas. Isto envolve decisões que dependem de critérios baseados nos propósitos desejados para o artefato final. Alguns destes critérios possuem relevância decisiva, dentre eles [Menzies, 1999]:

- **Clareza:** uma ontologia deve expressar de forma efetiva o significado dos termos definidos, com objetividade. Definições, sempre que possível, devem ser elaboradas com axiomas lógicos, de forma completa e documentadas em linguagem natural.
- **Coerência:** uma ontologia deve validar inferências que sejam consistentes com as definições, ou seja, os axiomas definidos devem ser logicamente consistentes. Isto se aplica também a documentação em linguagem natural e aos exemplos. Se uma sentença (inferida a partir de axiomas) contradiz uma definição ou exemplo, a ontologia é inconsistente.

- Extensibilidade: o projeto da ontologia deve antecipar utilizações do vocabulário compartilhado, com fundamentos conceituais que permitam estender e especializar a ontologia. Assim, novos termos podem ser definidos para novas situações com base no vocabulário existente.

2.8 Ontologia de Imagens

Com a questão “Qual o *status* ontológico das informações das imagens de sensoriamento remoto?”, [Câmara et al., 2001] expõe a dicotomia campo/objeto das imagens, propondo uma ontologia multi-camada para estas com a finalidade de suportar múltiplas perspectivas de uma mesma imagem. Esta ontologia de imagens visa a detecção de configurações espaço-temporais de fenômenos geográficos, ponto fundamental para a mineração de dados em imagens.

O trabalho coloca que imagens de sensoriamento remoto são instrumentos ontológicos para capturar a dinâmica das paisagens, considerando que processos geográficos ocorrem num espaço multi-escala e que resultam de interações temporais e espaciais de diferentes fenômenos numa paisagem física. Assim, o foco da caracterização ontológica seria a busca por mudanças, ao invés da busca por conteúdos. Esta ênfase não deve ser interpretada como simples procedimentos de localização e de identificação de objetos, mas sim como um processo de captura da dinâmica de paisagens. A proposta contempla ainda a reutilização de conhecimento algorítmico para diferentes aplicações, contido em métodos de processamento de imagens, tais como segmentadores, classificadores, dentre outros.

2.8.1 Contexto Ontológico Multi-Camada para Extrair Informações de Imagens

A ontologia multi-camada para imagens (Figura 2.10) propõe a derivação de ontologias não apenas para os objetos do domínio, mas também para as ações intencionais, as quais são expressas pelos procedimentos aplicados ao conjunto de dados original para a extração de conhecimento. A proposta considera que as imagens possuem uma descrição própria, distinta e independente da ontologia de domínio que um cientista

utilizaria para extrair informações destas. O domínio ontológico (*fenomenologia*) para imagens possui três componentes inter-relacionados:

- *Ontologia Física* – descreve o processo físico da criação da imagem, com foco no conhecimento sobre a relação entre a energia refletida pela superfície terrestre e as medidas obtidas pelo sensor (resposta espectral, *backscatter*, dentre outros).
- *Ontologia Estrutural* – contempla as estruturas geométricas, funcionais e descritivas que podem ser extraídas através de técnicas de extração de características, segmentação, classificação (linhas, regiões, etc.).
- *Ontologia de Métodos* – consiste de um conjunto de algoritmos (que realizam transformações do nível físico para o nível estrutural) e de estruturas de dados que representam conhecimento reutilizável na forma de técnicas de processamento de imagens (filtragem, extração de características, etc.).

Enquanto esta ontologia fenomenológica é independente do observador, os cientistas de determinada área operam utilizando conceitos de seus domínios do conhecimento. Segundo [Guarino, 1997], existe uma distinção entre a *ontologia do domínio da aplicação*, que descreve o vocabulário relacionado a um domínio genérico (por exemplo, geologia ou ecologia), e a *ontologia de tarefas da aplicação*, que são especializações da ontologia do domínio da aplicação, as quais descrevem uma tarefa ou atividade em certo domínio (como estimativa de poluição da água para estudos ecológicos).

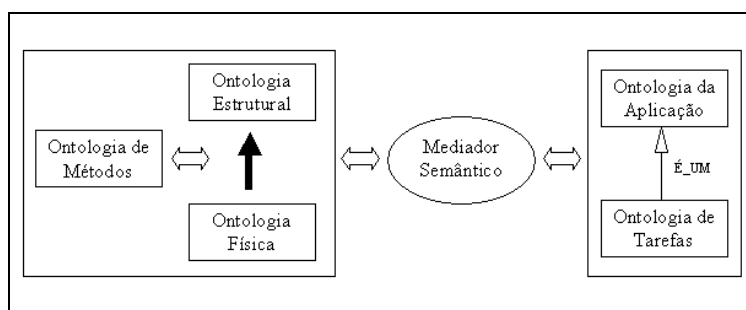


Figura 2.10: Contexto ontológico para extrair informações a partir de imagens [Câmara et al., 2001]

2.8.2 Mediação Semântica e Configuração Espacial

A relação entre a ontologia da imagem e a ontologia da aplicação é atingida através de um *mediador semântico*, que desempenha duas funções básicas [Câmara et al., 2001]:

- *Identificar* quais algoritmos específicos de processamento de imagens e de reconhecimento de padrões (descritos na ontologia de métodos) são necessários para extrair as estruturas desejadas a partir das imagens, ou para transformar os valores físicos (*pixels*) com vistas à obtenção da informação demandada.
- *Mapear* conceitos da ontologia do domínio em estruturas extraídas do conjunto de imagens. Por exemplo: uma *ontologia do domínio* pode conter um conceito de estrada; utilizando o *mediador semântico* pode-se identificar estradas entre as estruturas lineares que fazem parte da ontologia estrutural da imagem.

A ontologia multi-camada proposta permite que diferentes domínios de aplicação sejam relacionados ao mesmo domínio fenomenológico, refletindo o fato de que um mesmo conjunto de imagens pode ser usado em vários domínios do conhecimento. Considerando a abordagem construtiva para o mediador semântico, onde um observador externo elabora correspondências entre conceitos do *domínio da aplicação* e conceitos do *domínio fenomenológico* (e.g. *pequena fazenda* \Leftrightarrow *região espinha-de-peixe*), tal relacionamento é denominado “casamento” (*matching*). Numa instância temporal única, o conjunto dos casamentos *pequena fazenda* \Leftrightarrow *região espinha-de-peixe* é denominado *configuração espacial*, elemento fundamental na detecção de fenômenos espaciais e obtenção de conhecimento estratégico através da mineração de imagens.

2.9 Ontologias e Grafos

Ontologias têm sido, em muitos casos, representadas através de vários modelos baseados em texto. Mesmo sendo fácil de construir, a estrutura de um modelo textual é geralmente difícil de visualizar. Por este motivo, grafos geralmente são utilizados para representar, construir, manipular e visualizar relacionamentos estruturais de ontologias de forma simples, clara, elegante e computacionalmente tratável [Sowa, 2001].

O trabalho de [Mitra et al., 2000] destaca-se por propor uma abordagem que visa escalabilidade e facilidade de manutenção para a interoperabilidade de ontologias através de um modelo orientado a grafos. Esta arquitetura permite integração com dicionários semânticos públicos (e.g., Wordnet), sendo capaz de derivar mediadores compatíveis com ODMG automaticamente.

Neste contexto, é apresentado o software ONION que objetiva auxiliar o trabalho do especialista na eliminação de lacunas semânticas da ontologia relacionadas ao mundo real, possuindo recursos para especificações tanto automáticas (regras) como manuais. O modelo orientado a grafos é baseado em grafos direcionados rotulados, o qual disponibiliza primitivas de transformação de grafos para manipular a ontologia. É apresentada ainda uma álgebra de ontologias para possibilitar interoperabilidade ontológica (união, intersecção, diferença), a qual está implementada sobre o modelo de grafos utilizado.

CAPÍTULO 3

Metodologia

Este capítulo tem como objetivo geral a descrição da metodologia de mineração de acervos de imagens através de ferramentas computacionais semi-automáticas que permitam ao analista obter informações de alto nível a partir destas imagens. O objetivo específico do trabalho é projetar e construir uma arquitetura de reconhecimento de informação semântica em grandes bancos de dados de imagens de sensoriamento remoto, com o apoio de ontologias e técnicas de mineração de dados. A visão global do projeto está apresentada a seguir.

3.1 Descrição Geral

A proposta de mineração de imagens usando ontologias envolve dois processos. O primeiro permite construir padrões ontológicos a partir de imagens prototípicas que representam as configurações espaciais de referência. O segundo faz uso destes padrões ontológicos na forma de grafos e objetiva obter configurações espaciais em imagens, identificando nos acervos fenômenos descritos na ontologia de aplicação.

Na primeira fase do processo, é necessário construir uma ontologia estrutural para os fenômenos que se deseja identificar nos acervos. Também faz-se necessário construir a ontologia de aplicação para o domínio em questão. Por exemplo: se o interesse está baseado em desflorestamento relacionado ao extrativismo de madeira, então imagens pré-selecionadas deste fenômeno devem ser submetidas ao processo de construção de ontologia estrutural; concomitantemente, deve-se construir uma ontologia de aplicação descrevendo elementos, relacionamentos e hierarquias deste caso de desflorestamento.

A seguir, técnicas de extração de padrões em grafos irão gerar as assinaturas estruturais das imagens segmentadas. A partir das assinaturas das imagens que retratam o desflorestamento e da ontologia de aplicação para este domínio, a mediação semântica gera os padrões ontológicos de imagens para este fenômeno. Assim, nesta primeira fase,

é construída uma base contendo os padrões ontológicos relacionados ao desflorestamento causado pelo extrativismo de madeira (Figura 3.1).

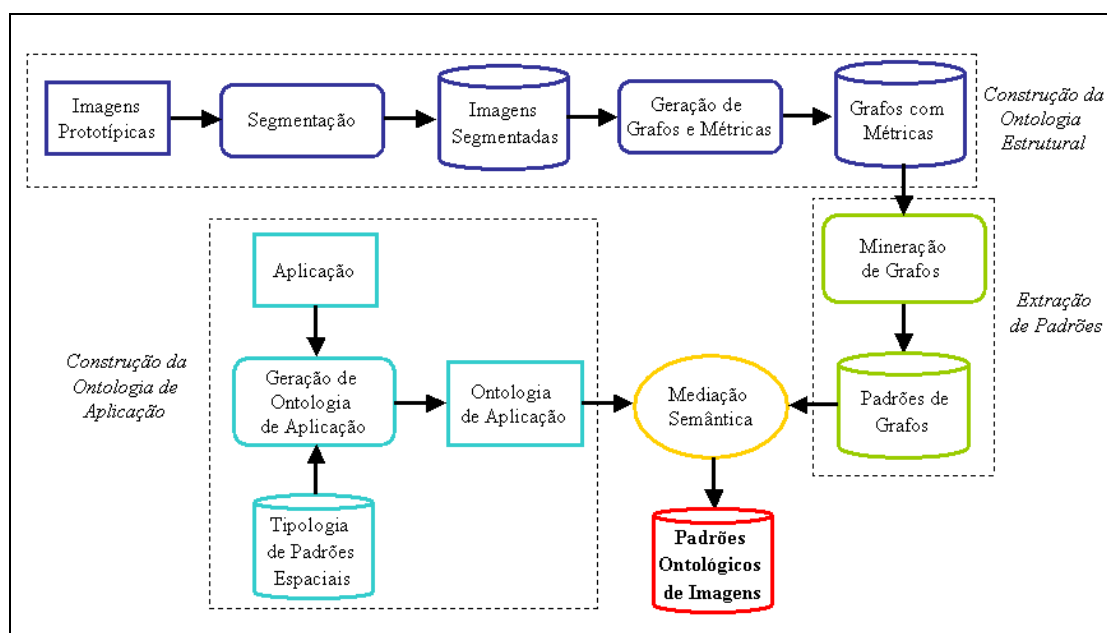


Figura 3.1: Processo de construção de padrões ontológicos

Para a segunda fase do processo, pressupõe-se que várias iterações (com diferentes conjuntos de imagens) da primeira fase tenham originado uma base de padrões ontológicos de imagens suficiente para analisar acervos do referido domínio. Assim, nesta segunda fase, o acervo de imagens a ser minerado deve passar pelo processo de construção de ontologia estrutural e posterior extração de padrões de grafos. Através de um processo de casamento de padrões [Bunke, 2000], os padrões de grafos obtidos e a base de padrões ontológicos da imagem (previamente gerados) serão confrontados, e suas instanciações positivas irão evidenciar as configurações espaciais no acervo de imagens minerado (Figura 3.2).

Visando contextualizar a arquitetura citada, segue a descrição do domínio de aplicação, do formalismo de representação (grafos), do suporte ontológico, da extração de padrões, do esquema de mediação e do protótipo a ser implementado. Para melhor entendimento do processo, um exemplo de sua aplicação é posteriormente apresentado.

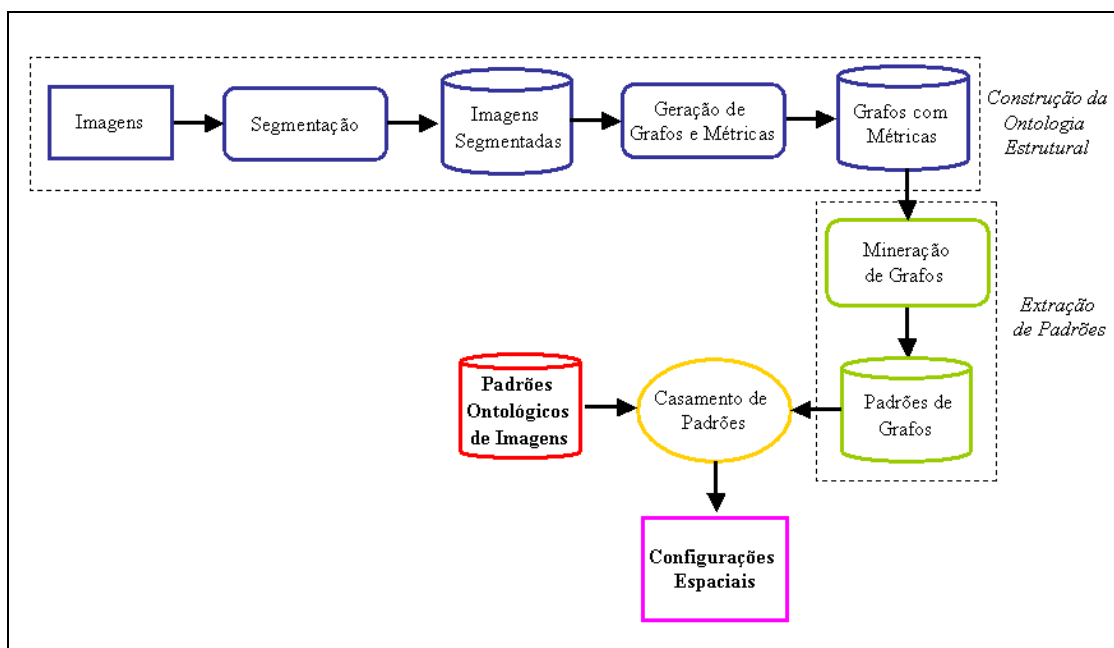


Figura 3.2: Processo de identificação de configurações espaciais

3.2 Domínio de Aplicação: Mudança de Uso e Cobertura do Solo na Amazônia

O “uso do solo”, influenciado pela ação humana e pelos processos e características ambientais, está relacionado ao propósito ao qual este serve, podendo ser agricultura, habitação, extrativismo, lazer, etc. Mudanças no uso do solo ocorrem em vários níveis espaciais e em diferentes períodos, denotando a dinâmica humana e ambiental sobre segmentos territoriais. A “cobertura do solo” descreve o estado físico da superfície deste solo, podendo ser floresta, água, área construída, etc. Alterações desta cobertura podem ser causadas por variações climáticas, mudanças de cursos de rios, dentre outros. Entretanto, a maioria das modificações na cobertura do solo é atribuída à ação humana. Mudança de uso e cobertura do solo significa mudanças na extensão (área – aumento ou diminuição) de um determinado tipo de uso ou cobertura [Briassoulis, 2000].

Desertificação, mudança de clima, perda de biodiversidade, dentre outros, podem implicar em severas conseqüências ao meio-ambiente e ao homem. A mudança de florestas e áreas de lavoura para uso urbano é uma importante alteração de uso do solo, devido às sérias implicações envolvidas. As causas e conseqüências da mudança de uso e cobertura do solo, e os impactos ambientais e sócio-econômicos desta mudança, têm

motivado vários projetos e temas de pesquisa. Uma destas iniciativas é [Lambin, 1999], cujo projeto enfatiza que mudança de uso do solo é um fator gerador de mudanças globais, interagindo com clima, processos de ecossistemas, ciclos bioquímicos, biodiversidade e – ainda mais importante – com atividades humanas. Os temas centrais do projeto envolvem padrões de cobertura do solo, processos de mudança, resposta do homem às mudanças, modelos globais e regionais integrados, desenvolvimento de bancos de dados sobre superfícies terrestres, processos biofísicos e seus fatores determinantes. Esta abordagem objetiva aperfeiçoar o entendimento, e ganhar novos conhecimentos, sobre mudanças regionais interativas de uso e cobertura do solo.

O caso amazônico é caracterizado pela complexidade, dimensão e volume de interesses envolvidos nas questões ligadas à mudança de uso e cobertura do seu solo [Becker, 1997]. O trabalho de [Alves, 2002] apresenta uma investigação da dinâmica espaço-temporal do desflorestamento da Amazônia, utilizando imagens de satélite de sensoriamento remoto para a análise de padrões espaciais de desflorestamento na década de 70 e entre 1991 e 1997. Algumas informações do trabalho: a área desflorestada passou de 10 milhões de hectares (década de 70) para aproximadamente 59 milhões de hectares em 2000; houve intensificação do desflorestamento nos anos 70 e 80 devido à política do governo federal que incluía a construção de grandes redes rodoviárias, e a apropriação de uma área de 100 Km ao longo das maiores rodovias para projetos de colonização; através da análise de imagens e seus padrões, é verificado que além do desflorestamento que se concentra ao longo das grandes rodovias e algumas zonas de desenvolvimento, ocorre ainda a fusão de pequenas áreas de desflorestamento que formam grandes áreas desflorestadas.

Uma vez que o rápido desflorestamento ocasiona degradação do solo, tensão social e urbanização precária, quanto mais rápida e precisa a identificação de áreas com tal tendência, maiores as chances de prevenir, administrar e reduzir as conseqüências do processo. Diariamente, diferentes satélites registram dados pertinentes a este contexto, cujas imagens são disponibilizadas para diversas instituições. Ferramentas de mineração de imagens podem aumentar consideravelmente a capacidade de análise deste grande

acervo de informações tão estratégicas, especialmente quando alguns fatores encontram-se presentes:

- Os padrões estruturais dos processos amazônicos são bem conhecidos e amplamente pesquisados pelo INPE;
- O desenvolvimento do processo histórico da Amazônia também é conhecido e acompanhado pela instituição;
- O INPE possui um rico acervo de imagens de sensoriamento remoto que fornece uma ampla cobertura espacial e temporal do território amazônico;
- A experiência da instituição no processamento e análise de imagens, bem como a produção de ferramentas de software, fornecem evidências relevantes para guiar os procedimentos computacionais da tarefa proposta.

3.3 Formalismo de Representação de Objetos: Grafos

Um grafo é uma abstração matemática muito útil para resolver diferentes tipos de problemas. Fundamentalmente, um grafo consiste de um conjunto de vértices, e de um conjunto de arcos (um arco conecta dois vértices). Um grafo consiste de um par (V, E) , onde V é um conjunto finito de vértices, e E é uma relação binária em V [Netto, 1996]. Diferentes modelos de grafos (grafos hierárquicos, grafos relacionais de atributos, grafos conceituais, etc.) agregam recursos à representação básica, permitindo que estes sejam utilizados para representar e manipular informações em diferentes domínios: genética, bioinformática, imagens, redes de computadores, fluxo de tráfego urbano, rotas aéreas, dentre outros.

Além de ser um formalismo computacional bem fundamentado e pesquisado, grafos representam naturalmente objetos e relacionamentos, através de uma abstração poderosa e detentora de um grande número de algoritmos e abordagens. No caso de imagens, a escolha da representação dos dados é fundamental, devido à complexidade do domínio, à variabilidade de características dos objetos e suas relações, além das questões de desempenho relacionadas com o processamento do modelo computacional. No trabalho

ora desenvolvido, informações sobre objetos extraídos de imagens e suas relações espaciais serão representadas por modelos de grafos, pois uma vez que o interesse recai sobre configurações espaciais (espinha-de-peixe, difuso, grandes fazendas, etc.), conjecturamos que estas configurações possam ser aproximadas por grafos. Existem precedentes desta abordagem na área de imagens médicas [Petrakis & Faloutsos, 1997]. Conjecturamos ainda que a passagem de ontologias de aplicação do domínio de uso e cobertura do solo para grafos é relativamente robusta, no sentido de achar o melhor isomorfismo inexato de grafos [Bunke & Jiang, 2000].

Além do grafo propriamente dito, métricas caracterizadoras da imagem e de seus objetos e relações serão utilizadas para agregar informações à ontologia estrutural. Área, perímetro, proximidade e conectividade dos objetos são informações preciosas para o domínio proposto. Metadados da imagem (região, data, sensor, resolução, etc.) permitem uma maior precisão no que diz respeito à especificação da ontologia e à automação de algumas fases do processo. Parâmetros de segmentação e de outros algoritmos utilizados também compõem a base de informações estruturais, já que o processo de mineração de dados caracteriza-se também pela iteração e reaplicação de procedimentos.

3.4 Suporte Ontológico

Diversos trabalhos, alguns relacionados na bibliografia, abordam problemas no domínio de imagens relacionados à identificação de padrões, extração de objetos, fluxo de processos, dentre outros. Entretanto, faz-se necessário relacionar as informações extraídas de imagens à sua semântica, ou seja, é preciso casar os elementos obtidos (padrões, objetos, métricas, etc.) ao seu significado contextual [Wang et al., 2002]. Neste trabalho, esta lacuna semântica é preenchida por ontologias (estrutural e de aplicação) que fornecem recursos para suportar a complexidade das informações retratadas por imagens de sensoriamento remoto [Câmara et al., 2001].

3.4.1 Ontologia Estrutural Baseada em Grafos e Métricas

A ontologia estrutural contempla as estruturas geométricas, funcionais e descritivas obtidas de imagens através de técnicas de extração de características e segmentação, descrevendo objetos, suas relações e métricas. Para construir esta ontologia, faz-se necessário derivar e integrar componentes caracterizadores da imagem, visando a formação de uma base que descreva a imagem estruturalmente, através da especificação de propriedades, relacionamentos e hierarquias.

A elaboração da ontologia estrutural compreende os seguintes passos (Figura 3.3):

- Seleção de um subconjunto de imagens, de acordo com a fase do processo;
- Segmentação de cada imagem, visando gerar um repositório de imagens segmentadas;
- Extração de grafos e métricas dos objetos do repositório de imagens segmentadas, para serem armazenados numa base específica juntamente com metadados e parâmetros de algoritmos.

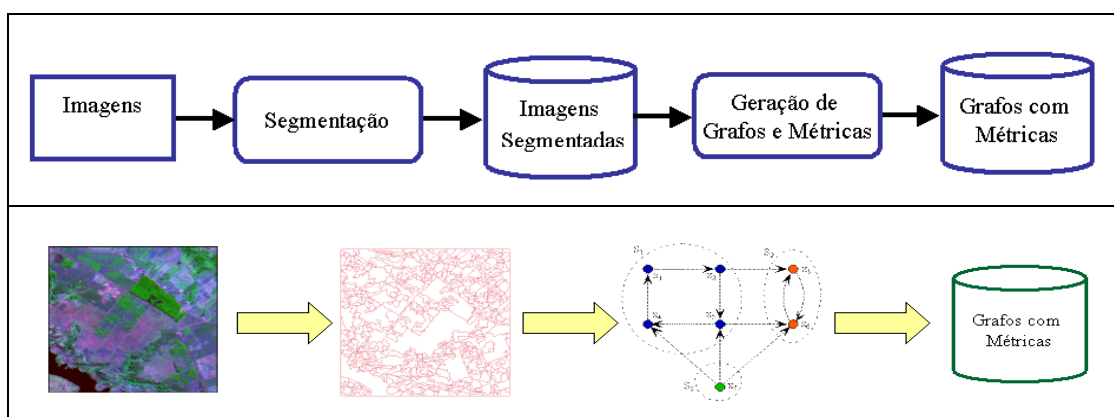


Figura 3.3: Construção da ontologia estrutural

3.4.2 Ontologia de Aplicação Baseada em Tipologia de Padrões Espaciais

A ontologia de aplicação descreve o vocabulário relacionado a um determinado domínio (por exemplo, ecologia), especificando contextos e atividades do mundo real, suas

especializações e características, além de identificar classes específicas dos seus elementos e respectivos relacionamentos. A construção desta ontologia demanda a definição da aplicação do domínio, suportada por modelos de estrutura e tipologia de padrões espaciais.

Considera-se que seqüências de eventos específicos que causam desflorestamento possuam características inconfundíveis. Processos de desflorestamento causados por diferentes fatores (agricultura de subsistência, fazendas de pecuária, empreendimentos de agronegócios, extração madeireira, dentre outros) em florestas tropicais estão comumente associados a padrões espaciais de áreas de floresta e/ou desflorestamento [Geist & Lambin, 2001]. A título de exemplo, o padrão difuso é geralmente causado pela agricultura de subsistência, corte e queimada, e pela dinâmica populacional [Mertens & Lambin, 1997] (Figura 3.4a), enquanto o assentamento planejado é fortemente estruturado, com linhas retilíneas e com direções bem definidas [Escada, 2003], conforme a Figura 3.4b. Outro padrão descrito em [Mertens & Lambin, 1997] é o espinha de peixe, caracterizado pelo reassentamento planejado e pela extração de madeira (Figura 3.4c).

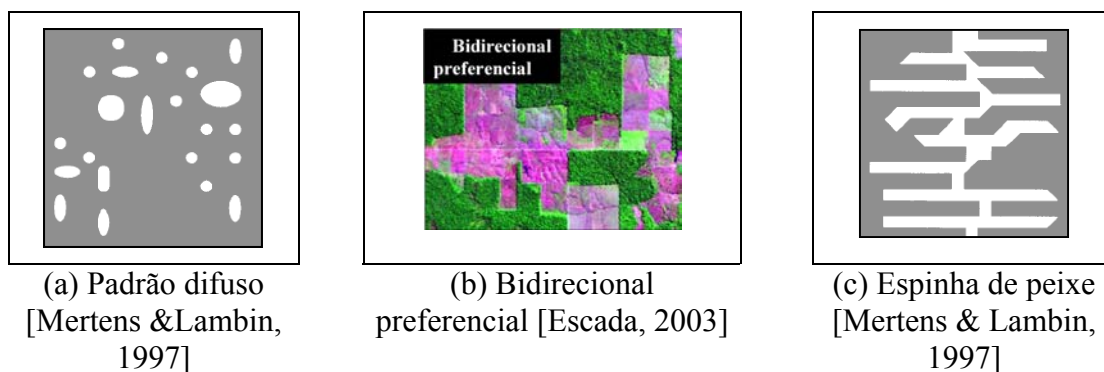


Figura 3.4: Exemplos de padrões espaciais de desflorestamento tropical

No processo de construção ontológica, o especialista determina (segundo demanda de análise) a aplicação e suas respectivas tarefas, seguindo a nomenclatura de [Câmara et al., 2001]. A partir deste ponto, tipologias e estruturas de padrões espaciais são utilizadas para formatar a ontologia de aplicação, que conterà informações detalhadas, conjunturais e hierárquicas acerca do domínio modelado (Figura 3.5).

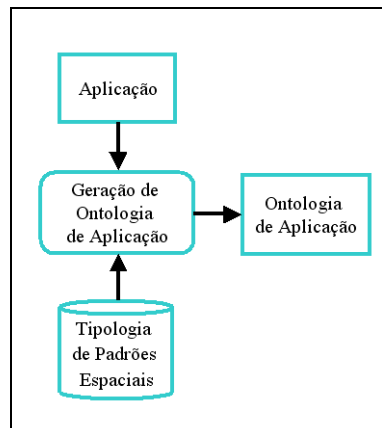


Figura 3.5: Construção da ontologia de aplicação

3.5 Extração de Padrões, Esquema de Mediação e Casamento de Padrões

Uma vez construída a ontologia de aplicação e a ontologia estrutural, faz-se necessário obter os padrões caracterizadores dos grafos e suas métricas (contidos na ontologia estrutural), visando a obtenção de padrões ontológicos através de mediação semântica. O casamento de padrões permitirá associar estes padrões ontológicos aos padrões obtidos a partir de grafos originários de novas imagens [Hoffmann & O’Donnel, 1982].

3.5.1 Extração de Padrões de Grafos

A ontologia estrutural, representada através de grafos e suas métricas, fornece um repositório rico em informações estruturadas e computacionalmente tratáveis acerca de imagens. Procedimentos de mineração de grafos devem ser realizados para possibilitar a identificação de padrões de imagens através desta base de dados. Tal passo viabiliza a identificação de “assinaturas” caracterizadoras da imagem, abstraindo a informação espacial neles contidas através de padrões estruturais e de métricas.

Visando preservar a semântica e eliminar volume e/ou redundância dos grafos, é proposta a compressão destes [Holder et al., 2002], gerando assim estruturas mais leves computacionalmente. Uma vez comprimidos os grafos, estes podem ser minerados através de subestruturas [UTA, 2004], aprendizagem relacional [Gonzalez et al., 2001], de código DFS [Yan & Han, 2003], ou ainda através de regionalização por árvore geradora mínima [Neves et al., 2004]. Os modelos e medidas resultantes do processo de

mineração são então armazenados numa base de padrões de grafos, que servirão de “assinatura estrutural” das imagens que os originaram (Figura 3.6).



Figura 3.6: Extração de padrões de grafos

3.5.2 Esquema de Mediação

Uma vez definida a ontologia de aplicação e os padrões de grafos, o especialista realiza o processo de mediação semântica, que consiste na atribuição de instâncias da ontologia a suas respectivas assinaturas estruturais (padrões de grafos) conforme a Figura 3.7. O resultado deste processo é um repositório de padrões ontológicos de imagens, que associam cada tarefa da ontologia de aplicação a um ou mais padrões de grafos, superando assim a lacuna semântica entre o nível de objetos e o nível semântico da imagem.

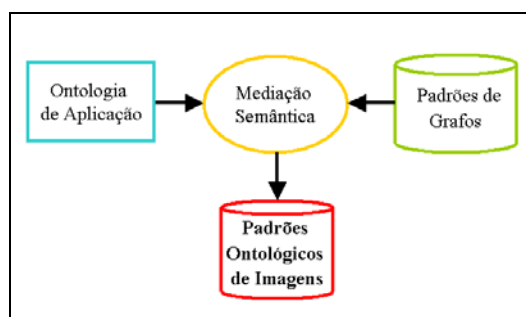


Figura 3.7: Obtenção de padrões ontológicos

3.5.3 Casamento de Padrões

Supondo que a tradução de padrões de uso e cobertura do solo em grafos (hipótese a ser testada) seja bem sucedida, isto implica que o casamento de padrões será um problema de casamento impreciso de grafos [Holder et al., 2002], ou seja, localizar no grafo estrutural (que representa objetos provenientes da segmentação) subgrafos que correspondam ao padrão solicitado. Um exemplo é o caso do padrão espinha de peixe,

que será transformado num grafo quando presente numa imagem. Os subgrafos que correspondam à espinha de peixe serão então associados através de um processo de casamento de padrões de grafos inexatos visando obter as configurações espaciais (Figura 3.8).

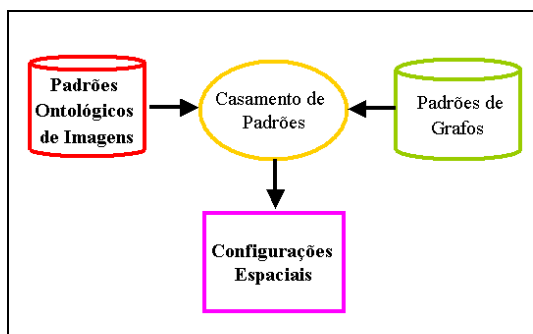


Figura 3.8: Casamento de padrões – grafos inexatos

3.6 Exemplo de Processo de Mineração de Imagens

Com o intuito de ilustrar o processo ora descrito, tomemos novamente o exemplo do extrativismo de madeira na Amazônia. Tomando por base a aplicação (extrativismo de madeira), o conhecimento agregado deste processo (características históricas, sociais, econômicas e ambientais) e uma tipologia de padrão espacial inerente ao domínio, procede-se à construção de uma ontologia de aplicação para este caso.

Em paralelo, imagens selecionadas caracterizadoras deste problema (extrativismo de madeira na Amazônia), são segmentadas, seus grafos e métricas são gerados e armazenados (ontologia estrutural). Neste ponto, é realizado um processo de mineração de grafos sobre estes dados, o que originará assinaturas (padrões) destes grafos (e de suas respectivas imagens).

Então, com informações da ontologia de aplicação e da ontologia estrutural (padrões de grafos/assinaturas), é possível para o especialista construir os padrões ontológicos das imagens (mediação semântica), que associará instâncias da ontologia de aplicação às assinaturas geradas (Figura 3.9).

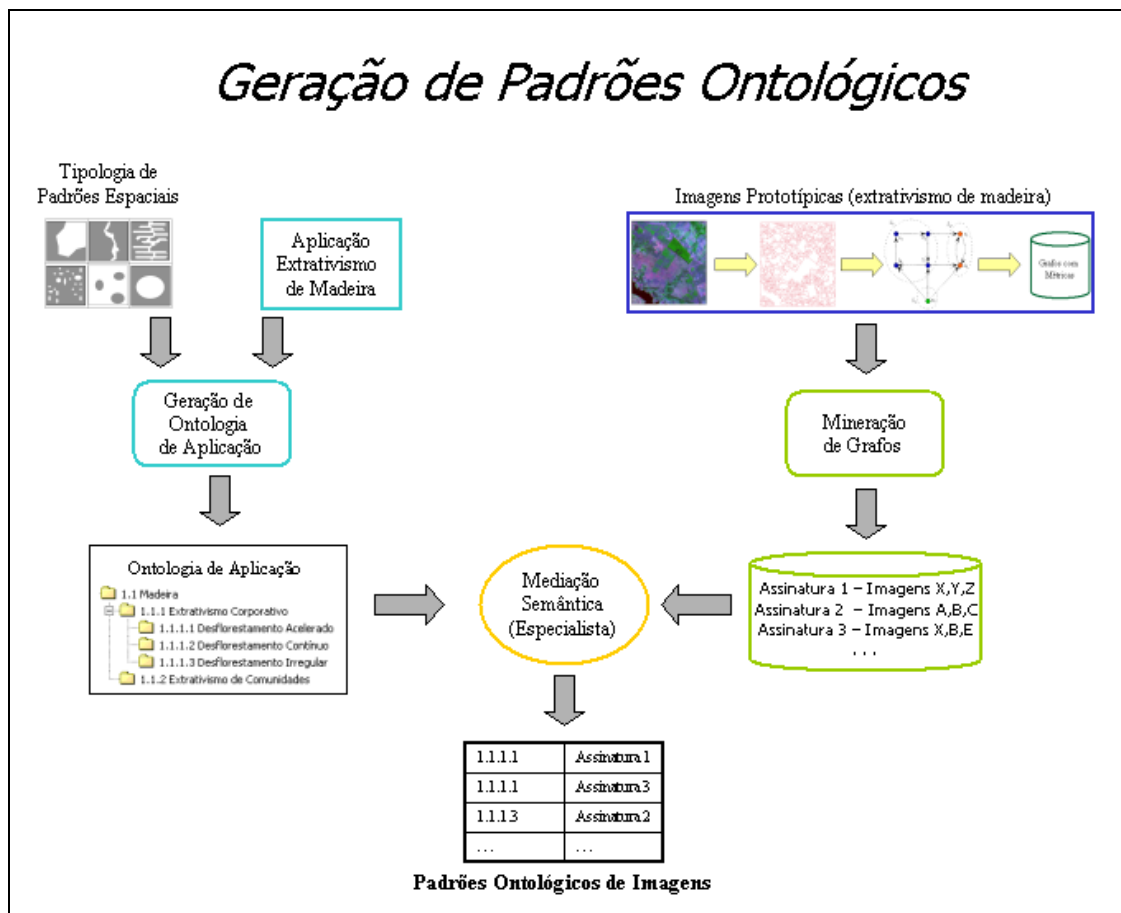


Figura 3.9: Exemplo da 1ª fase do processo de mineração de imagens

A seguir, um procedimento de detecção de áreas com *desflorestamento acelerado e/ou irregular ocasionado por extrativismo de madeira corporativo* pode ser realizado através da 2ª fase do processo. Nesta fase, um conjunto de imagens candidatas é selecionado e segmentado, tendo seus grafos e métricas gerados e, em seguida, minerados. As assinaturas geradas são então submetidas a um processo de casamento de padrões com as assinaturas da ontologia de aplicação (1.1.1.1 e 1.1.1.3). As instâncias selecionadas no processo de casamento de padrões indicarão imagens onde o extrativismo caracterizado possa estar ocorrendo. No exemplo da Figura 3.10, as imagens H, I, J, K, L, M são caracterizadas pelo processo de mineração de imagens usando ontologias, indicando *desflorestamento acelerado e/ou irregular ocasionado por extrativismo de madeira corporativo*.

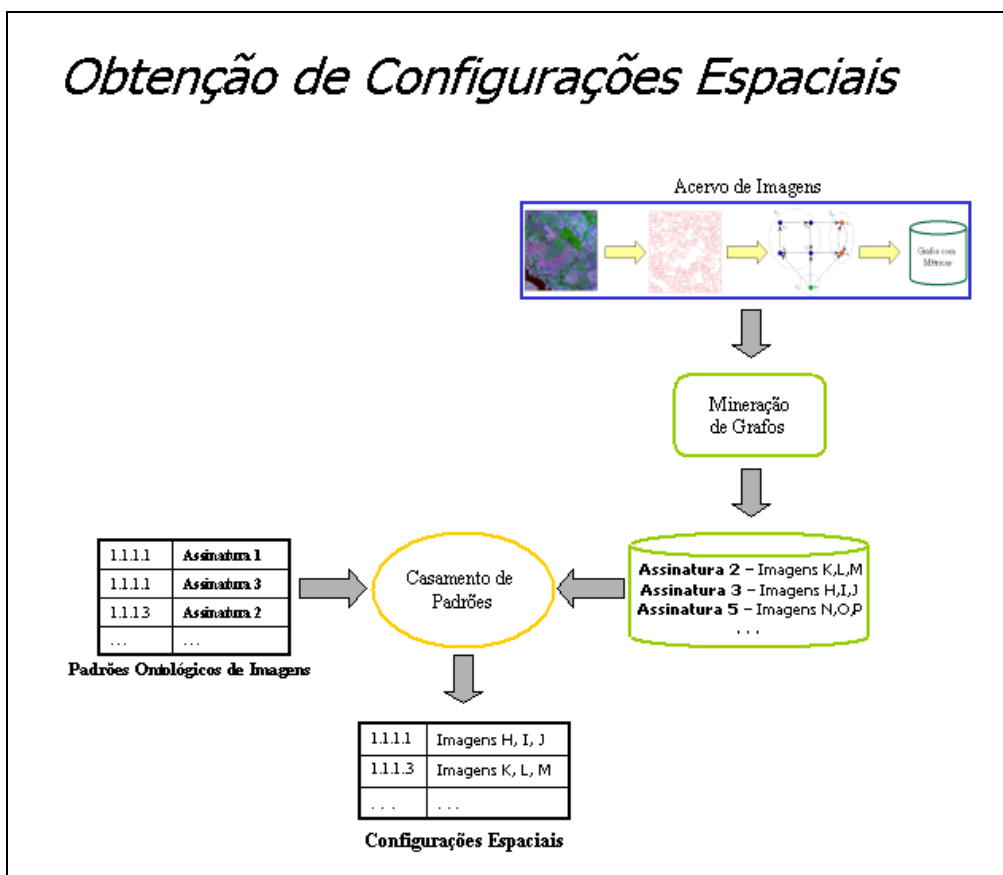


Figura 3.10: Exemplo da 2ª fase do processo de mineração de imagens

3.7 Protótipo da Ferramenta de Mineração

Com o intuito de validar os conceitos da metodologia proposta, um protótipo de software será construído. Componentes de qualidade para esta tarefa estão disponíveis com código aberto (ou acessível), a saber:

- Segmentação de imagens – a abordagem de crescimento de regiões para a segmentação de imagens de satélite [Bins et al., 1996] implementado no SPRING [DPI, 2004] tem demonstrado eficiência técnica para imagens de floresta e regiões agrícolas;
- Representação e manipulação de grafos – a *Boost Graph Library* (BGL) [Siek et al., 2002] provê recursos para a construção e manipulação de grafos, fornecendo uma série de algoritmos clássicos e inerentes ao processamento de grafos;

- Mineração de grafos – o SubDue [Holder et al., 2002] é um sistema que possui recursos para minerar subestruturas e padrões, agrupamentos, compressão, aprendizagem relacional e isomorfismo inexato de grafos;
- Regionalização de AGM – a Terralib [DPI et. al., 2004], uma biblioteca de funções e classes para sistemas de informação geográfica, possui (dentre outros recursos) uma implementação de regionalização de árvore geradora mínima [Neves et al., 2004].

Como nem todas as funcionalidades requeridas para o protótipo encontram-se disponíveis, a sua implementação demandará a adaptação e integração destes componentes, além da construção de novos componentes visando atender à demanda funcional da arquitetura de mineração de imagens proposta.

CAPÍTULO 4

Cronograma

O cronograma de desenvolvimento das atividades necessárias à elaboração do trabalho desta tese é apresentado neste capítulo. O curso foi iniciado em março de 2002. Foram obtidos os 48 créditos requeridos e realizados os exames de língua estrangeira (inglês e espanhol), bem como o Exame de Qualificação. As atividades e seus períodos de realização (Tabela 4.1) a partir do presente momento são os seguintes:

- Elaboração e defesa da Proposta de Tese
- Submissão de artigo para congresso nacional/internacional
- Construção dos elementos conceituais e teóricos propostos
- Submissão de artigo para revista indexada
- Implementação de protótipo para testes e validação
- Redação e defesa da Tese

Os eventos e publicações aos quais serão submetidos trabalhos, dentre outros, são:

- Simpósio Brasileiro de Geoinformática (GeoInfo 2004) – submissão da presente proposta (prazo de submissão: agosto/2004);
- Conference on Spatial Information Theory (COSIT 2005) – submissão da arquitetura e resultados alcançados, mesmo que parciais (prazo de submissão: fevereiro/2005);
- International Journal on GIS ou GeoInformatica - artigo completo com resultados (a ser enviado em meados de 2005).

TABELA 4.1: CRONOGRAMA DE TRABALHO

Atividade/Período	2004.1	2004.2	2004.3	2005.1	2005.2
Elaboração e defesa da Proposta de Tese	●				
Submissão de artigo para congresso		●	●		
Construção dos elementos conceituais e teóricos		●			
Submissão de artigo para revista indexada				●	
Implementação do protótipo			●	●	
Redação e defesa da Tese				●	●

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [Alves, 2002] Alves, D. S. **Space-time Dynamics of Deforestation in Brazilian Amazônia**, in International Journal of Remote Sensing, v. 23, n. 14, 2002.
- [Ballard & Brown, 1982] Ballard, D.; Brown, C. **Computer Vision**. New Jersey: Prentice Hall, 1982.
- [Becker, 1997] Becker, B. **Amazônia**, Editora Ática, 1997. 112 p.
- [Bins et al., 1996] Bins, L. S.; Fonseca, L. M.; Erthal, G. J.; Ii, F. M. **Satellite Imagery Segmentation: a Region Growing Approach**, in VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 1996.
- [Bittner & Winter, 1999] **Bittner, T.; Winter, S. On Ontology in Image Analysis**, in Integrated Spatial Databases: Digital Images and GIS, P. Agouris and A. Stefanidis (Eds). Springer-Verlag, 1999. p. 168-191.
- [Briassoulis, 2000] Briassoulis, H. **Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches**. [online] <<http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm>>. Visitado em 07 maio 2004.
- [Bunke, 2000] Bunke, H. **Graph Matching: Theoretical Foundations, Algorithms, and Applications**, in Vision Interface, Montreal, 2000. p. 82-88.
- [Bunke & Jiang, 2000] Bunke, H.. Jiang, X. **Graph matching and similarity**, in: Intelligent Systems and Interfaces, Kluwer Academic Publishers, 2000
- [Câmara et al., 2001] Câmara, G.; Egenhofer, M.; Fonseca, F.; Monteiro, A. M. V. **What's In An Image?**, in Conference on Spatial Information Theory, Santa Barbara, 2001.
- [DPI, 2004] Divisão de Processamento de Imagens – INPE. **SPRING – Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas** [online]. 2004. <<http://www.dpi.inpe.br/spring/>>. Visitado em 12 maio 2004.
- [DPI et. al., 2004] Divisão de Processamento de Imagens – INPE; Tecgraf; Funcate. **Terralib** [online]. 2004. < <http://www.terralib.org> >. Visitado em 11 maio 2004.
- [Escada, 2003] Escada, M. I. S. **Evolução de Padrões de Uso da Terra na Região Centro-Norte de Rondônia**. São José dos Campos. 155p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2003.
- [Fayyad et al., 1996] Fayyad, U. M.; Piatetsky-Shapiro, G.; Smith, P. **Advances in Knowledge Discovery and Data Mining**. Massachusetts: MIT Press, 1996. 560 p.
- [Fonseca, 2000] Fonseca, L. M. G. **Processamento Digital de Imagens**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Junho 2000.
- [Fonseca & Egenhofer, 1999] Fonseca, F.; Egenhofer, M., **Ontology-Driven Geographic Information Systems**, ACM GIS' 99, Kansas City, 1999.

- [Geist & Lambin, 2001] Geist, H.; Lambin, E. **What Drives Tropical Deforestation**. [online]. n. 4, 1999. <<http://www.geo.ucl.ac.be/LUCC/lucc.html>>. Visitado em 14 agosto 2003.
- [Gonzalez et al., 2001] Gonzalez, J.; Holder, L.; Cook, D. **Graph-Based Concept Learning**. American Association for Artificial Intelligence, 2001.
- [Guarino, 1997] Guarino, N., **Semantic Matching: Formal Ontological Distinctions for Information Organization, Extraction, and Integration**, in Information Extraction: A Multidisciplinary Approach to an Emerging Information Technology, SCIE-97, Berlin, 1997, p. 139-170.
- [Han et al., 1997] Han, J.; Koperski, K.; Stefanovic, N. **GeoMiner: A System Prototype for Spatial Data Mining**, in ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, Arizona, 1997. p. 553-556.
- [Han & Kamber, 2001] Han, J.; Kamber, M. **Data Mining: Concepts and Techniques**. Simon Fraser University: Morgan Kaufmann Publishers, 2001. 550 p.
- [Hoffmann & O'Donnel, 1982] Hoffmann, C.; O'Donnel, M. **Pattern Matching in Trees**, in Journal of the ACM, 1982. p. 68-95
- [Holder et al., 2002] Holder, L.; Cook, D.; Gonzalez, J.; Jonyer, I. **Structural Pattern Recognition in Graphs**, in Pattern Recognition and String Matching, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [Holder & Cook, 2003] Holder, L.; Cook, D.; **Graph-Based Relational Learning: Current and Future Directions**, in SIGKDD Explorations, v. 5, n. 2. ACM, dezembro 2003.
- [Karypis et al., 1999] Karypis, G.; Han, E.; Kumar, V. **Chameleon: A Hierarchical Clustering Algorithm Using Dynamic Modeling**, in IEEE Computer, 1999.
- [Lambin, 1999] Lambin, E. et al **Land-Use and Land-Cover Change Implementation Strategy**. [online]. n. 48, 1999. <<http://www.geo.ucl.ac.be/LUCC/lucc.html>>. Visitado em 07 agosto 2003.
- [Marr, 1982] Marr, D. **Vision**. W.H. Freeman. San Francisco, CA, 1982.
- [Mather, 1999] Mather, P. M. **Computer Processing of Remotely-Sensed Images**. Second Edition. John Wiley & Sons, 1999. 292 p.
- [May & Savinov, 2002] May, M.; Savinov, A. **An Integrated Platform for Spatial Data Mining and Interactive Visual Analysis**, in International Conference on Data Mining Methods and Databases for Engineering, Italy, 2002.
- [Menzies, 1999] Menzies, T. **Cost Benefits of Ontologies**, in Intelligence, Fall 1999. p. 27-31.
- [Mertens & Lambin, 1997] Mertens, B.; Lambin, E. **Spatial Modeling of Deforestation in Southern Cameroon: Spatial Disaggregation of Diverse Deforestation Processes**, in Applied Geography, n. 17, 1997. p.143-162.
- [Mitra et al., 2000] Mitra, P.; Wiederhold, G.; Kersten, M. **A Graph-Oriented Model for Articulation of Ontology Interdependencies**. Stanford University, 2000.

- [Nagao & Matsuyama, 1980] Nagao, M.; Matsuyama, T. **A Structural Analysis of Complex Aerial Photographs**. Plenum Press, 1980. 199 p.
- [Netto, 1996] Netto, P. O. B. **Grafos: Teoria, Modelos e Algoritmos**. Edgard Blucher Ed., 1996. 304 p.
- [Neves et al., 2004] Neves, M. C.; Câmara, G.; Assunção, R. M.; Freitas, C. C. **Efficient Regionalization Techniques for Sócio-Economic Geographical Units Using a Minimum Spanning Tree**. International Journal on GIS, 2004.
- [Newsam et al., 2001] Newsam, S.; Bhagavathy, S.; Fonseca, L.; Kenney, C.; Manjunath, B. **Object-Based Representations of Spatial Images**, in Acta Astronautica, v. 48, n. 5-12, 2001. p. 567-577.
- [Noble & Cook, 2003] Noble, C.; Cook, D. **Graph-Based Anomaly Detection**, in ACM International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2003.
- [Petrakis & Faloutsos, 1997] Petrakis, E.; Faloutsos, C. Similarity Searching in Medical Image Databases. **IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering**, v. 9, n. 3, p. 435-447, Maio 1997.
- [Phillips & Buchanan, 2001] Phillips, J.; Buchanan, B., **Ontology-Guided Knowledge Discovery in Databases**, K-CAP' 01, ACM, Canada, 2001, p. 123-130
- [Qian & Zhang, 2004] Qian, Y.; Zhang, K. **GraphZip: A Fast and Automatic Compression Method for Spatial Data Clustering**, in ACM Symposium on Applied Computing, 2004.
- [Schowengerdt, 1997] Schowengerdt, R. A. **Remote Sensing – Models and Methods for Image Processing**. Second Edition. Academic Press, 1997. 522 p.
- [Siek et al., 2002] Siek, J.; Lee, L.; Lumsdaine, A. **The Boost Graph Library**. Addison Wesley, 2002. 321 p.
- [Sowa, 2001] Sowa, J. **Building, Sharing and Merging Ontologies**. [online], 2001. <<http://www.jfsowa.com/ontology/ontosar.htm#s5>>. Visitado em 13 maio 2004.
- [Thies et al., 2003] Thies, C.; Metzler, V.; Aach, T. **Content-Based Image Analysis: Object Extraction by Datamining on Hierarchically Decomposed Medical Images**. Institute of Medical Informatics, Germany, 2003.
- [UAH, 2003] University of Alabama in Huntsville **ADaM 4.0.0 Documentation (Draft)**. [online], 2003. <datamining.itsc.uah.edu/adam/docs/ADaM_4_Overview.doc>. Visitado em 21 agosto 2003.
- [UTA, 2004] University of Texas in Arlington. **The Subdue Knowledge Discovery System**. [online], 2004. <<http://cygnus.uta.edu/subdue/>>. Visitado em 04 maio 2004.
- [Wang et al., 2002] Wang, L.; Khan, L.; Breen, C. **Object Boundary Detection for Ontology-based Image Classification**, in Mining Multimedia and Complex Data, Springer-Verlag, 2002. p. 36-49.
- [Yan & Han, 2003] Yan, X.; Han, J. **GSpan: Graph-Based Substructure Pattern Mining**, in International Conference on Data Mining, Japan, 2003.

[Zhang et al., 2001] Zhang, J.; Hsu, W.; Lee, M. **An Information-Driven Framework for Image Mining**, in: DEXA. Anais. : National University of Singapore, 2001.p. 232-242.

[Zhang et al., 2002] Zhang, J.; Hsu, W.; Lee, M. **Image Mining: Trends and Developments**. Kluwer Academic, 2002.