

Fernando Antonio Rodrigues de Oliveira

**Detecção de depressões cársticas a partir de classificação
espectral e morfológica de imagens de sensoriamento remoto na
região do Alto rio Paracatu (MG)**



Monografia apresentada ao Curso de Especialização
em Geoprocessamento da Universidade Federal de
Minas Gerais para a obtenção do título de
Especialista em Geoprocessamento

Orientador:
Philippe Maillard

2001

Oliveira, Fernando Antonio Rodrigues de

Detecção de depressões cársticas a partir de classificação espectral e morfológica de imagens de sensoriamento remoto na região do Alto rio Paracatu (MG).-Belo Horizonte: UFMG/IGC - Departamento de Cartografia,2001
55p.

Monografia (Especialização)-Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Departamento de Cartografia

1.Sensoriamento Remoto. 2.Geoprocessamento 3.MDT 4.Carste
5.Dolinas

Agradecimentos:

À minha família: Magda, Elisa e Fernanda;

À Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais;

Ao Dr. Philippe Maillard;

Ao Geólogo Claiton Piva Pinto;

A Todos amigos e colegas que me incentivaram.

Sumário

Resumo.....	IV
Abstract.....	V
Lista de Figuras.....	VI
Lista de Tabelas.....	VII
1 Introdução.....	1
2 Objetivos.....	3
3 Localização e Aspectos Gerais da Área.....	3
4 Metodologia.....	6
4.1 Materiais Utilizados.....	7
5 Geologia.....	9
6 Geomorfologia.....	14
6.1 Aspectos Gerais.....	14
6.2 Segmentação hipsométrica.....	18
6.3 Relêvo Cárstico.....	22
6.3.1 Feições cársticas.....	24
6.3.2 Fotointerpretação e Caracterização do Relêvo Cárstico no vale do Alto rio Paracatu.....	26
7 Classificação espectral das superfícies associadas as dolinas.....	31
8 Caracterização morfológica quantitativa das superfícies das dolinas.....	35
9 Classificação morfológica das dolinas.....	37
10 Resultados obtidos.....	38
11 Conclusões	46
12 Referências bibliográficas.....	47

Resumo

As rochas carbonáticas da região de Vazante–Paracatu-João Pinheiro ,em Minas Gerais, no vale do Alto rio Paracatu são importantes tanto pelo aspecto econômico (calcário, jazidas associadas de Pb e Zn) mas também como aquíferos. Devido às condições favoráveis desenvolveu-se na área o relevo cárstico cuja expressão mais típica são as dolinas e a drenagem subterrânea.A presença de dolinas nesse contexto é evidencia indireta e clara da existência dos carbonatos em subsuperfície. Visando utilizar este fato como técnica de mapeamento geológico, foi feita a classificação de imagens Landsat baseada na resposta espectral dessas depressões cársticas.Como abordagem simplificadora foi feita uma prévia seleção de áreas baseada em critérios obtidos através de mapas hipsométricos digitais (M.D.T.).Os resultados obtidos foram melhorados através de uma classificação morfológica baseada na área e alongação dos candidatos à dolina. Para o estabelecimento de parâmetros de classificação morfológica foi executada uma amostragem e cálculo de estatísticas de 470 dolinas. Os resultados da classificação espectral combinados com a pré-seleção auxiliar hipsométrica e encadeados com classificação morfológica produziu resultados satisfatórios permitindo a detecção de dolinas automaticamente e atingindo os objetivos propostos de mapeamento preliminar sem controle de campo.

Abstract

The carbonate sediments that occupy large areas in the northwest part of the state of Minas Gerais, in the region near the cities of Vazante, Paracatu and João Pinheiro are associated with Pb-Zn deposits and are also good aquifers. These region has good conditions for the solution in water of limestone giving origin to a karst relief. The typical characteristics of these landscapes are dolines and a significant subterranean waterflow. The dolines are indirect clear evidences of the existence of underlain carbonate. A classification based on the spectral response of these karstic sinkholes was done by utilizing Landsat scenes. A previous area selection was conducted with information derived by the analysis of a Digital Elevation Model (DEM). After this, the objects classified in the last step were submitted to another classification based on morphological criteria: area and elongation of the candidate objects. To obtain parameters for this step a sample of 470 dolines was collected and analyzed. These enchainned procedures arrived to good results by permitting to detect automatically the dolines. This technique was devised to be a tool for a preliminary reconaissance.

Lista de Figuras

Fig. 3-1 Situação e localização da área estudada.....	5
Fig. 4-1 Fluxograma de atividades para a classificação espectral e morfológica de depressões.....	8
Fig. 5-1 Localização de área sobre esboço geológico da Bacia do São Francisco.....	12
Fig. 5-2 Esboço geológico mostrando a extensão das coberturas recentes que mascaram as rochas do Subgrupo Paraopeba na área estudada.....	13
Fig. 6.1-1 Unidades geomorfológicas e formas de relevo na área do Vão do rio Paracatu	16
Fig. 6.2-1 mapa Hipsométrico baseado em Modelo Digital de Terreno das folhas 1:250.000 :João Pinheiro (SE-23-V-D) e Paracatu (SE-23-V-C), com o traçado dos perfis topográficos digitais. Escala 1:750.000.....	20
Fig. 6.2-2 Imagem (Landsat TM5) da área com superposição de máscara hipsométrica.....	21
Fig. 6.3.2-1 Feições cársticas em mapa de drenagem (fonte IBGE).....	27
Fig. 6.3.2-2 Dolinas na superfície T1.....	28
Fig. 6.3.2-3 Imagem R4G5B7 Landsat TM5 apresentando várias depressões cársticas incluindo o polje do rio da Prata.....	30
Fig. 7-1 Resultado da classificação temática utilizando seis bandas espectrais (Landsat TM5 b1,2,3,4,5,7).....	34
Fig. 8-1 Histograma de 470 amostras de dolinas na área do vale do Alto rio Paracatu.....	36
Fig. 10-1 Localização das áreas exemplo de classificação temática espectral e morfológica.....	39
Fig. 10-2 Ilustração do processo de detecção de objetos candidatos à dolina na área exemplo A	40
Fig. 10-3 Ilustração do processo de detecção de objetos candidatos à dolina na área exemplo B.....	41
Fig. 10-4 Ilustração do processo de detecção de objetos candidatos à dolina na área exemplo C.....	43
Fig. 10-5 Ilustração do processo de detecção de objetos candidatos à dolina na área exemplo D.....	44
Fig. 10-6 Ilustração do processo de detecção de objetos candidatos à dolina na área exemplo E.....	45

Lista de Tabelas

Tabela 6.1-1 Principais ciclos denudacionais.....	17
Tabela 6.2-1 Superfícies obtidas através do Modelo digital de Terreno, com associação preliminar à nomenclatura existente.....	19
Tabela 8-1 Estatísticas básicas da amostra de dolinas.....	35
Tabela 8-2 Matriz de correlação entre os parâmetros analisados.....	35

1 Introdução

Uma das possibilidades do sensoriamento remoto e do geoprocessamento em conjunto é a capacidade de estudar grandes áreas da superfície terrestre em grande velocidade mantendo a precisão dos resultados. A utilização dessas características pode ser aplicada com grandes benefícios aos programas e projetos de mapeamento geológico visando a prospecção mineral e aos estudos hidrogeológicos e ambientais. A resposta rápida e precisa dessas técnicas é bastante compatível com as necessidades de programas e projetos que abrangem grandes áreas e que necessitam ser verdadeiramente esquadrihadas visando localizar evidências nem sempre conspícuas de depósitos minerais ou mesmo estruturas geológicas indicadoras que possam indiretamente levar a eles.

Em termos geológicos, a região de Paracatu-João Pinheiro situa-se no encontro de dois domínios tectônicos bem diferenciados: a leste, em direção ao centro do cráton do S. Francisco, o domínio das coberturas sedimentares plataformais do Supergrupo São Francisco, indeformadas e a oeste o domínio das sequências tectonizadas e metamorfozadas do Gr. Canastra (filitos e quartzitos). Esta região é cortada por falhamentos de grande extensão incluindo lineamentos geofísicos magnéticos da ordem de várias centenas de quilômetros e de evidente significado regional em nível crustal. Nessa região ocorrem importantes jazidas de chumbo e zinco (Vazante), ouro (Paracatu), ocorrências de fluorita, barita, fosfato, cobre. A separação desses domínios a luz dos conhecimentos geológicos atuais ocorre através de falhamentos de direção geral norte-sul. Esses falhamentos limitam as rochas supracrustais argilo-carbonáticas do Gr. Bambuí separando-as das rochas da Grupo Vazante formada por quartzitos, filitos, calcários e ardósias que hospedam em suas descontinuidades as jazidas acima citadas.

A junção desses domínios apresenta uma geologia complexa que serviu de substrato para o atual modelado do relevo cujos registros mais antigos se iniciam pela presença de superfícies peneplanizadas até as coberturas detríticas coluvionares e aluvionares recentes que ocorrem nas áreas mais baixas do vale do rio S. Francisco e seus afluentes como o rio Paracatu, cuja bacia é o cenário deste estudo. O soterramento das rochas do substrato pelo processo de agadação recente torna mais difícil revelar as feições estruturais pretéritas que podem conter a chave da localização das jazidas da

área. A separação das fácies arenosas, carbonáticas e pelíticas, tarefa fundamental para estabelecer as interrelações metalogenéticas na área bem como a evolução da sedimentação da bacia Bambuí mostra-se também dificultada pelas coberturas superficiais.

Em particular, as rochas carbonáticas aí existentes, tem um papel de destaque tanto localmente quanto regionalmente estando presentes em grande parte da bacia hidrográfica do rio São Francisco. São importantes não só como bem mineral em sí (calagem e matéria prima para a indústria do cimento) mas também pela existência das ancestrais estruturas biológicas marinhas algais que ocorrem associados as zonas mineralizadas. São relevantes ainda como aquíferos de grande importância, pois nas suas entranhas desenvolveu-se a formação de dutos de dissolução que se intercomunicam criando redes de percolação de água subterrânea ao longo de zonas de fraqueza e que em certos casos concorre com a drenagem de escoamento superficial de água quando não a substituí inteiramente criando estranhas paisagens sem rios - as paisagens cársticas. Estas paisagens cársticas caracterizam-se por feições típicas entre as quais ressaltamos as depressões denominadas dolinas que consistem em sumidouros que drenam a água superficial para a rede subterrânea. A presença de dolinas num contexto de rochas carbonáticas torna-as evidencia superficial aparente e clara da distribuição dessa litologia em subsuperfície consistindo num indicador indireto, também em certos casos, da direção de fraturas e zonas de fraqueza predominantes na massa carbonática.

A bacia hidrográfica do Alto rio Paracatu, corresponde nas suas baixadas (Vão do rio Paracatu) à área de ocorrência de rochas do Subgrupo Paraopeba (PINTO, C.P., et al.1999) que se apresenta ali com (SAPUCAIA JR, M.,1986) intercalações de estratos médios e finos de siltitos e argilitos sílticos com rochas carbonáticas. Essas rochas formam o substrato de camada coluvial e de terraços denominados genericamente de Coberturas Indiferenciadas (Qphi) de idade possivelmente pleistocênica. Aí ocorrem espalhadas depressões do tipo dolina, ativas em alguns casos ou depressões na cobertura detrítica causadas por abatimentos cársticos provavelmente devidos a existência de uma dolina soterrada ou em evolução.

2 Objetivos

O trabalho visa apresentar os resultados já obtidos na busca de uma metodologia que, utilizando técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, auxilie na delimitação de domínios com predominância de rochas carbonáticas mascarados por coberturas indiferenciadas recentes, através da detecção de depressões topográficas de origem cárstica como evidencia indireta de sua ocorrência.

3 Localização e Aspectos Gerais da Área

A área estudada está situada na porção noroeste do estado de Minas Gerais, denominada região de Paracatu. Corresponde a um quadrado de um grau de latitude por um grau de longitude limitado equivalendo a uma extensão de aproximadamente 12000km² (vide fig. 3-1).

A região de Paracatu teve sua ocupação iniciada nos primeiros anos do século XVII, com elementos vindos da Bahia. A região representava o entroncamento de todos os caminhos para as minas de Goiás, os quais ali se fundiam em um só. No ponto de entroncamento, formou-se um povoado, Paracatu, que passou a desenvolver-se mais rapidamente depois da descoberta de ouro nos seus arredores. Daí partiram os povoadores do restante da zona.

O relevo é formado principalmente pelos chapadões de topos aplainados, com altitudes que vão até 1.000 m. A oeste, a parecem pequenas áreas isoladas, como altitudes superiores a 1.000 m, conhecidas regionalmente como "Cristas de Unai". As principais serras da região são a chapada dos Gerais e as serras das Araras, das Almas e da Tiririca. O clima predominante na região é tropical úmido, com duas estações bem marcadas por chuvas de verão. Predomina a vegetação de cerrado. Em algumas áreas acima de 900 m, aparecem os campos e, acompanhando os rios, as matas de galerias. A maior parte da zona pertence à bacia do rio São Francisco e, sendo banhada por seus afluentes Paracatu, Prata, Urucuia.

A atividade econômica predominante é a pecuária mista. Os principais produtos agrícolas da região são milho e feijão. Atualmente, algumas áreas de cerrado vencendo aproveitadas para a outras culturas como arroz e a soja. na pecuária o predomínio é do rebanho bovino, com finalidade mista de (corte e leite), criada de

maneira extensiva. os produtos minerais de maior importância o calcário , o zinco e ouro.

A região possui poucas rodovias asfaltadas: é cortada pela BR-040 (Brasília- Belo Horizonte) e pela BR-365 (Pirapora- Uberlândia).

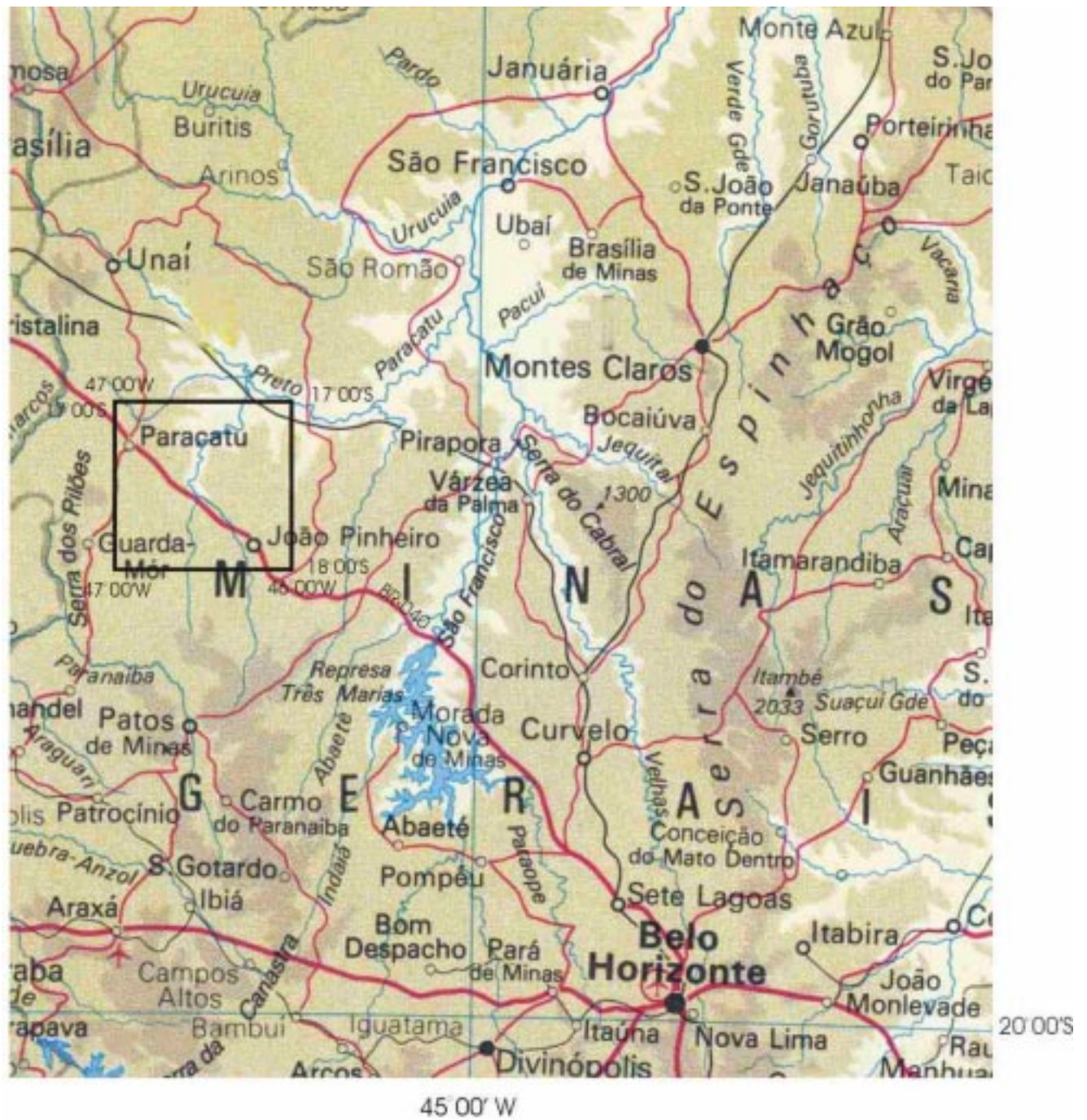


Fig.3-1 Situação e localização da área estudada.

4 Metodologia

A abordagem desse trabalho é voltada para o mapeamento regional através da integração de dados de sensoriamento remoto, cartográficos e bibliográficos sem um controle de campo nesta primeira fase. Visa assim apresentar uma técnica útil como primeira aproximação ou etapa preliminar do mapeamento geológico e geomorfológico regionais na bacia do rio São Francisco. São duas as suas principais vertentes: a primeira contempla uma forma de aperfeiçoar as classificações baseadas na resposta espectral dos objetos e a segunda a conjugação da anterior com a classificação a partir de critérios morfológicos.

A melhoria dos resultados das técnicas de classificação pode ser obtida através da consideração de um maior número de atributos dos objetos (HUTCHINSON, C.F., 1982). Isso pode ser feito tomando em conta os atributos convencionais da imagem, tais como tamanho, forma, padrão e associação de objetos resultando num processo similar ao utilizado por um fotointérprete. Entretanto, esses atributos nem sempre são facilmente obtidos. Atributos dos objetos podem, entretanto, ser obtidos de fontes de dados auxiliares. Os dados auxiliares utilizados para melhorar a classificação de dados digitais Landsat são principalmente baseados em mapas. Como exemplos pode-se citar os mapas geológicos, pedológicos, de vegetação, ou a topografia. RICHARDS, J.A ET AL (1982) citam exemplos de aplicações de sucesso usando dados topográficos como dados auxiliares. No caso em apreço foi utilizada a abordagem denominada estratificação, que consiste na divisão da cena estudada em áreas menores ou estratos utilizando como critério um atributo auxiliar e assim podendo ser tratados independentemente. O processo da estratificação é aplicado antes da classificação espectral. A estratificação contribui para diminuir a massa de dados reduzindo também a variância dos alvos dentro do próprio estrato. Este é o fundamento estatístico para a estratificação (SNEDECOR e COCHRAN, 1967 in HUTCHINSON, C.F., 1982).

A escolha dos dados topográficos como principais dados auxiliares se deveu não somente a sua disponibilidade mas também pela forte correlação entre o relevo atual e a distribuição das coberturas mais novas (cretácicas a recentes) que mascaram as rochas mais antigas do substrato. Para a análise da distribuição altimétrica dessas coberturas foi realizado um estudo baseado no modelo digital de terreno e em perfis

topográficos gerados digitalmente. Como referência foi feita uma comparação preliminar entre os dados das superfícies de aplainamento citadas por KING,L.C.(1956) e os dados por nós tabulados visando estabelecer as correlações entre eles e situá-los a luz dos estudos geomorfológicos mais abrangentes. Também uma questão que consideramos relevante metodologicamente é a tentativa aqui empreendida , através de dados indiretos, de caracterização das feições estudadas como cársticas, pois a mesma é premissa básica do presente trabalho.

O fluxograma apresentado na fig.4-1 mostra a sequencia de procedimentos concebida para detectar as depressões cársticas usando a classificação espectral com métodos auxiliares concatenada com a classificação morfológica quantitativa.

4.1 Materiais Utilizados

Softwares ENVI 3.2, PCI 6.3, MapInfo 5.0, Visio Professional 5, Word 97, Image Tool, Corel Draw 8.0.

Fluxograma das atividades para a classificação espectral e morfológica de depressões cársticas

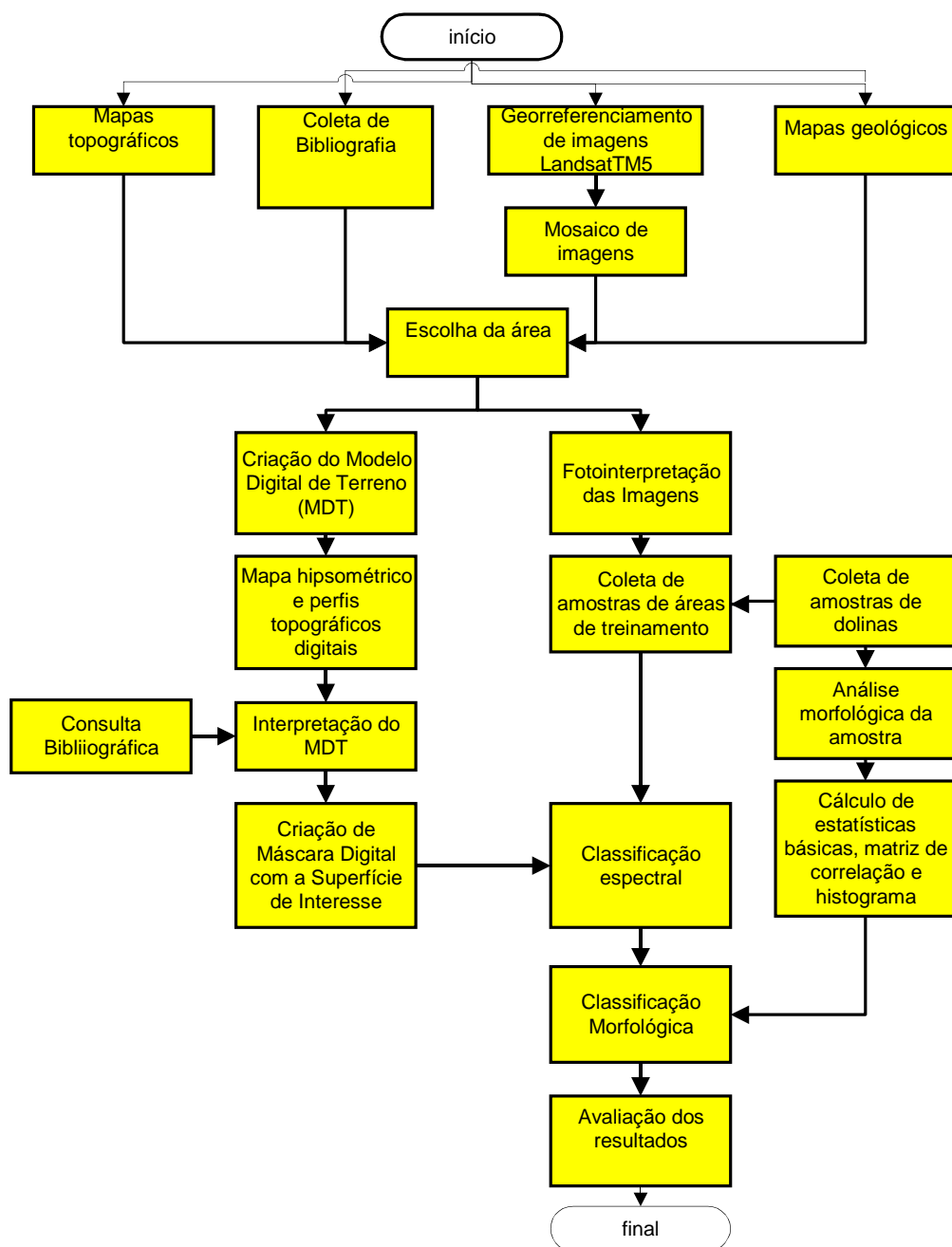


Fig.4-1

5 Geologia

Originalmente sugerido por Rimann (1917,in: DARDENNE,M.A.;2000) o nome Bambuí foi largamente utilizado na literatura geológica brasileira, e aplicado ao sedimentos carbonáticos e pelíticos que pertencem ao Neoproterozóico ocupando todo o lado leste da Faixa de Dobramentos Brasília e cobrindo grandes áreas do Cráton do S. Francisco. A litoestratigrafia originalmente escrita por BRANCO e COSTA (1961,in: DARDENNE,M.A.;2000) foi detalhada com pesquisas desenvolvidas por OLIVEIRA(1967,in: op cit), BRAUN (1968,in:op cit), BARBOSA et al.(1969,1970,in: op cit), SCHÖLL (1973,in: op cit) e DARDENNE(1978, a,b,1979,in: op cit). Presentemente o grupo Bambuí é dividido em seis formações: Jequitaí, Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias. Esta seqüência litoestratigráfica foi reconhecida nos estados de Goiás, Minas Gerais e Bahia. O grupo cobre em inconformidade o embasamento granito-gnáissico, e os metassedimentos dos grupos Araí e Paranoá (DARDENNE,M.A.;2000).

A formação Jequitaí, na base do grupo Bambuí, representa a expressão de um episódio glacial que ocorreu sobre grande parte do cráton do S. Francisco, marcada pela presença de camadas de diamictito contendo seixos de calcário, dolomito, quartzitos, gnaiss e diversos tipos de granitoide em uma matriz que contém carbonatos. O derretimento do gelo no fim desse período glacial deu as condições necessárias para a instalação de um ambiente marinho e o início da deposição de sedimentos pelíticos contendo carbonatos sobre o cráton do S. Francisco (DARDENNE,1978,a,b,in:op cit). esta associação sedimentar, que seguiu a glaciação Jequitaí é representada por três megaciclos regressivos.

Cada um desses megaciclos iniciou com uma rápida transgressão marinha de extensão regional, associada a uma rápida subsidência da bacia como é mostrado pelas camadas marinhas pelíticas de águas profundas que passam para fácies de plataforma rasa e finalmente para estratos de maré e supramaré. da base para o topo, esses megaciclos são os seguintes:

Megaciclo I: sedimentos pelítico-carbonáticos, correspondendo a formação Sete Lagoas, mostrando uma seqüência que vai se tornando grosseira para cima partindo de um calcilutito cinza a negro na base, passando a calcário e dolomito no topo.

Megaciclo II: sedimentos pelítico-carbonáticos, constituindo a formação serra de Santa Helena, essencialmente pelítica, indicando uma generalizada subsidência da bacia, seguida pela Formação Lagoa do Jacaré, consistindo de um calcário cinza escuro depositado em uma plataforma dominada por tempestades e correntes de maré.

Megaciclo III: sedimentos pelítico-arenosos, representado os pela Formação Serra da Saudade, camadas pelíticas depositadas em uma plataforma situada a tal profundidade média que estava periodicamente sujeita a influência de tempestades; e pela Formação Três Marias, consistindo principalmente de arcósios depositados em uma plataforma rasa dominada por correntes de tempestade com fácies de maré e supramaré ocorrendo localmente (CHIAVEGGATTO,1992,in: op cit).

A idade do grupo Bambuí é ainda debatida em função das a ausência de eventos vulcânicos para sua datação. Situa-se no largo intervalo entre 950 até 600 milhões de anos com o fim do ciclo Brasileiro.

Recentemente (SCHOBENHAUS et al, 1984, in PINTO, C.P.1999) reuniram as rochas das Formações Jequitaí, Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade no Subgrupo Paraopeba.

Na área (SAPUCAIA JR, M.,1986) as rochas são assim descritas:

Subgrupo Paraopeba: consta essencialmente de intercalações de estratos médios e finos de siltitos e argilitos silticos com rochas carbonáticas; localmente se associam lâminas lenticulares e bolsões de material orgânico. A pirita limonitizada associa-se às rochas mais argilosas. O siltitos exibem transição lateral e vertical para arenito fino a médio; no topo da seqüência exibem aspecto homogêneo e esfoliação esferoidal típica, e sua delicada estratificação plano-paralela só é perceptível quando a rocha está intemperizada. Apresenta centimétricas estratificações cruzadas de corrente. A pirita limonitizada e o material orgânico ocorrem com menor frequência nesta litologia, onde corpos de rochas carbonáticas também são raros. A fig 5-1 apresenta a distribuição do Gr. Bambuí na Bacia do rio São Francisco.

Ocorrem na área, também coberturas do cretáceo representadas pelo grupo Areado composto pelos conglomerados na formação Abaeté, os folhelhos da Fm. Quiricó, de arenitos da formação Três Barras.

Ocorrem ainda coberturas superficiais recentes assim descritas (Sapucaia, op cit.):

. Coberturas indiferenciadas Terciário-quadernárias: remanescentes mais elevados das antigas superfícies de erosão, distribuem-se areias, cascalho e material

sílticos-argiloso, inconsistente ou parcialmente lateritizado (silcrete e ferricrete) que pode atingir dezenas de metros de espessura.

Coberturas indiferenciadas Quaternárias: essas coberturas têm sua origem e distribuição relacionada à atuação do ciclo Velhas, identificados como terraços nas planícies ou sob a forma coluvial, ocupando encostas suaves. Sob essa forma, torna-se difícil sua separação dos depósitos mais antigos (Terciário-quaternários). Sua maior distribuição é provavelmente pleistocênica dadas as formas fósseis encontradas nas planícies os rios São Francisco, Paracatu e Velhas, contudo, continuaram a se acumular durante o Holoceno.

Do ponto de vista de sensoriamento remoto as coberturas lateríticas são as que têm a maior expressão de assinatura espectral (MATTOS, J.T. e CUNHA, R.P.,1977). A sua classificação espectral (MATTOS, J.T. e CUNHA, R.P.,op cit) serve para corrigir as interpretações do visuais das unidades em seu contato constituindo as unidades chave para mapeamento automático no norte de Minas Gerais. As coberturas cretácicas dão alguns resultados com significado geológico devido a cobertura de solo e vegetação. Já os calcários são classificáveis pelas imagens apenas localmente, sofrendo também pela superposição com as coberturas Terciário-quaternárias. A figura 5-2 mostra a ocorrência das coberturas superficiais na área de interesse para este trabalho.

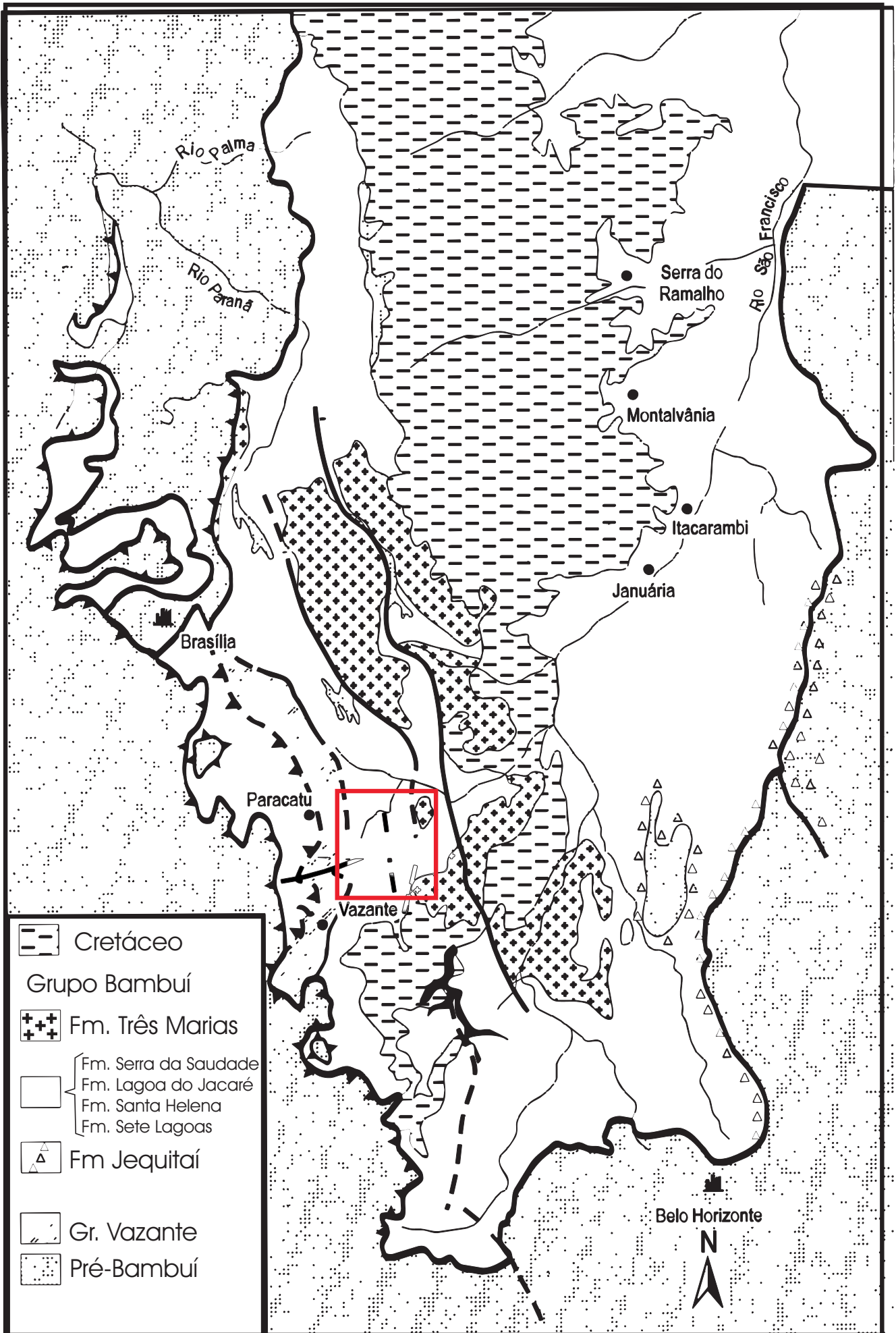
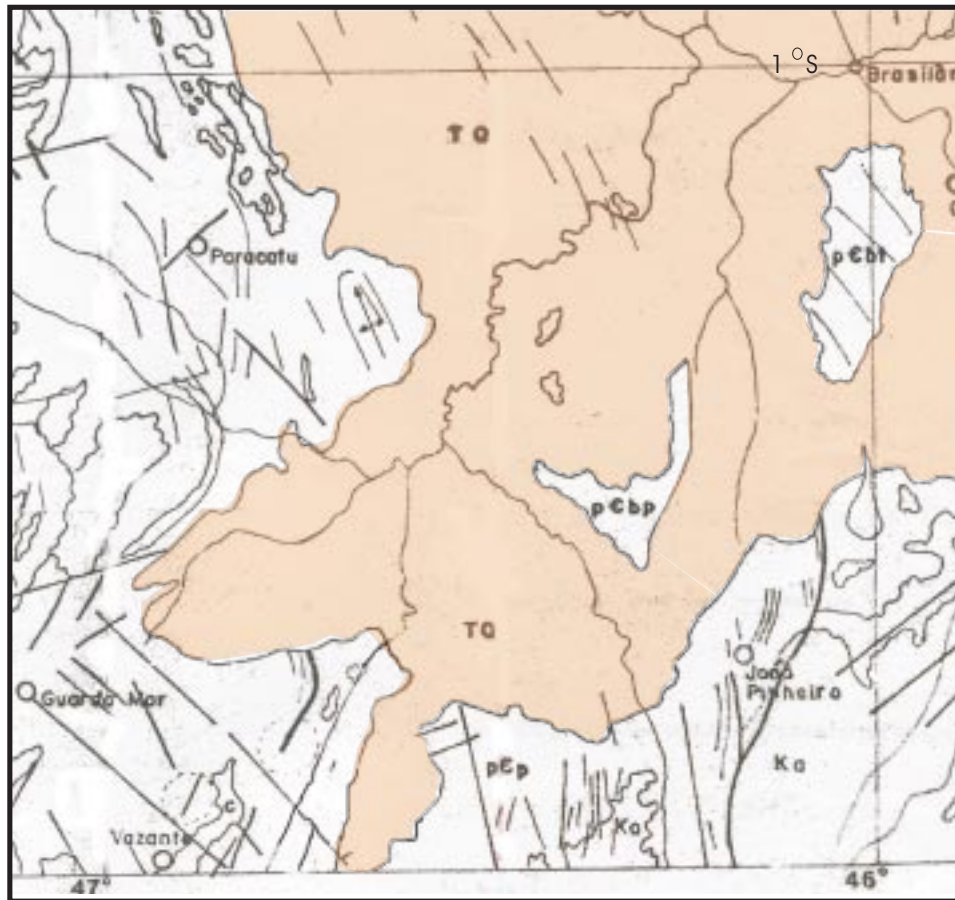
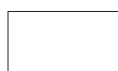


Fig. 5-1 Localização da área estudada sobre esboço geológico (adaptado de Dardenne, in Cordani, U.G. Et al, 2000)



rea de predominância de coberturas Terciário-quaternárias



rea de ocorrência de outras litologias (Grupo Bambuí, Grupo Itaipava)

Fig 5-2 Esboço geológico mostrando a distribuição e tensão das coberturas recentes que mascaram as rochas do Sub-Grupo Paraopeba na área estudada.

(adaptado de Mattos, J.T., Cunha, J.P., 1980)

6 Geomorfologia

6.1 Aspectos Gerais

Para a utilização adequada dos dados topográficos digitais disponíveis é necessária uma melhor compreensão das feições de relevo da área escolhida. A geomorfologia é fundamental para a aplicação correta do modelo digital de terreno como método auxiliar.

Área de estudo pertence a bacia do rio São Francisco. A bacia do São Francisco atravessa os estados de Minas Gerais e Bahia. O curso geral do São Francisco percorre a depressão entre a serra do Espinhaço e os chapadões do Urucuia (Goiás). A região em estudo encontra-se inserida no denominado Planalto Brasileiro, sendo que neste planalto, segundo (AB'SABER, 1968 in MATTOS, J.T., CUNHA, R.P., op cit) são individualizadas duas províncias morfoestruturais: o Planalto Central, representado pela depressão periférica sanfranciscana, e o Planalto Oriental, representado pela serra do Espinhaço e o planalto do Leste. O Planalto Central, que nos interessa imediatamente apresenta um relevo suavizado, resultado da ação de vários ciclos erosionais.

As serras da Aldeia, Tiririca, dos Pilões servem como divisores entre bacias, onde os rios São Marcos e Corumbá a oeste, drenam para o sul integrando-se no sistema da bacia do Paraná, enquanto que os rios Preto e Paracatu, a leste do divisor, integram o sistema da bacia do São Francisco.

A bacia do alto rio Paracatu encontra-se limitada a oeste pelas serra dos Pilões, das Araras, do Canto e a leste pelos altos e chapadas que culminam com o Chapadão dos Gerais.

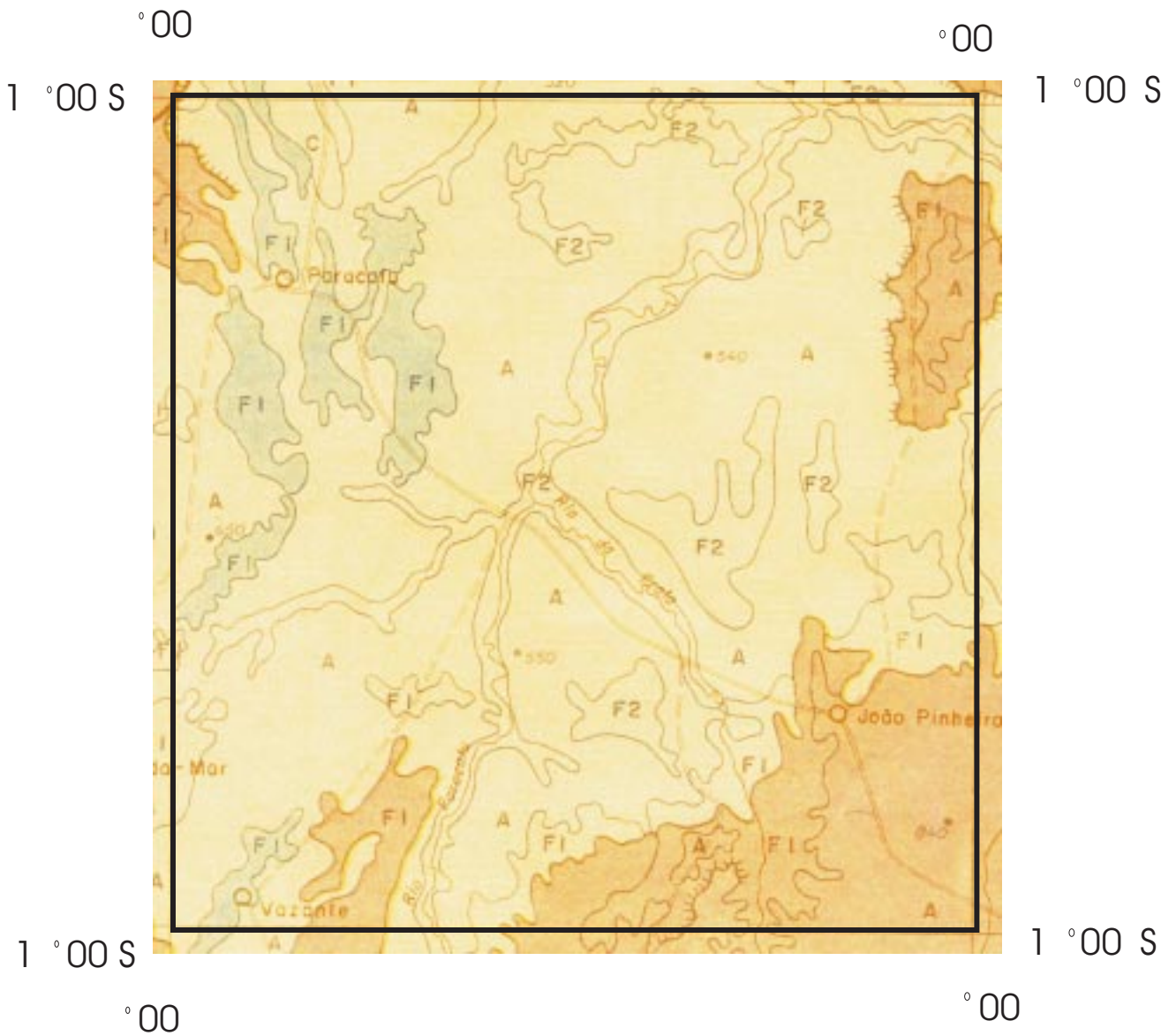
O aplainamento generalizado produzido pelo ciclo sul-americano que se desenvolveu do Cretáceo Superior ao Terciário Médio, considerado (KING, L.C. (op. cit.);BRAUN (1971) in op.cit.), como o mais perfeito e extenso aplainamento no Brasil, nivelou, indistintamente, rochas de diferentes naturezas e foi responsável no pela extensa laterização. Deixou seus remanescentes sob a forma de chapadas, como no topo dos arenitos cretácicos da formação Areado. O entalhamento na superfície Sul-Americana, pelo ciclo de erosão Velhas de KING, L.C. (op.cit), durante o Plio-Pleistoceno, com a destruição da maior parte da sedimentação cretácea, é responsável

pelas dissecações que se observam na bacia do São Francisco, a incisão profunda ao longo do Rio das Velhas e a formação dos depósitos da planície, dos rios São Francisco, Paracatu, Urucuia e Velhas com altitudes variando entre 550 a 700m.

Na Bacia do alto rio Paracatu (CETEC,1982) predominam formas de Aplainamento (vide fig. 6.1-1) nas baixadas com alguns altos onde predominam as formas de dissecação fluvial. Esses domínios serão analisados neste trabalho através dos perfis topográficos e pela visão obtidos através do MDT e avaliados a luz dos trabalhos de geomorfólogos como KING,L.C.(op. cit.) e outros.

De acordo com KING,L.C.(op. cit.) as superfícies e níveis de erosão, encontrados em diferentes altitudes no Brasil Oriental, seriam, essencialmente, resultados do soerguimento da crosta. Enquanto KING,L.C.(op. cit.) concebe uma origem tectônica para as interrupções nos ciclos de aplainamento, BIGARELLA e AB'SABER (1964, in:op cit) acreditam numa ciclicidade baseada, principalmente, nas alternâncias climáticas. KING,L.C.(op. cit.) distinguiu os diversos aplainamentos, segundo suas altitudes escalonadas, os mais baixos sendo considerados os mais recentes e que o conjunto evoluindo como patamares de piemonte (piedmonttreppen). Para BIGARELLA e AB'SABER (1964, in:op cit) as superfícies contemporâneas podem desenvolver-se em alvéolos, as altitudes bastante variadas, evoluindo na dependência direta das soleiras mantidas pela rede de drenagem. Dessa forma, o aparecimento de níveis mais recentes não teria o caráter regressivo (remontante) preconizado por KING,L.C.(op. cit.). Assim sendo , um critério puramente altimétrico torna-se insuficiente para a datação e correlação entre os diferentes níveis de aplainamento. A sucessão vertical nos níveis em relação ao fundo atual dos vales e depressões, forneceria a chave para o reconhecimento da cronologia, possibilitando, outrossim, uma correlação entre níveis encontrados em altitudes absolutas bastante diversas em áreas distintas (BIGARELLA, MOUSINHO e SILVA,1965 in CUNHA,S.B. E GUERRA,A.J.,op.cit.).

Na área correspondente a atual massa continental denominada Placa Sul-Americana, desde o final do Proterozóico até o Ordoviciano Superior (final do Ciclo Brasileiro) consolidou-se o domínio cratônico estável que estabeleceu desde então o arcabouço lito-estrutural brasileiro. Sobre ele, durante o Paleozóico até o Mesozóico desenvolveram-se as bacias epicontinentais intracratônicas cujo ultimo ciclo deposicional ocorreu no Permiano Superior ao Triássico Inferior com sedimentos continentais (red beds) marcando o secamento das bacias e o desaparecimento dos mares do interior do grande continente de Gondwana Ocidental. Essas condições áridas



Formas de relevo

- F1 Formas lineais de dissecação
- F2 Formas fluviais de plainamento e ou Dissecação
- Formas lineais de acumulação

Unidades Geomorfológicas

- Cristas de Unai
- Depressão São Franciscana
- Planalto de São Francisco

Fig. 1-1 Unidades geomorfológicas e formas de relevo na área do Vão do rio Paracatu (adaptado de CETEC (1972))

continuaram durante o Mesozóico e os desertos eólicos dominaram a cena deposicional do Jurássico Superior associada a grandes volumes de material magmático relacionado ao mecanismos que culminaram com a quebra de Gondwana (MILANI,J.M., THOMAZ FILHO,A.;2000). Nesse substrato, considerando sua evolução geomorfológica desde essa época até o recente, KING,L.C.(op. cit.) analisando as formas do relevo estabeleceu duas seqüências alternadas de ciclos de deposição e denudação. A tabela 6.1-1 apresenta os principais ciclos de denudação no Brasil Oriental.

Ciclo Denudacional	Idade
Paraguaçu	Pleistoceno
Velhas	Terciário Superior
Sul-Americano	Terciário Inferior
Post-Gondwana	Cretáceo Superior
Gondwana	Jurássico

Tab.6.1-1 Principais Ciclos Denudacionais (KING,LC;op. cit.)

6.2 Segmentação hipsométrica

Visando usar feições de relevo como um critério auxiliar para restringir a área a ser analisada nas imagens de satélite foi criado um modelo digital de terreno (MDT) baseado nas folhas planialtimétricas em escala 1:100000 do IBGE. O modelo digital georreferenciado possibilitou a criação de forma automática de perfis topográficos transversais e longitudinais ao vale do rio Paracatu (vide fig 6.2-1).

A análise desses perfis, sobrelevados em 30 vezes para ressaltar melhor as quebras de pendente, permitiu detectar superfícies aplainadas, perfis dissecados e terraços aluvionares bem como as superfícies coluvionares incluindo-se a superfície coluvionar que está sendo cortada pelo rio Paracatu e seus afluentes e que mascara atualmente as rochas do substrato. Essa superfície oscila aproximadamente entre 560m a 570m de altitude e pode ter estimada uma espessura mínima de 20 metros. A tabela 6.2-1 sintetiza os dados obtidos nesta análise.

Deve-se observar que a precisão das curvas de nível das folhas topográficas empregadas não permite em geral registrar as depressões cársticas devido ao seu tamanho, de forma que as mesmas não estão presentes no MDT construído, embora, no traçado da drenagem superficial daquelas cartas, tenham sido registrados alguns lagos observados no processo de restituição fotogramétrica original. Baseado na geologia e nas observações do MDT criou-se uma imagem binária com duas classes :as áreas situadas de 570m de altitude para baixo foram classificadas como 1 e áreas acima desse valor classificadas como zero. Essa imagem foi utilizada como máscara cuja finalidade é eliminar das imagens as áreas de maiores altitudes diminuindo a possibilidade de confusão com ruídos espectrais ou morfológicos trazidos por outras litologias ou características do relevo (vide fig 6.2-2).

Denominação	Altitude (m)	Ciclo	Maior extensão cortada pelo perfil (km)	Descrição	Coberturas
Chapada dos Pilões	1000	pós-Gondwana (?)	12	residual ?	"cretáceo superior (séries Bauru e Urucua). Características: podem ser tanto argilosos quanto arenosas. Mais jovens que os assaltos ecos. Assentam sobre a superfície Gondwana ou em vales rasos (post-Gondwana) nela escavados. Leitões e lentes de seixos de quartzo na base, quando nos vales rasos.Ocorrência: planaltos ao norte de São Pedro (São Paulo); divisores a leste e a oeste do alto São Francisco" (KING,J.C.,1956).
Chapada dos Pilões	950	pós-Gondwana	23		idem
Chapadão dos Gerais	875	Sul Americana	16	Sobre a Fm. Areado.Asuperfície sul americana foi esculpida durante um longo período no decorrer do Terciário Inferior . Aparece como chapadas que se elevam sobre sistemas de vales ou planícies onduladas ,produtos da ação de ciclos posteriores.É a superfície fundamental sobre a qual a topografia moderna foi esculpida	
Superfícies dissecadas	800-750	Velhas	70	"O aspecto geral é, assim, o de uma paisagem ondulada, esplendidamente pedimentada, cuja superfície se apresenta dissecada por profundos vales do ciclo seguinte(Paraguaçu). Em alguns lugares o ciclo apresenta duas fases.Não chega a atingir um aplainamento extenso nas cristas truncadas mas é representada por uma incisão de 100 que disseca a chapada mais antiga produzida pelo ciclo sul-americano. Assim acontece no oeste de Minas Gerais e no leste de São Paulo onde a superfície difásica é a característica, apresentando linhas de cristas truncadas e um relevo de aproximadamente 100 m; esta superfície desenvolveu-se principalmente durante o terciário superior."(KING,J.C.,1956).	
Terraço T3	720	Velhas ?			
Terraço T2	640-600	Velhas ?	?		
Terraço colúvio aluvionar T1	560	Plioceno superior.	63	Superfície rebaixada,espessura 50-100m(KING,J.C.,1956)	assentam sobre superfícies do ciclo velhas. Correlacionadas a formação barreiras da Costa leste. Ocorrência: nos vales dos rios Paracatu e São Francisco depósito os mais antigos das cavernas de Minas.(KING,J.C.,1956)
Terraço aluvionar T0	525	recente	42		Aluvião do rio Paracatu,ciclo de dissecação atual

Tab.6.2-1 Superfícies obtidas através do Modelo Digital de Terreno,com associação preliminar à nomenclatura existente

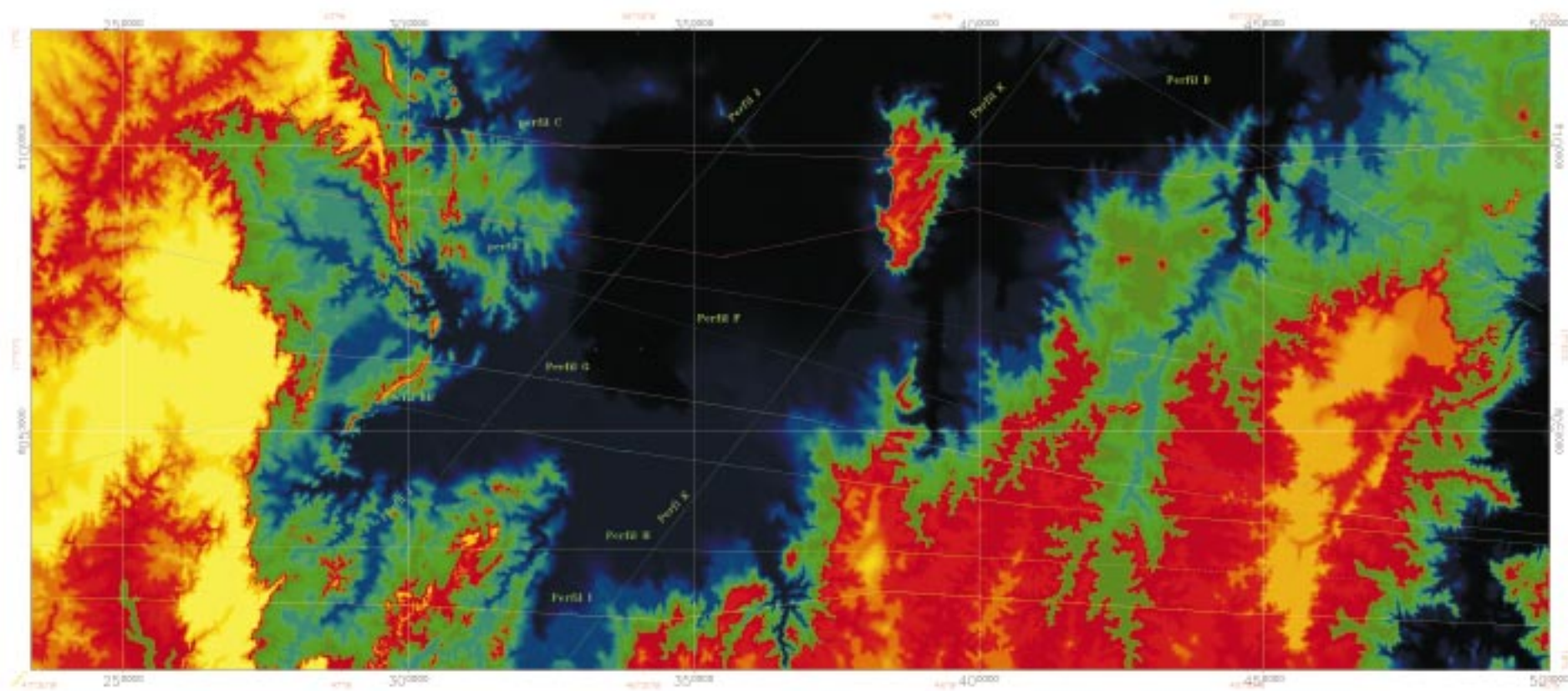


Fig. 2.1 Mapa Hipsométrico baseado no Modelo Digital de Terreno das escalas 1:50.000 a 1:250.000, João Pinheiro (SE-21-V-D) e Paracatu (SE-21-V-C) com o traçado dos perfis topográficos digitais.

(niter alo de 500 a 1000m de altitude, cores mais claras representam as elevações e cores mais escuras as depressões)

Escala 1:50.000

Projeção UTM, datum horizontal Córrego Alegre, uso 2

Fig. 2.1

6.3 Relevo Cárstico

KING,L.C.(op. cit.) cita, por varias vezes, no seu trabalho, a região de João Pinheiro, visitada por ele nas suas expedições científicas e deixa em suas observações a primeira pista de um **relevo cárstico** na depressão do rio Paracatu, que transcrevemos:

*" As areias vermelhas, muitas vezes só parcialmente consolidadas e com leitos de seixos de quartzo, ocorrem em uma enorme área do planalto do ciclo sul-americano em direção ao rio Paracatu e foram assinaladas também a oeste desse rio. A espessura está geralmente entre 50 e 100 m. Vales rasos e **depressões sem drenagem** (grifo nosso) constituem as feições morfológicas comuns à zona arenosa." .*
(KING,L.C.;op. cit.,páginas 35 a 37)

E continua mais adiante levantando hipóteses sobre a origem desse relevo:

*"...Possivelmente, à época em que estas areias foram disseminadas, o clima era mais seco, de modo que os rios diminuíram de volume e disseminaram suas cargas de detritos em fundos de vales mais amplos que os atuais; daí, o material foi carregado pelo vento espalhando sobre as áreas vizinhas enquanto as águas, reduzidas em volume, infiltraram-se, durante as estações secas, nos fundos dos vales entulhados, **passando a correr abaixo da superfície.**"*

O termo carste é utilizado (DREW, D.,1985)para paisagens criadas através dos processos de dissolução. A palavra "karst" é uma versão germanizada da palavra antiga indo-européia "kar" e significa "rochosa" ou "solo pedregoso". As características diagnósticas de um processo de carstificação são as seguintes:

- Falta de uma rede de drenagem superficial;
- desorganização, fragmentação da drenagem;
- feições em pequena e grande escala originadas pela dissolução;
- processos morfológicos e hidrogeológicos subterrâneos;
- presença de uma rocha pura altamente solúvel;
- pluviosidade suficiente para permitir que o processo de dissolução predomine.

Em resumo, a principal característica das paisagens cársticas é que na sua origem está a predominância de apenas um processo que é a dissolução da rocha pela água. De uma forma geral no verdadeiro carste todas as características estão presentes ou são ativas de alguma forma. Uma paisagem plenamente cárstica (holokarst) tem todos os fatores no seu máximo. Áreas que possuem algumas dessas características bem definidas podem não atingir o máximo desenvolvimento devido a imaturidade, a presença de rocha impura, ou a outros fatores impeditivos.

Água é a chave da origem e do desenvolvimento das paisagens cársticas. Nas paisagens cársticas a medida que a água consegue localizar rotas subterrâneas através de sumidouros, a rede de drenagem passa a ser fragmentada, localizada e centrípeta. A rede de drenagem organizada passa a ser subterrânea ao invés de se localizar na superfície do terreno (endokarst).

A grande importância do abastecimento de água na ocupação de paisagens cársticas, torna os estudos do karst bastante práticos, particularmente aqueles sobre a hidrogeologia do carste que tem um sentido bastante aplicado em áreas onde os terrenos cársticos são predominantes.

Para o desenvolvimento das paisagens cársticas em áreas de carbonatos é necessário que essas rochas sejam altamente solúveis e contenham poucas impurezas. A quantidade de impurezas é importante porque uma quantidade significativa de resíduos insolúveis permanece após a dissolução do calcário, e em pouco tempo se colmata a superfície do solo prejudicando severamente o processo de dissolução.

Uma característica da rocha que é tão importante quanto a sua pureza é aquela determinada pelos esforços tectônicos que criam sistemas de juntas ou falhamentos. As zonas de fraqueza nos calcários ocorrem nessas juntas ou nos planos de acamamento. Para que as paisagens cársticas se desenvolvam, algumas partes do terreno tem que ser erodidas mais que as outras. A erosão uniforme ocorrerá se a porosidade primária permitir que água penetre livremente entre os grãos individuais da rocha e o processo de dissolução for difuso e se espalhar igualmente por toda a área de afloramento. Entretanto se o calcário é predominantemente impermeável à água o único modo de entrada da mesma é através das fissuras secundárias tais como as juntas (porosidade secundária), então a dissolução tenderá a se concentrar seletivamente nessas linhas de fraqueza.

Quanto mais antiga a rocha, menor será sua permeabilidade primária e

maior será sua permeabilidade secundária. Esse fenômeno é resultado do aumento da litificação (compressão e cimentação) nas rochas mais velhas e do aumento de probabilidade das mesmas terem sofrido algum esforço tectônico ao longo de sua história causando o fissuramento.

6.3.1 Feições cársticas

As formas cársticas só se desenvolvem na presença de grande pluviosidade. Em um carste maduro as feições predominantes são aquelas cuja função é permitir a entrada de água no calcário e aquelas que descarregam água da rocha (fontes). As formas cársticas se desenvolvem onde ocorre o excesso de chuvas o que por sua vez também propicia o crescimento de um sistema fluvial. Assim, muitas vezes as feições fluviais convivem com as feições cársticas formando o chamado fluviocarste onde existem rios mas com baixa densidade de drenagem. Entre os vários tipos de feições cársticas, na área de João Pinheiro predominam as formas negativas tais como as dolinas e uvalas e sobre as quais nos deteremos um pouco mais.

As dolinas são depressões que se desenvolvem possivelmente (DREW, D., op cit) quando a água da chuva que percorre a superfície do maciço calcário fissurado penetra nas fissuras e acamamentos mais superiores da rocha. Se dentre essas fraturas a água encontram alguma mais aprofundada esta passa a ser o caminho preferencial proporcionando a drenagem do excesso de pluviosidade. No decorrer do processo esta área induzirá na área adjacente a formação de canais que levam à fissura principal. Assim a taxa de erosão da fissura aumentará proporcionalmente. A medida que a área de captação da fissura principal se estende para fora em todas as direções, uma quantidade crescente de água corre para ela e a dissolução do calcário é maior ali que nas áreas circundantes criando um vazio. Nesse estágio o processo de erosão concentrada em uma pequena área pode não ter expressão como feição superficial, particularmente se o carste está recoberto de solo. Eventualmente, entretanto, o solo sofrerá subsidência, de forma imperceptível ou catastrófica, produzido uma declividade na superfície. Uma vez que a superfície do terreno mergulha em direção à depressão, também o fluxo de água contida no solo volta-se em direção ao buraco, aumentando ainda mais a dissolução dessa zona. Nos estágios iniciais, predomina o rebaixamento vertical gerando a forma cônica, mais tarde a medida que o material coluvionar se acumula no fundo da depressão, o fluxo vertical da água torna-se mais difícil e a

dissolução lateral passa a ser mais importante e a dolina passa a se expandir em área assumindo sua forma de bacia.

Se a cobertura de solo tem um certo conteúdo de argila então as partículas finas carregadas para o fundo da dolina podem depositar espessura suficiente para tornar o fundo da depressão impermeável. A depressão pode formar lagos pelo menos uma parte do ano o que significa uma reversão completa de sua função hidrogeológica original.

As dolinas são as feições mais comuns nas regiões cársticas amadurecidas. Podem assumir qualquer forma e tamanho embora sua forma arredondada seja a mais comum. A medida que as depressões fechadas evoluem através do tempo, seu diâmetro também aumenta. Eventualmente o divisor entre duas depressões adjacentes é erodido e uma nova complexa depressão é criada, a mais funda delas capturando a drenagem. O processo pode continuar até que grandes áreas que são criadas pela captura de várias sub-bacias. Essas áreas são denominadas uvalas. Outra estrutura negativa são os poljes, o maior tipo de depressão fechada. Poljes são depressões fechadas de 5 a 500 km quadrados, limitados por paredes íngremes e com seu fundo formado por rochas carbonáticas recoberto por sedimentos aluvionares ou lacustres que podem atingir centenas de metros de espessura. Frequentemente os poljes desenvolvem-se ao longo de zonas de fraturas ou falhamentos

6.3.2 Fotointerpretação e Caracterização do Relevo Cárstico no vale do Alto rio Paracatu

Como já explicitado as avaliações aqui apresentadas são baseadas em dados bibliográficos, na fotointerpretação de imagens e cartas planialtimétricas do IBGE visando a convergência de evidências em torno dos temas em pauta, não tendo havido um controle de campo.

Seriam realmente de origem cárstica as depressões observadas?

As primeiras evidências são observadas na rede de drenagem apresentada nas folhas planialtimétricas IBGE 1:100.000 onde pode-se observar uma certa quantidade de lagoas sem drenagem (vide fig 6.3.2-1).

Outra evidência é a existência de linhas de drenagem truncadas ou depressões à montante comunicando-se com ramos da drenagem como pode se observar também ao sul do rio da Prata e outros pontos no quadrante sudoeste da área próximo a João Pinheiro (fig 6.3.2-1).. Esta situação sugere a existência de alimentação dos cursos d'água através ressurgências cársticas.

As imagens de satélite são mais expressivas nesse caso mostrando com muita clareza as evidências e padrões típicos de relevo cárstico.

A fotointerpretação de caráter expedito visou primeiramente a familiarização do intérprete com os aspectos de uso e ocupação do solo, a geologia e particularmente com o aspecto visual das dolinas. De uma maneira geral foi utilizada a composição colorida R4G5B7 para essa fase. As depressões apresentam-se circulares a alongadas, às vezes em grupos ou alinhadas seguindo direções preferenciais em zonas de fraqueza do substrato (Fig 6.3.2-2). Ocorrem coalescências que variam da associação entre duas ou três depressões até a formação de “polje” resultante da ação de fenômenos cársticos que criaram uma belíssima estrutura alongada, aproximadamente retangular (27,5km x 3,8 km ou 100km²) com direção N45°W (vide fig. 6.3.2-3). Este polje que denominamos polje do rio da Prata tem sua importância aumentada não só pela dimensão que dá aos fenômenos cársticos na área como por ter se desenvolvido por sobre a área de ocorrência de uma grande lineação magnética de dimensão superior a 700km e cuja evidências de campo são difíceis de encontrar. A coincidência de

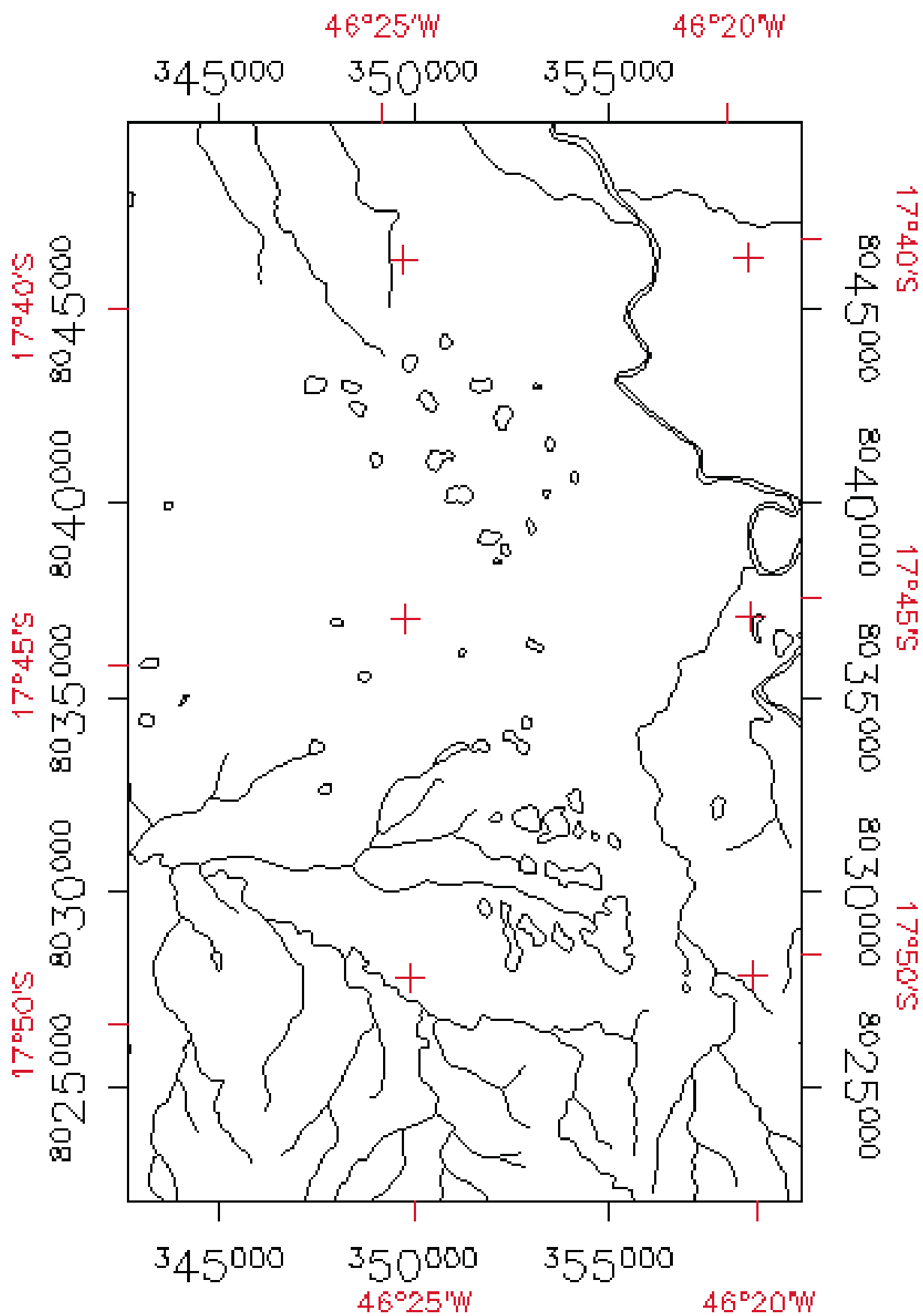


Fig. . .2-1 Feições cársticas em mapa de drenagem (fonte Geominas, BGE)

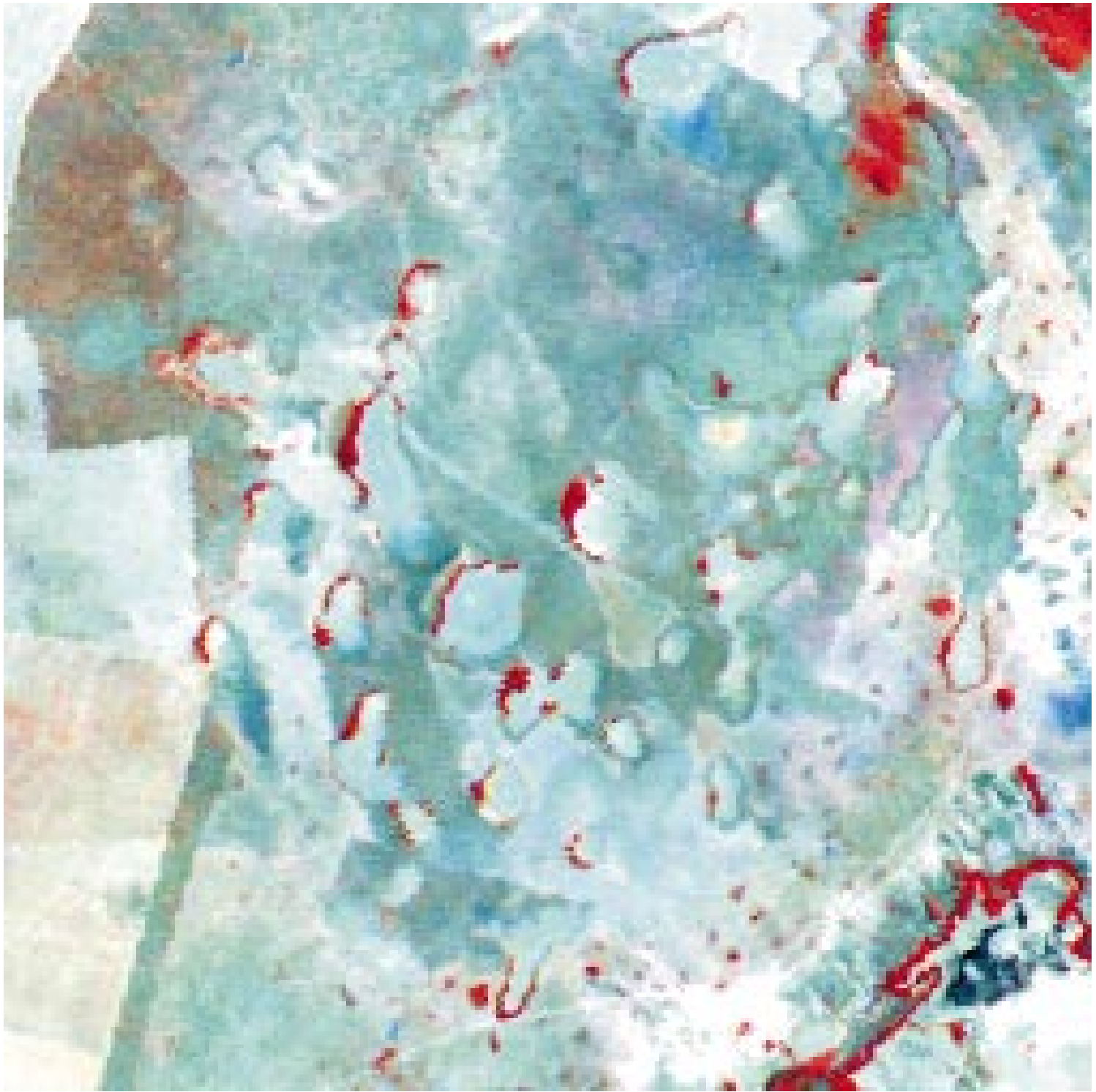


Fig. . .2-2 Dolinas na super ície T1
(composição colorida G5B Landsat Tm5)

localização entre estruturas mostrando a provável relação genética entre elas sugere que esta gigantesca estrutura crustal com expressão magnética ainda possui atividade geológica recente influenciando no desenvolvimento do carste.

O aspecto visual das dolinas é variável com a sua região central mais clara ou mais escura que as bordas. Na borda externa apresentam também, eventualmente, um anel de vegetação. Ocorrem também dolinas formando lagos e outras que são pouco conspícuas e de difícil reconhecimento. Aparentemente ocorrem outras feições nas imagens de satélite que podem ser confundidas com dolinas tanto do ponto de vista espectral (solos e/ou coberturas vegetais?) quanto morfológico (pivôs de irrigação, cercados e clareiras)

Os carstes tropicais (SALOMON,J. 1997) caracterizam-se por precipitações anuais superiores a 1000mm. A precipitação média anual na região é de 1400mm (SEAPA,1996) , portanto suficiente para desenvolvimento do carste atualmente. Se considerarmos os pré-requisitos morfológicos acima citados para a denominação de uma paisagem como cárstica e considerando adicionalmente que as condições de pluviosidade atuais tem permanecido desde um passado geologicamente pouco remoto e são favoráveis ao seu desenvolvimento teríamos um relevo cárstico ainda em desenvolvimento nessa região. Teríamos, mais precisamente, um relevo fluviocárstico (DREW,D.op cit) pela coexistência de drenagem superficial com estruturas cársticas. Deve-se observar ainda que o relevo cárstico onde ocorrem só feições negativas é considerado o tipo mais desenvolvido dessa paisagem.

Outro aspecto a ser observado é que esta superfície da cobertura que constitui o nível T1, e na qual ocorrem as depressões cársticas, apresenta uma cobertura detrítica que pode ser associada àquela que foi denominada Superfície Rebaixada de Lagoa Santa-Sete Lagoas (CÉSAR, F.M ET AL,1994) de idade pleistocênica. Da mesma forma que naquela área essa cobertura mascara as feições cársticas atingindo às vezes dezenas de metros de espessura de um sedimento silte-argiloso .

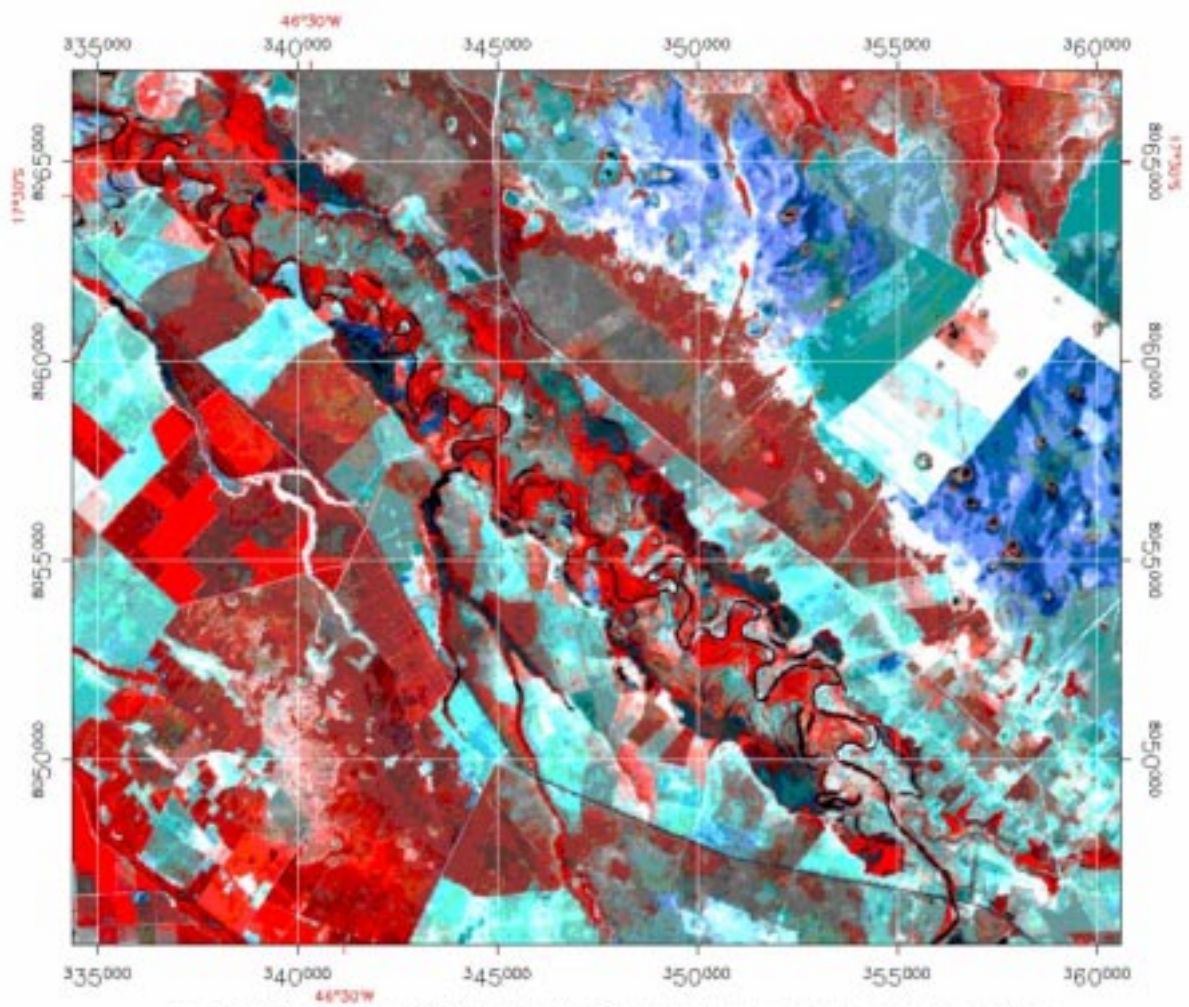


Fig.6.3.2-3 Imagem R4G5Bt (Landsat Tm 5) apresentando várias depressões cársticas incluindo o polje do rio da Prata

7 Classificação espectral das superfícies associadas as dolinas

A classificação automática de imagens multiespectrais de sensoriamento remoto consiste em associar a cada pixel da imagem uma etiqueta descrevendo um objeto real. Os valores numéricos associados a cada pixel, definidos pela reflectância dos materiais que compõem este pixel, são identificados em termos de tipos de coberturas (mata, pasto sujo, água, rocha, etc.), chamados então de temas, da superfície terrestre imageada. A classificação de todos os pixels de uma imagem em temas, mostrando a distribuição geográfica destes temas ou classes é um mapa temático (CROSTA, A.P.,1992).

As várias bandas de uma cena com os respectivos valores de cinza associados a cada banda definem um espaço multidimensional de atributos passível de caracterizar e separar objetos de acordo com as suas reflectâncias. Quanto maior o número de bandas maior é a capacidade de discriminação. Na prática, através de uma amostragem representativa, como é o caso de uma classificação supervisionada, obtém-se em cada banda um intervalo de valores de cinza (DN) que representa as intensidades dos pixels do material superficial em questão. No caso de uma análise multiespectral os intervalos relativos ao mesmo material das diversas bandas definirão um volume ou nuvem (“clusters”) de alta concentração de pixels no espaço de atributos. Esses volumes, conhecidos por classes, são definidos para cada tipo de material ou mistura de tipos de materiais superficiais.

Neste trabalho foram inicialmente aplicadas algumas técnicas de classificação visando estabelecer aquela que fornecesse os melhores resultados dentro das técnicas de classificação denominadas supervisionadas. Esse tipo de classificação exige que o usuário conheça antecipadamente algumas características da área ou objetos a serem classificados, ou seja, a verdade terrestre. A classificação supervisionada identifica alguns pixels pertencentes às classes desejadas e deixa ao computador a tarefa de localizar todos demais pixels pertencentes às mesmas, baseado em alguma regra estatística pré-estabelecida. Foram experimentadas tentativamente algumas dessas técnicas de classificação como os métodos do paralelepípedo, distância mínima e máxima-verossimilhança (CROSTA,A.P.;op.cit). Em função dos resultados preliminares selecionou-se a técnica da máxima-verossimilhança para a execução da etapa de classificação multiespectral.

A técnica da máxima verossimilhança (MaxVer) consiste na classificação dos píxeis utilizando parâmetros estatísticos. Na realidade as amostras obtidas nas chamadas áreas de treinamento (áreas cujo tipo de cobertura é conhecida) são utilizadas para o ajuste de um função de densidade de probabilidade para cada classe baseada na suposição que a mesma é normal ou Gaussiana. A partir desse ajuste é possível quantificar a probabilidade de um pixel pertencer a uma determinada classe atribuindo-o à classe mais provável. Dessa forma é possível classificar todos os píxeis da cena. O método MaxVer apresenta também o conceito de limite de decisão entre classes contíguas ou seja a superfície no espaço multidimensional que passa pelos pontos onde a probabilidade de um píxel pertencer a classes contíguas é igual. Para o melhor desempenho dessa técnica é necessário que se tenha amostras grandes e representativas das classes nas áreas de treinamento escolhidas

Para a classificação espectral utilizando-se as seis bandas ds imagens LandsatTM5 foi inicialmente considerada a área toda sem a máscara hipsométrica. Foram coletadas amostras para treinamento em 14 classes iniciais preestabelecidas por observação:

- dolina com fundo vegetado,
- dolina com lago central,
- áreas de ocorrência de pelitos,
- áreas de cobertura detrítica,
- mata ciliar em rio e vereda,
- agricultura em pivô central,
- sombra das elevações topográficas e encostas,
- água/lago de barragem,
- área urbana,
- agricultura extensiva,
- pasto (vegetação rala),
- pasto sujo,
- áreas de queimada,
- solo exposto (arado ou degradado).

A análise por inspeção dos resultados obtidos nessa classificação utilizando o método MaxVer demonstrou que essa abordagem não discriminou bem as superfícies das dolinas devido possivelmente ao ruído causado pelas amplas variações associadas

ao relêvo (sombra, vegetação) e ao substrato rochoso (dolomitos, pelitos, dolarenitos, arenitos). Após a aplicação da máscara hipsométrica foi feita nova classificação utilizando um número mais reduzido de classes. Em função da eliminação do ruído causado pela área externa da máscara e considerando os resultados da classificação anterior foi possível reagrupar e simplificar as classes utilizando-se um número reduzido de temas de maior representatividade dentro da janela hipsométrica: dolina, agricultura, solo semi-exposto, pasto sujo, solo exposto e área de queimada. Dessa vez os resultados foram promissores havendo entretanto ainda confusão principalmente com certas áreas vegetadas e de solo semi-exposto (vide fig 7-1). A esta confusão pode ser atribuída ao fato que o fundo das dolinas provavelmente é composto do mesmo tipo de solo originado das coberturas detríticas amplamente disseminadas na área e a vegetação do fundo das dolinas quando ocorre deve ser formada das mesmas espécies vegetais comuns na região.

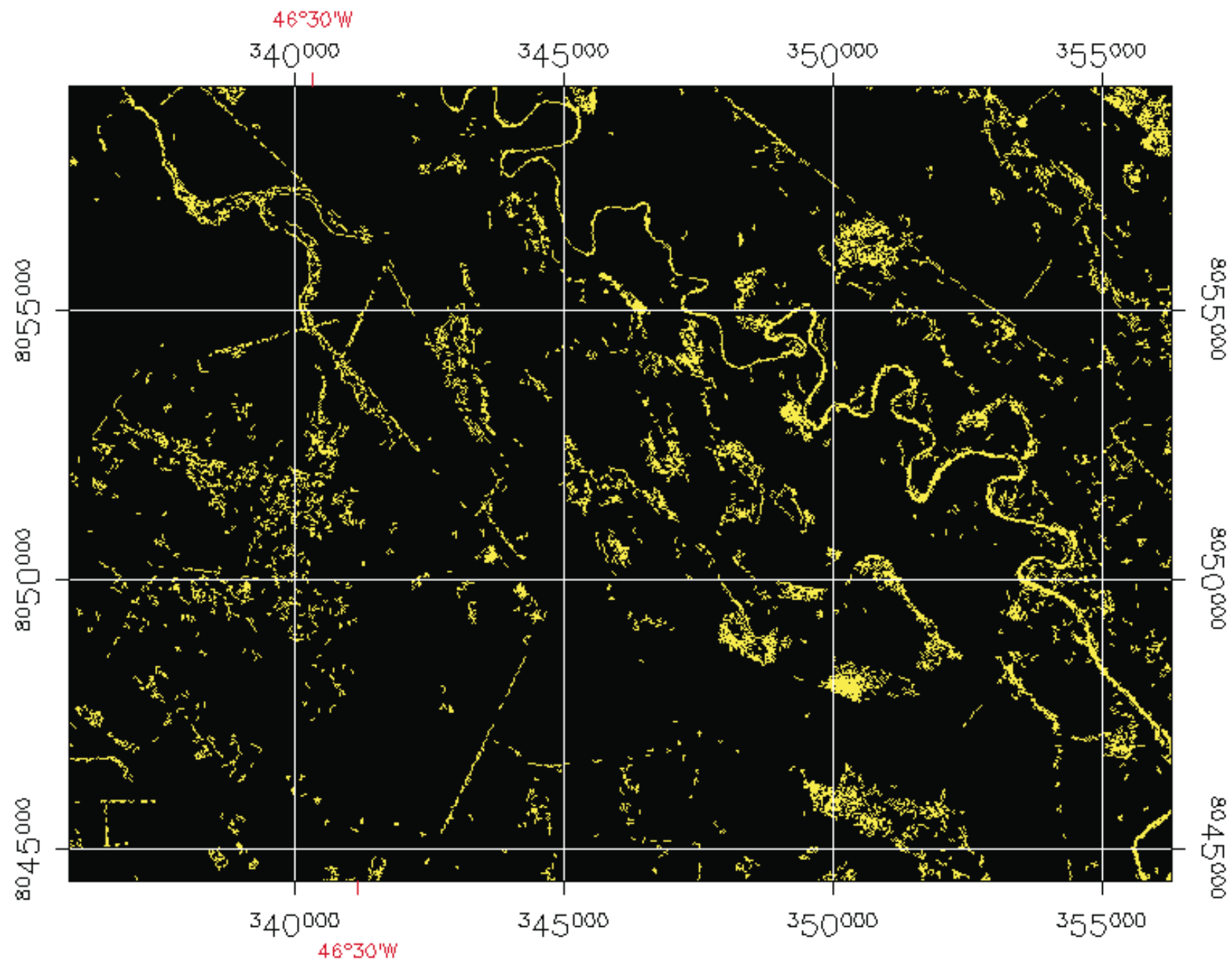


Fig. -1 resultado da classificação temática utilizando seis bandas espectrais (Landsat TM5 b1,2, , ,5,)

8 Caracterização morfológica quantitativa das superfícies das dolinas

Para a avaliação da geometria das superfícies foi escolhida uma amostra de 470 indivíduos cujos contornos foram digitalizados manualmente, com auxílio do mouse do computador, criando-se arquivo vetorial diretamente sobre as imagens. Os dados obtidos para cada dolina na forma de polígonos fechados foram analisados quanto aos parâmetros geométricos seguintes : área, alongação, arredondamento, considerados os mais significativos para o problema. O parâmetro alongação consiste na razão entre os eixo maior e menor dos polígonos. O arredondamento foi calculado pela seguinte relação: $((4 \cdot \pi \cdot \text{ÁREA}) / \text{PERÍMETRO}^2)$ (BAXE, G.A., 1984, pg.157). As estatísticas básicas são apresentadas na tabela 8-1. A figura 8-1 mostra o histograma de frequências do parâmetro Área. Esta amostra serviu para caracterizar geometricamente as superfícies

das dolinas das áreas bem como poderá servir como amostra para medir o índice de acerto das classificações.

	Num.Dados Válidos	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Mediana
ÁREA (ha)	470	14.28	1.35	75.87	10.72	117.50
ELONGAÇÃO	470	1.68	1	4.9	0.54	1.55
ARREDONDAMENTO	470	0.78	0.29	1	0.16	.81

Tab.8-1 Estatísticas básicas da amostra de dolinas

Para a escolha dos parâmetros utilizados para classificação morfológica foi calculada também a matriz de correlações entre os mesmos, visando estabelecer possíveis dependências.

	ÁREA(ha)	ELONGAÇÃO	ARREDONDAMENTO
ÁREA (ha)	1	0,23	-0,50
ELONGAÇÃO	0,23	1	-0,68
ARREDONDAMENTO	-0,50	-0,68	1

Tab 8-2 Matriz de correlações.

Par metro rea

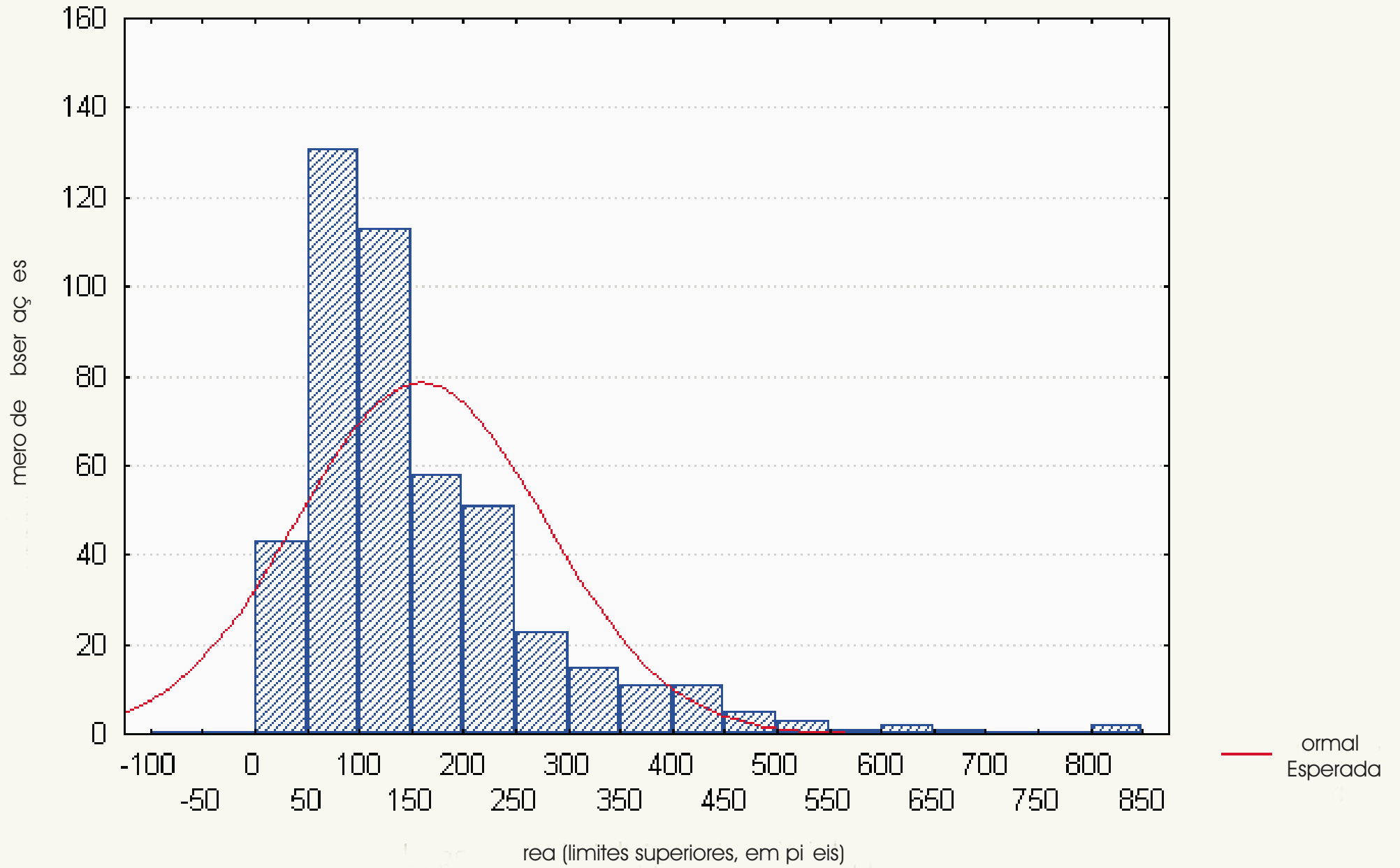


Fig. -1 Histograma de 0 amostras de dolinas na área do ale do lto rio Paracatu.

Devido as significantes correlações entre Área x Arredondamento (-0,50) e Elongação x Arredondamento (-0,68) o parâmetro Arredondamento foi descartado, restando os parâmetros Área e Elongação que são pouco correlacionados. Dessa forma elimina-se a redundância entre os parâmetros medidos simplificando o processamento. No caso do par Elongação x Arredondamento é claro que quanto mais alongado o objeto mais distante de uma circunferência será sua forma. Quanto ao par Área x Arredondamento observou-se nos resultado que as maiores áreas classificadas são partes de meandros de rios classificados erradamente como dolinas na etapa de classificação multiespectral. Esses meandros são evidentemente bastante alongados gerando este alto índice de correlação negativa ou inversa (-0,68).

9 Classificação morfológica das dolinas

Previamente à classificação morfológica dos objetos candidatos à dolinas foi feita a eliminação do ruído causado pela presença de pixels isolados ou buracos nos objetos maiores através da aplicação alternada de filtros de dilatação/erosão e finalmente um filtro de média (GONZALES, R.C., WOODS, R.E.,2000).

Visando eliminar imediatamente as grandes áreas relacionadas com a ocupações agrícolas detectadas na classificação espectral, bem como longos trechos alongados relacionados aos cursos d'água e suas matas ciliares optou-se por selecionar inicialmente os objetos candidatos a dolina que estivessem na faixa delimitada pela média aritmética mais ou menos um desvio padrão na área ou seja 4 a 25 hectares aproximadamente

Após essa classificação morfológica quantitativa por área a imagem resultante foi classificada aplicando-se o mesmo critério para a variável Elongação utilizando-se a faixa 1,14 a 2,22. Esse critério não funcionou bem eliminando muitos candidatos que reconhecidamente foram classificados como dolinas na fotointerpretação convencional. Optou-se então por um critério alternativo de aceitação dos candidatos no intervalo 0,6 a 5,0 equivalente à média da elongação subtraída de dois desvios padrão (-2σ) para o limite inferior e 5,0, equivalente a maior Elongação encontrada na amostra, como limite superior

10 Resultados Obtidos

Para uma melhor apreciação dos resultados obtidos foram selecionadas cinco áreas de aproximadamente 100km² denominadas A, B, C, D, E (vide figura 10-1 com sua localização) como exemplo.

Área A: (vide figura 10-2) A área tem seu centro nas coordenadas 46 12' 28" W e 17 08 20" S. Apresenta um conjunto bem desenvolvido de dolinas que se destaca pela sua concentração e desenvolvimento. Corresponde talvez ao conjunto de feições cársticas mais bem desenvolvido da área. Nesse caso a classificação espectral seguida de filtragem apresentou muito bons resultados. Observa-se na figura 10-2b que praticamente todas as dolinas foram classificadas nessa fase. Entretanto, algumas das dolinas detectadas apresentam-se de forma fragmentada que não pode ser revertida pela filtragem aplicada. A classificação morfológica quantitativa do parâmetro área mostrou-se nesse caso eficiente embora devido à fragmentação citada tenha eliminado algumas dolinas verdadeiras. É interessante observar que a uma dolina bem caracterizada no centro da imagem foi eliminada por ter área superior aos limites de corte propostos. Em compensação muitas das áreas indesejáveis foram realmente descartadas (figura 10-2C e D). A classificação baseada no parâmetro alongação não excluiu qualquer objeto selecionado pela fase anterior.

Área B: (vide figura 10-3).As coordenadas dos centro dessa amostra são 46 35'34"W e 17 25'30" S. a mostra apresenta algumas particularidades interessantes ou morte apresenta cobertura vegetal associada à agricultura e as veredas. Observa-se que o recorte das propriedades agrícolas a noroeste apresenta resposta nessa composição colorida semelhante ao fundo das dolinas. A sudeste e leste ocorre meandros e matas ciliares associadas bastante desenvolvidas. A classificação espectral selecionou com bastante precisão as principais dolinas. O resultado da filtragem preliminar ainda reforçou alguns objetos candidatos. Nota-se que também foram classificados alguns meandros e curvas do rio(fig10-3b). A classificação quantitativa por área eliminou com facilidade o meandro maior a sudeste(fig10-3 C a D). E finalmente a classificação por alongação eliminou o meandro restante preservando um conjunto alongado de depressões a noroeste da área amostral.

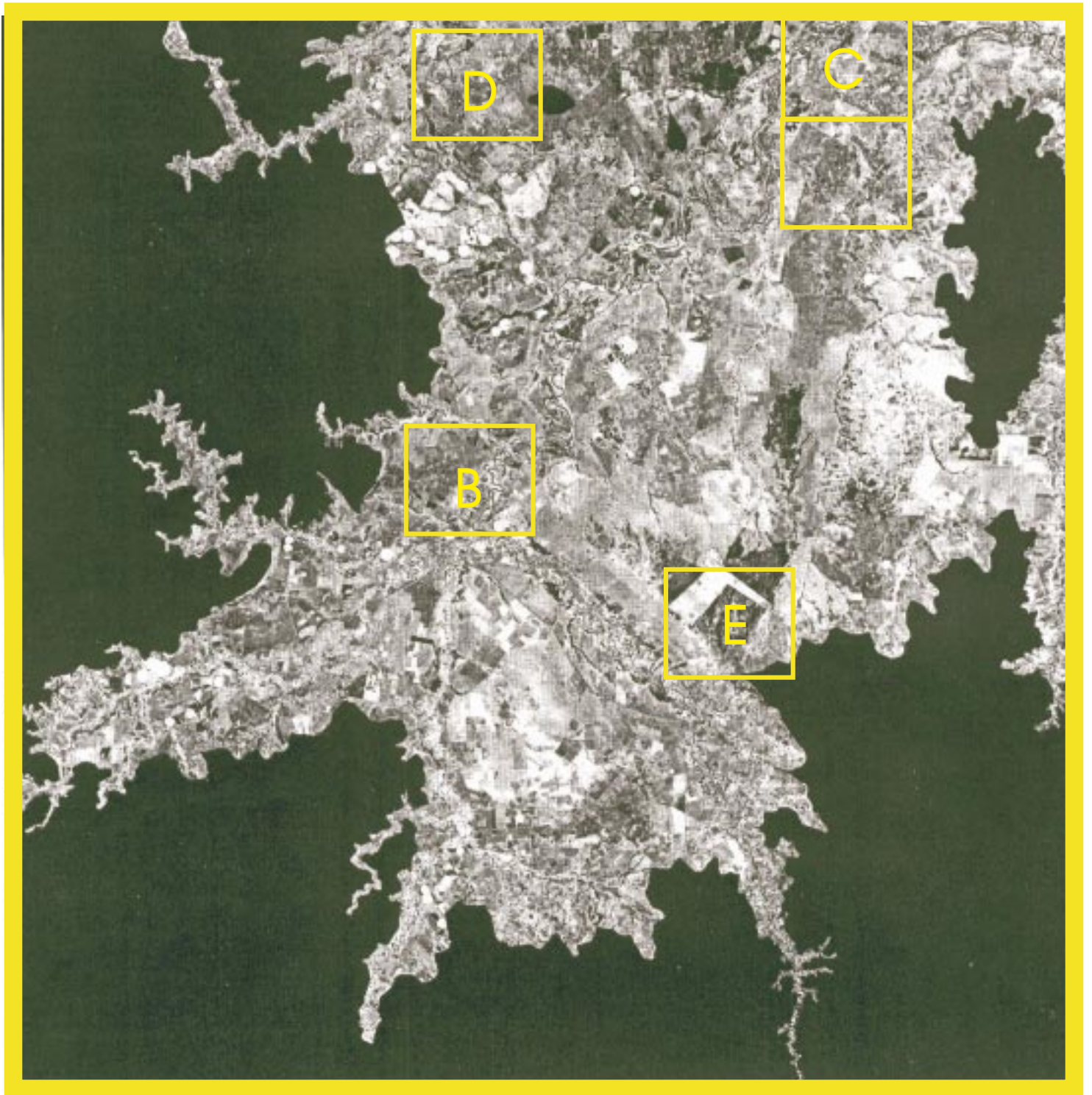


Fig. 10-1 Localização das áreas e emprego de classificação temática espectral e morfológica.

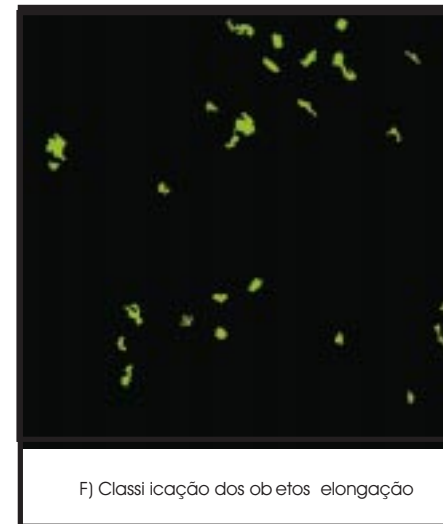
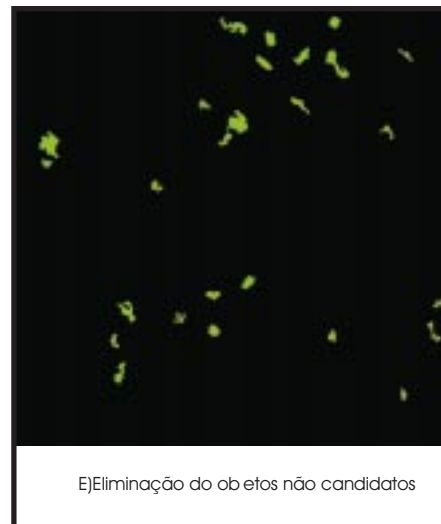
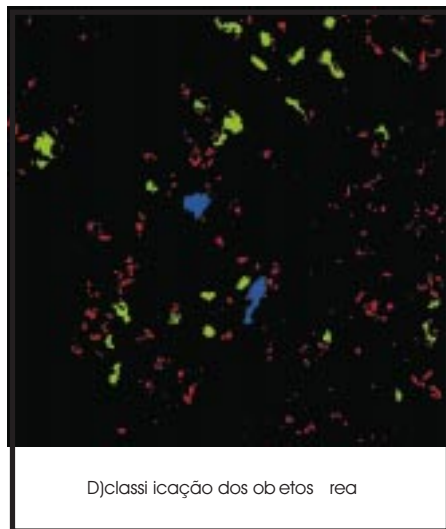
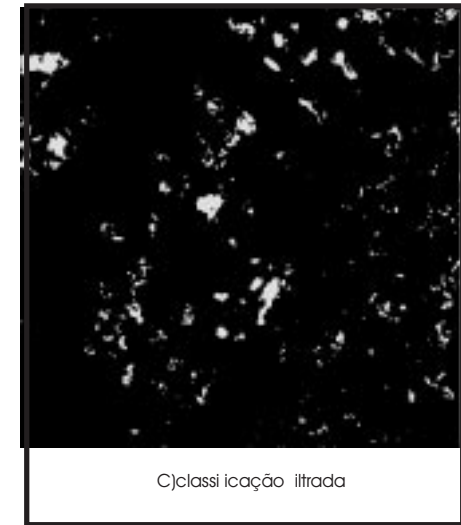
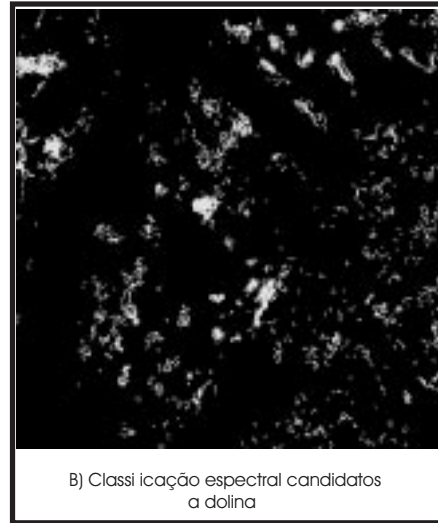
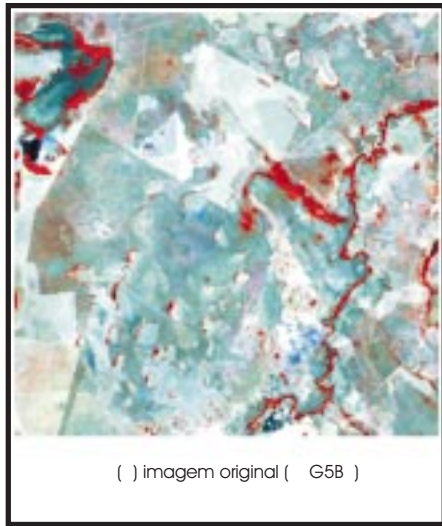


Fig.10-2 Ilustração do processo de detecção de objetos candidatos a dolina na área

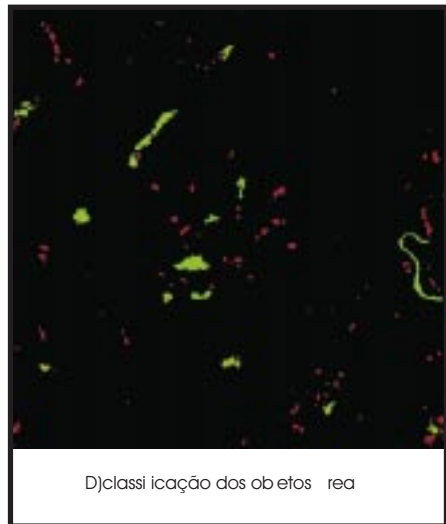
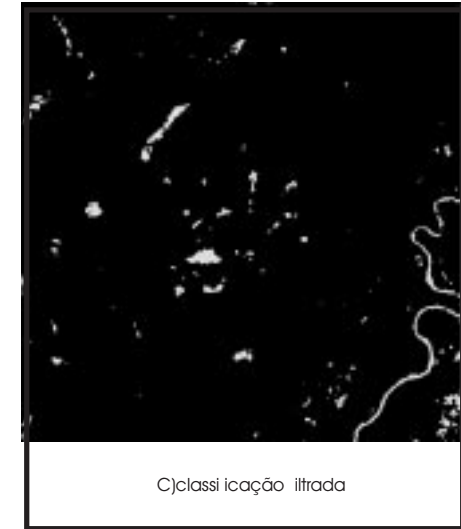
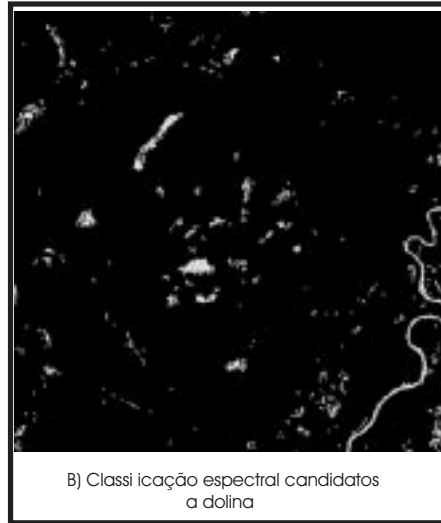
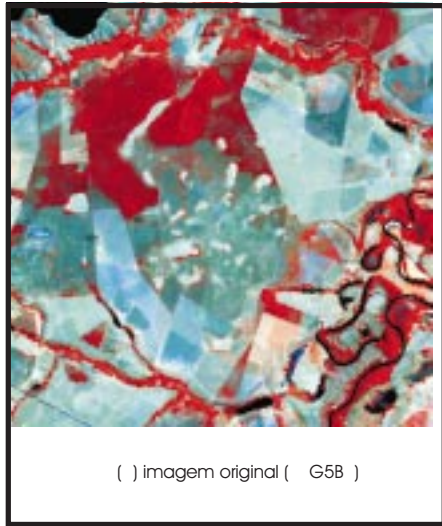


Fig.10- Ilustração do processo de detecção de objetos candidatos a dolina na área B

Área C: (vide figura 10-4). O centro dessa área tem as coordenadas geográficas $46^{\circ} 11'55''W$ e $17^{\circ} 04' 57''S$. A área apresenta-se com intensa ocupação agro-pastoril. As dolinas que ocorrem no centro da área apresentam interferências com estradas e pastagens ora apresentando uma aureóla de vegetação ora apresentando uma borda degradada. Novamente a classificação espectral apresentou resultados satisfatórios selecionando principalmente as dolinas de maior porte com nitidez(fig10-4A a B). Nesse caso os dois tipos de classificação morfológica e utilizados não conseguiram eliminar alguns meandros de rios a noroeste mas resultaram em uma nítida imagem das dolinas classificadas mostrando inclusive algum controle de geológico e estrutural na direção noroeste.

Área D:(vide figura 10-5). A área em apreço com coordenadas centrais $46^{\circ} 32' 9'' W$ e $17^{\circ} 4' 32'' S$, foi escolhida por apresentar feições do tipo dolina menos desenvolvidas crer que em outras áreas ao mesmo tempo que apresenta intensa ocupação agro-pastoril caracterizando um comportamento talvez característico das regiões mais próximas das encostas que cercam o vale do Rio Paracatu. Essa amostra obteve um resultado positivo selecionando uma ou outra pequena feição de difícil reconhecimento mesmo pela observação direta da imagem.

Área E:(vide figura 10-6). Localizada junto ao polje do Rio da Prata tem as coordenadas geográficas $46^{\circ} 21' 19''W$ e $17^{\circ} 34' 39'' S$. Caracteriza-se pela presença de grande quantidade de mata ciliar, grande controle estrutural evidenciado pelo alinhamento das dolinas e pela presença de uma área onde possivelmente foi realizada uma queimada que resultou na alteração das propriedades espectrais do fundo das dolinas. A classificação espectral comportou se bem que selecionando muitas das depressões cársticas. Selecionou também uma grande área agrícola que foi eliminada pela classificação morfológica pelo parâmetro área. Finalmente a classificação por alongação reduziu bastante a presença do meandros expondo as feições alinhadas segundo a direção noroeste.

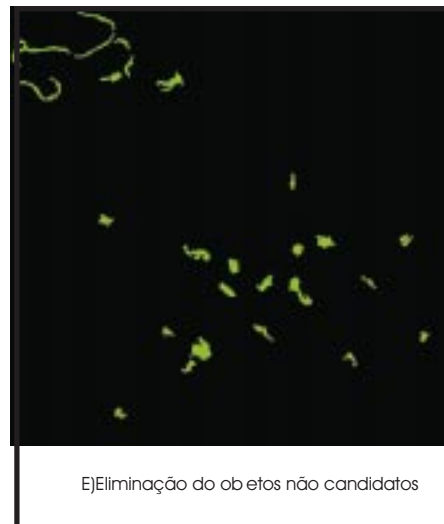
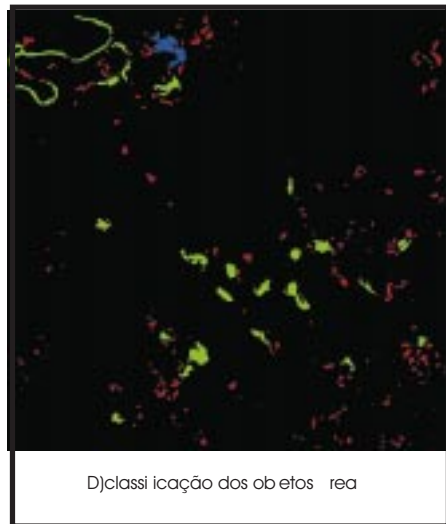
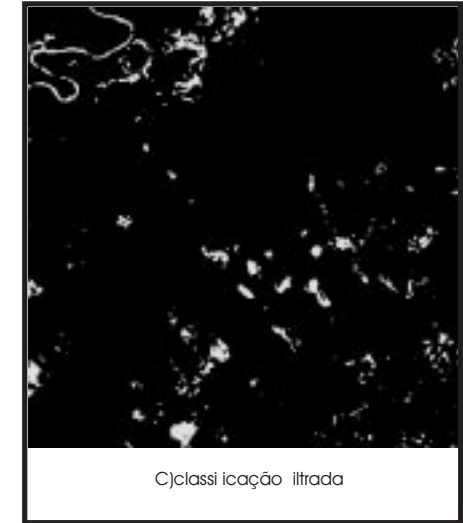
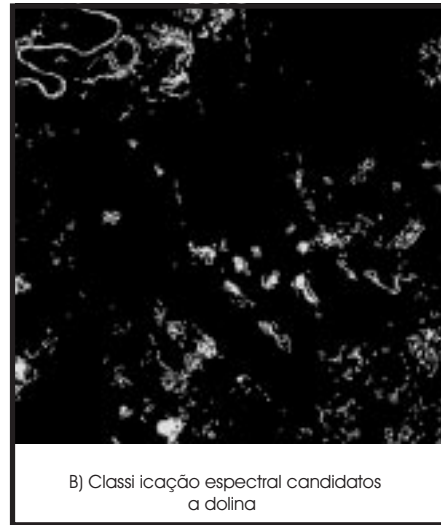
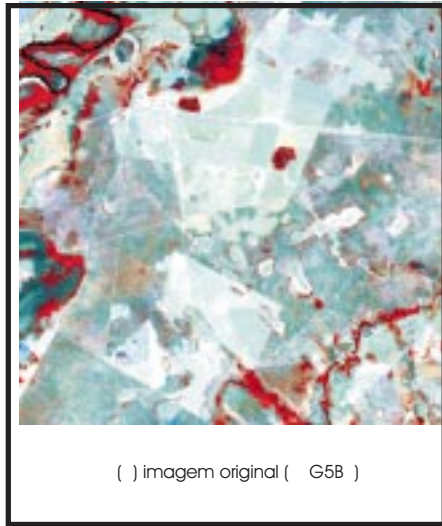


Fig.10- Ilustração do processo de detecção de objetos candidatos a dolina na área C

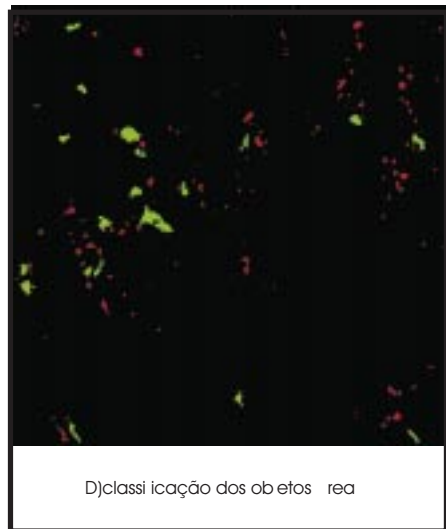
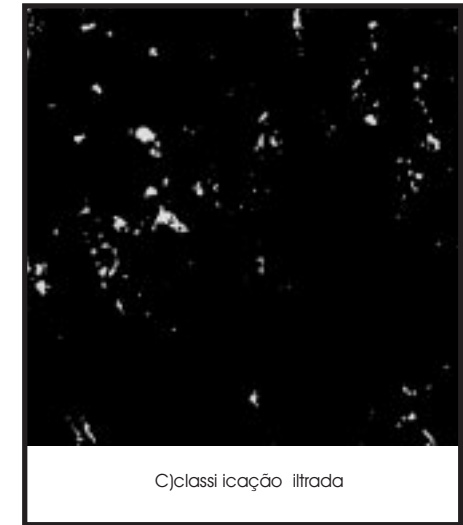
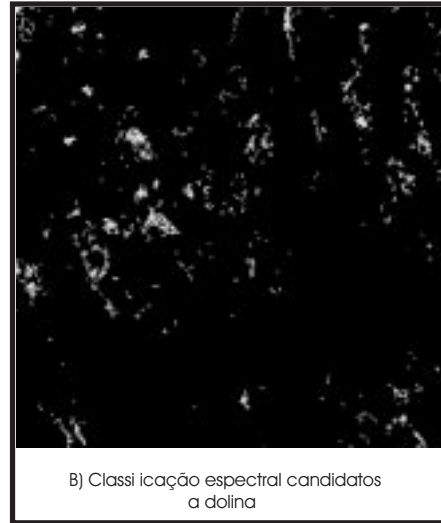


Fig.10-5 Ilustração do processo de detecção de objetos candidatos dolina na área D

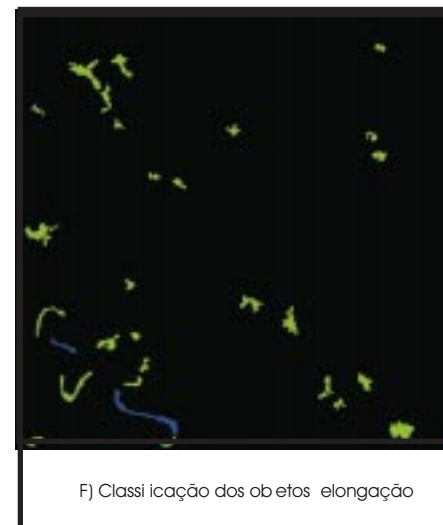
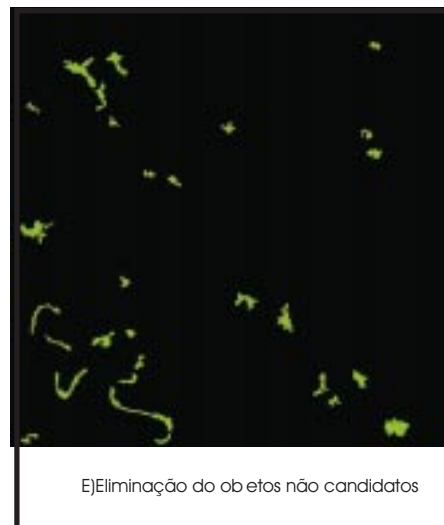
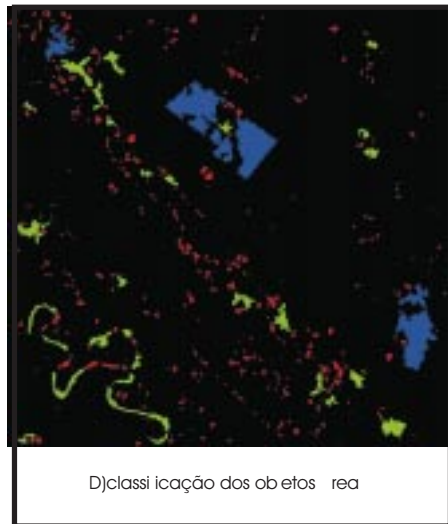
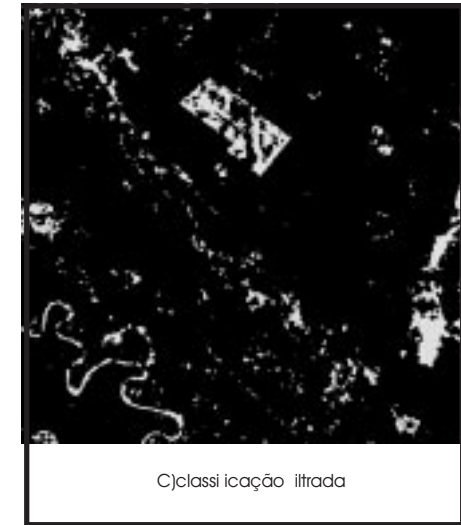
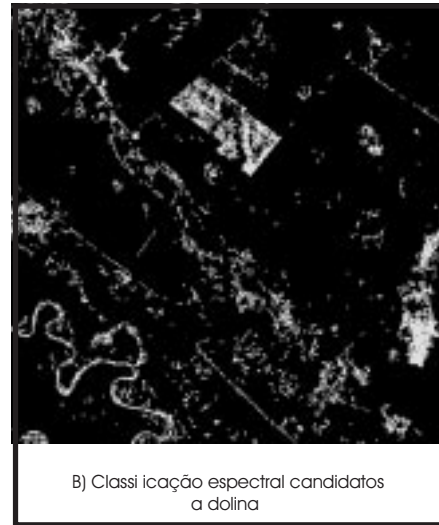


Fig.10- Ilustração do processo de detecção de objetos candidatos a dolina na área E

Os resultados obtidos neste trabalho podem ser analisados pelo menos por dois pontos de maior interesse. O primeiro refere-se a potencialidade dos modelos digitais de terreno no estudo tanto das questões geomorfológicas quanto da análise processos geológicos modeladores do relevo. Neste caso foram criados mais de 3.000 km lineares de perfis topográficos ao longo de duas folhas em escala 1:250000 de forma relativamente menos custosa do que seria o trabalho manual através da medida diretamente das folhas topográficas impressas em papel. Essa facilidade permitiu verificar com bastante precisão as principais feições geomorfológicas existentes. A análise do modelo digital de terreno associada a interpretação convencional das imagens de satélite permitiu a identificação de feições cársticas de porte como o polje do Rio da Prata cuja importância geológica deverá ser determinada em estudos posteriores. De qualquer forma é necessário reconhecer de antemão que uma feição cárstica de 100 quilômetros quadrados associada a um lineamento magnético de centenas de quilômetros levanta algumas interrogações sobre a evolução e a dinâmica atual dessas estruturas geológicas.

A técnica dos métodos auxiliares que utiliza os dados topográficos é um caminho que parece oferecer boas possibilidades no estudo de áreas semelhantes em toda a bacia do rio São Francisco.

O outro ponto foi o atingimento dos objetivos propostos mostrando que é possível discriminar depressões cársticas com a otimização combinada de métodos de classificação temática baseados em critérios espectrais e informações auxiliares obtidas através da análise do relevo. A quantificação dos aspectos morfológicos mostrou-se viável também permitindo uma melhoria significativa na detecção de depressões cársticas de maneira automática eliminando a confusão com grandes áreas de ocupação agrícola bem como áreas associadas a certos tipos de vegetação, principalmente matas ciliares, que pela sua forma podem ser discriminadas das dolinas de maneira eficiente.

Os dados obtidos pela coleta de uma amostra de 470 depressões cársticas permitiram ainda discernir que os parâmetros não correlacionados: Área e Elongação são adequados para discriminar morfológicamente as dolinas. As observações realizadas permitem vislumbrar futuras pesquisas para o aprimoramento das classificações espectrais concatenadas às classificações morfológicas desenvolvendo abordagens mais apuradas.

12 Referências bibliográficas

- BAXES,G.A. *Digital Image Processing*. New York: Wiley,1994.
- CÉSAR, F.M ET AL. *Informações Básicas para a Gestão Territorial: Região de Sete Lagoas-Lagoa Santa, Minas Gerais- Caracterização Geomorfológica*. Belo Horizonte: CPRM-Cia. de Pesquisa de Recursos Minerais/CETEC-Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1994,p.33.(Relatório).
- CETEC.*Mapa Geomorfológico de Minas Gerais*. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais-CETEC, 1982 (escala 1:1.000.000, Projeto Diagnóstico Ambiental, Geomorfologia,mapa n.2)
- CRÓSTA, A.P. *Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto*. Campinas: IG/UNICAMP, 1992. p.170.
- CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T.(Org.). *Geomorfologia do Brasil*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil,1998. p.392.
- DARDENNE,M.A.*The Brasília Fold Belt*.In:Cordani,U.G. et al(Ed.).Tectonic Evolution of South America.Rio de Janeiro:31st International Geological Congress,2000.p231-263
- DREW, D. *Karst Processes and Landforms*. London: Macmillan Education,1985.63p. (Aspects of Geography).
- GONZALEZ,R.C.,WOODS,R.C. *Processamento de Imagens Digitais*. São Paulo: Ed. edgard Blücher Ltda, 2000.p.509.
- HUTCHINSON,C.F. Techniques for combining Landsat and ancillary data for digital classification improvement. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*.Bethesda, MD, v.48, n.1, p123-130.1982.
- KING,L.C. A Geomorfologia do Brasil Oriental. *Revista Brasileira de Geografia*. Rio de Janeiro, v.18, n2, p.3-265, Abril-Junho 1956.
- MATTOS,J.T.;CUNHA,R.P. *Aplicação de sensores remotos, com ênfase em imagens Landsat, em mapeamento geológico regional no norte de Minas Gerais*. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1977. p.189. (Tese , Mestrado em Sensores Remotos e Aplicações).
- MILANI,A.J.,THOMAZ FILHO,A. *Sedimentary basins of South America*.In:Cordani,U.G. et al(Ed.). Tectonic Evolution of South America.Rio de Janeiro:31st International Geological Congress,2000.p231-263

PINTO,C.P et al. *Projeto Bacia do São Francisco-Província Mineral do Bambuí(MG)-Programa de Trabalho*.Belo Horizonte:Convênio CPRM-COMIG,1999.p.70 (Relatório).

RICHARDS,J.A.,LANDGREBE,D.A.,SWAIN,P.H. A Means for utilizing ancillary information in multiespectral classification. *Remote Sensing of Environment*.New York,v.12,p.463-477,1982

SALOMON,J. Les influences climatiques sur la geomorphologie karstique: exemple des millieux tropicaux et arides.*Quaternaire*.France,v.8,n.2-3,p.107-117,1997

SAPUCAIA JR, M. *Folha SE-23-V-D João Pinheiro Escala 1:250.000 - Projeto Mapas Metalogenéticos e de Previsão de Recursos Minerais*. Belo Horizonte: CPRM-Cia. de Pesquisa de Recursos Minerais, 1986,v.1,p.35.(Relatório).

SEAPA. *Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paracatu*. Belo Horizonte:Convênio Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento-Governo do Estado de Minas Gerais, Ministério do Meio Ambiente-Governo Federal, Governo do Distrito Federal).1996.(Relatório do Consórcio Magna/Dam/Eiser).