**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA FÍSICA**

Rodrigo da Cunha Pacheco

**Processamento de dados de imagem multiespectral aplicado à
geobotânica por sensoriamento remoto: uma abordagem para
áreas cobertas por Floresta Atlântica da planície costeira**

**Versão Corrigida
São Paulo
2009**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA FÍSICA**

Rodrigo da Cunha Pacheco

**Processamento de dados de imagem multiespectral aplicado à
geobotânica por sensoriamento remoto: uma abordagem para
áreas cobertas por Floresta Atlântica da planície costeira**

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação do departamento de Geografia para obtenção do título de Mestre em Ciências (área de concentração: Geografia Física).

Versão Corrigida (original disponível na FFLCH).

Orientador: Prof. Dr. Adilson Avansi de Abreu

São Paulo
2009

Agradecimentos

Algumas pessoas e órgãos foram de fundamental importância para o encaminhamento e finalização desta pesquisa, por isso, gostaria de agradecê-las nominalmente.

Aos professores: doutor Adilson Avansi de Abreu pela orientação durante o mestrado; doutor Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida do IGc da USP, pois sem sua ajuda desde o começo da pesquisa, a mesma não teria sido possível; doutor Jurandyr Luciano Sanches Ross, orientador da graduação, e um dos responsáveis por minha atuação no ramo das pesquisas científicas; doutor Yuri Tavares Rocha pelos conselhos fornecidos na qualificação de mestrado.

Aos laboratórios de Informática Geológica (IGc - USP) e de Sensoriamento Remoto (DG - USP) pelos auxílios prestados durante a condução desta pesquisa.

Aos meus familiares que também me ajudaram.

Aos meus amigos: Andreza S. Araújo, Edson A. Filho, Anelise A. Marson e aos funcionários do Instituto Florestal de São Paulo pelo auxílio durante a estadia e execução do trabalho de campo em Pariquera-Açu.

Ao geógrafo e amigo Janio Queiroz Souto por dicas relacionadas ao geoprocessamento e aos geógrafos e amigos Daniel de Oliveira Perez e Danilo Rogério de Sousa pelas conversas de teores acadêmicos e outras mais distraídas.

A Adriana H. Deguchi pelas dicas fornecidas e Simone Costa pelo auxílio na revisão deste trabalho.

Por fim, a todos que de alguma maneira contribuíram com esta pesquisa

“Talvez haja outros conhecimentos a adquirir, outras interrogações a fazer hoje, partindo não do que outros souberam, mas do que eles ignoraram”.

(S. Moscovici apud MORIN, 2003)

“Para atingir o ponto que tu não conheces, tu deves pegar o caminho que tu não conheces”.

(San Juan de la Cruz apud MORIN, 2003)

“O método não pode se separar do seu objeto”.

(W.Heisenberg apud MORIN, 2003)

Resumo

A presente pesquisa tem como objetivo geral contribuir com a temática da geobotânica por sensoriamento remoto em áreas de florestas tropicais, a partir de um estudo de caso. Considerando que o processamento digital de imagens de sensoriamento remoto é constituído por três etapas principais: pré-processamento, realce de imagens e classificação de imagens, foram testados alguns procedimentos metodológicos que permitissem a abordagem da geobotânica a partir do sensoriamento remoto em áreas cobertas por Floresta Atlântica da planície costeira. A princípio, o alvo era testar o método sistêmico desenvolvido por Almeida (2005) sobre a área do Parque Estadual Campina do Encantado (PECE). Contudo, verificou-se que o mesmo se restringia à etapa de realce espectral. Assim, testou-se paralelamente uma complementação, adicionando procedimentos referentes ao pré-processamento e à etapa de classificação digital. Na etapa de pré-processamento, foi feita a conversão dos valores de níveis de cinza das imagens para valores de reflectância de superfície. Na etapa de realce espectral, a proposta foi aplicar os procedimentos definidos por Almeida (2005), tanto sobre as imagens com valores de reflectância de superfície, quanto sobre as imagens com os valores dos *pixels* em níveis de cinza. As técnicas que compõem originalmente o método sistêmico, aplicadas nas imagens, são respectivamente: razão de bandas, análise de componentes principais, seleção de componentes principais e montagem de composições coloridas falsa cor, filtro de convolução passa-baixa, introdução de informação textural da vegetação por meio da fusão entre as composições coloridas formadas e a imagem de albedo. Para a etapa adicional de classificação, não contemplada, a princípio, pelo método sistêmico, propôs-se aplicar um algoritmo classificador para auxiliar na produção de mapas sobre unidades de vegetação e unidades geobotânicas. A área do PECE foi escolhida por

possuir características ambientais sobre as quais o método de realce ainda não havia sido aplicado, ou seja, na Floresta Atlântica da planície costeira, no município de Pariqueira-Açu, Estado de São Paulo. Outro motivo da escolha foi a disponibilidade de dados sobre as características florísticas e fisionômicas de três comunidades vegetais distintas, bem como dos diferentes ambientes físicos que as mantinham. Tais dados permitiram verificar a consistência das informações contidas nas imagens processadas, servindo como instrumentos para avaliação da eficácia dos procedimentos metodológicos adotados e de sua adequabilidade para pesquisas geobotânicas em áreas cobertas pela Floresta Atlântica da planície costeira. Como base teórica para os procedimentos adotados, alguns conceitos fundamentais da geobotânica, biogeografia, sensoriamento remoto e de outros ramos científicos foram revistos à medida que auxiliassem na concretização dos objetivos desta pesquisa.

Palavras-chave: geobotânica, Floresta Atlântica, sensoriamento remoto, método sistêmico.

Abstract

This research aims to contribute to geobotany by remote sensing theme on tropical forest areas from a case study. Considering that digital processing of remote_sensed image is constituted by three main stages: preprocessing, image enhancement and image classification, some methodological proceedings were tested as would permit to broach geobotany from remote sensing in coastal plain areas covered by Atlantic Forest. Firstly, the target was to test the systemic method developed by Almeida (2005) on the area of Parque Estadual Campina do Encantado (PECE). However, it was verified that the systemic method was developed specifically for spectral enhancement stage; as a result, some complementation was also proposed to add proceedings, in a parallel way, related to the preprocessing and digital classification stage. In the preprocessing stage, digital numbers of images were converted into surface reflectance values. In spectral enhancement stage, the proposal was to apply proceedings defined by Almeida (2005) in the images with surface reflectance values and also in the images with digital numbers values. The original systemic method techniques applied in the images are respectively: band ratios, principal component analysis, principal component selection, elaboration of false color compositions, low pass filtering application and introduction of vegetation textural information (through the fusion of the color compositions and albedo images). For the additional classification stage, not contemplated by original systemic method, was proposed to apply some classificatory algorithm to aid in the production of maps about vegetation units and geobotanic units. The PECE area was chosen due to the fact of having environmental characteristics in which the enhancement method has not been applied yet, which is, the Coastal Plain Atlantic Forest in Sao Paulo State. The specific adopted area is

placed in Pariqueira-Açu municipality and another reason for its choice was due to data availability about floristic and physiognomic characteristics of three distinct vegetal communities, as well as data about different physical environments which support them. Data permitted to verify information's consistence contained in processed images, serving as evaluation instrument about methodological proceedings adopted and about its suitability for geobotanic researches in coastal areas covered by Atlantic Forest. As theoretical basis for the adopted proceedings, some fundamental concepts of geobotany, biogeography, remote sensing and other scientific fields were reviewed in this research as they were useful in the concretization of its aims.

Keywords: geobotany, Atlantic Forest, remote sensing, systemic method.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO	11
CAPÍTULO 2- OBJETIVO E JUSTIFICATIVA	15
2.1 OBJETIVOS GERAIS.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
CAPÍTULO 3- MATERIAIS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	21
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS.....	21
3.1.2 O sensor ASTER.....	21
3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	24
3.2.1 Pré-processamento	24
3.2.2 Realce espectral.....	26
3.2.3 Etapa de verificação dos resultados	26
3.2.4 Etapa de mapeamento das feições espectrais.	27
CAPÍTULO 4- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA	29
4.1.1 A pesquisa no contexto dos estudos sistêmicos em geografia.....	29
4.1.2 A contribuição da pesquisa para o desenvolvimento de um método aplicado ao estudo da geobotânica por sensoriamento remoto.....	36
4.2 GEOBOTÂNICA POR SENSORIAMENTO REMOTO: CONCEITUAÇÃO E VISÃO GERAL.....	39
4.2.1 O conceito e objeto de estudo da geobotânica.....	39
4.2.2 A diversificação das plataformas e sistemas sensores e a classificação da geobotânica por sensoriamento remoto.....	44
4.3 FUNDAMENTOS DO SENSORIAMENTO REMOTO MULTIESPECTRAL	48
4.3.1 Tipos e propriedades dos sensores	48
4.3.2 O processamento digital de imagens multiespectrais	52
4.4 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO.....	61
4.4.1 A interação da radiação eletromagnética com a vegetação.....	61
4.4.2 A região do visível e as feições diagnósticas dos pigmentos	66
4.4.3 A região do infravermelho próximo e os índices de vegetação.....	69
4.4.4 A Região do infravermelho ondas curtas e as feições diagnósticas da água foliar.....	71
4.4.5 A região do infravermelho ondas curtas e as feições diagnósticas de compostos bioquímicos ...	73
4.5 O MÉTODO SISTÊMICO COMO INSTRUMENTO DE REALCE DAS RESPOSTAS ESPECTRAIS DAS COBERTURAS VEGETAIS.....	76
4.5.1 Etapa 1 – Razão de bandas.....	77
4.5.2 Etapa 2 – Análise de Componentes Principais (ACP).....	80
4.5.3 Etapa 3 –Montagem de composições coloridas.....	88
4.5.4 Etapa 4 – Aplicação do filtro de convolução passa-baixa.....	90
4.5.5 Etapa 5 – Introdução da imagem de albedo	92
4.6 DISTRIBUIÇÃO DAS PLANTAS: FUNDAMENTOS TEÓRICOS	94
4.6.1 Fundamentos geoecológicos da distribuição das plantas.....	94
4.7 O PARQUE ESTADUAL CAMPINA DO ENCANTADO E SEU CONTEXTO GEOECOLÓGICO	113
4.7.1 Contexto climático do PECE	113

4.7.2 Contexto geomorfológico e geológico do PECE.....	116
4.7.3 Características das três unidades geobotânicas do PECE alvos de identificação por sensoriamento remoto.....	119
CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	128
5.1 IMAGENS COM DADOS BASEADOS EM VALORES DE NÍVEIS DE CINZA.....	128
5.1.2 <i>Análise dos dados estatísticos básicos.....</i>	<i>128</i>
5.1.3 <i>Análise das componentes principais geradas a partir da Matriz S e das composições coloridas formadas.....</i>	<i>137</i>
5.1.4 <i>Análise das componentes principais geradas a partir da matriz R e das composições formadas.....</i>	<i>148</i>
5.2 IMAGENS COM DADOS BASEADOS EM VALORES DE REFLECTÂNCIA DE SUPERFÍCIE	152
5.2.1 <i>Análise dos dados estatísticos básicos.....</i>	<i>152</i>
5.2.2 <i>Análise das componentes principais geradas a partir da matriz S e das composições coloridas formadas.....</i>	<i>154</i>
5.2.3 <i>Análise das componentes principais geradas a partir da matriz R e das composições formadas.....</i>	<i>157</i>
5.3 IDENTIFICAÇÃO DAS UNIDADES FLORESTAIS.....	161
CAPÍTULO 6- CONCLUSÃO	168
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	173
Apêndice A - Índices espectrais (formados a partir de imagens com dados em valores de níveis de cinza).	182
Apêndice B - Componentes principais (geradas através da matriz de variância-covariância).	183
Apêndice C - Componentes principais (geradas a partir da matriz de correlação)..	184
Apêndice D - Composições coloridas	185
Apêndice E - Composições coloridas	186
Apêndice F - Composições coloridas.....	187
Apêndice G - Composições coloridas.....	188
Apêndice H - Índices espectrais (formados a partir de imagens com dados em valores de reflectâncias).	189
Apêndice I - Componentes principais gerados a partir da matriz de variâncias-covariância dos índices espectrais.	190
Apêndice J - Componentes principais gerados a partir da matriz de correlação dos índices espectrais.	191
Apêndice L - Composições coloridas	192
Apêndice M - Composições coloridas	193

Apêndice N - Composições coloridas	194
Apêndice O - Composições coloridas.....	195
Anexo A - Coordenadas das áreas com dados florísticos e do meio físico.....	196

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A presente pesquisa é resultado da abordagem sistêmica da paisagem geográfica cujos componentes são vistos como interdependentes e dinâmicos. Abordar de forma integrada os grandes grupos de elementos que compõem a paisagem geográfica, representados pelos elementos bióticos, abióticos e antrópicos, é o objetivo da geoecologia ou ecologia da paisagem. Dessa maneira, por sua natureza essencialmente sintética, é possível apontar que a geoecologia constitui-se no ápice dos estudos sintéticos em geografia (quando guiados por esse paradigma), representando, portanto, a totalidade do objeto geográfico.

Ocorre que a totalidade, por si, só pode ser tautológica caso não seja cindida para o entendimento de suas partes. Santos (2002, p.118) concluiu que o conhecimento só é possível através da análise, a qual somente pode ser feita com a cisão da totalidade. Assim, não analisar a totalidade, cindindo-a, seria esvaziá-la de movimento. Portanto, a contradição análise-síntese (o estudo das partes e o estudo do todo) é apenas aparente, pois são, na realidade, movimentos complementares e que se retroalimentam. Tais movimentos permitem o progresso no conhecimento como um todo.

Nesse contexto, tem-se que esta pesquisa insere-se no campo da geobotânica por sensoriamento remoto em áreas de florestas tropicais. A geobotânica se ocupa com a relação entre as plantas e os distintos meios físicos que as mantêm. Se por um lado a mesma pode ser vista como uma área de conhecimentos integrados (sintéticos), envolvendo conhecimentos produzidos por campos específicos como a pedologia, geomorfologia, geologia, botânica, biogeografia e climatologia; por outro, pode não completar a síntese do que é concebido como paisagem geográfica, ao não poder

centralizar seu foco em questões sociais e culturais, algo possível para a geoecologia, a qual, por isso, pode ser considerada o ápice dos estudos sintéticos em geografia.

Dessa forma, a geobotânica é um campo parcialmente sintético do ponto de vista das disciplinas mais especializadas, porém, ainda parcialmente analítico do ponto de vista da geoecologia, o que não reduz sua importância no âmbito da geografia, já que sendo uma possível etapa pré-síntese geoecológica, possibilita um melhor conhecimento da totalidade da paisagem geográfica. Logo, embora a presente pesquisa adote o paradigma da geoecologia como foco de orientação geral, partindo do princípio de integração dos diversos componentes da paisagem geográfica, é ainda um estudo pré-síntese geoecológica.

Nesta relação dialética de construção do conhecimento, é possível lembrar-se que, de acordo com Christofolletti (1981, p.6), a história da geografia tem se constituído exatamente de ciclos com domínios ora dos estudos voltados ao particular (analíticos), ora dos estudos voltados ao geral (sintéticos). Os estudos geobotânicos ocupam uma posição intermediária entre esses dois pólos, podendo, contudo, em certos casos, serem estudos completamente geoecológicos como será evidenciado posteriormente.

De toda forma, o foco central desta pesquisa é colaborar com o desenvolvimento de procedimentos metodológicos que contribuam com a geobotânica por sensoriamento remoto em áreas cobertas por florestas tropicais, algo que pode ser aplicado também para finalidades geoecológicas, ao se considerar a geobotânica como um caminho possível na elaboração de uma eventual síntese maior da paisagem. Tal foco se enquadra nos objetivos gerais da geografia física os quais, segundo Christofolletti (1981, p.11), visam explicar a organização espacial, considerando os aspectos naturais.

De forma mais pragmática, a possibilidade de se extrair informações a respeito das coberturas vegetais, e o uso das mesmas como indicadores de condições ambientais, faz da

geobotânica por sensoriamento remoto um campo de interesse para a ciência de base em variados campos além da geografia, como a geologia e a botânica, por exemplo, bem como, para aplicações econômicas voltadas às áreas de mineração e agricultura, e, ainda, em atividades de planejamento ambiental. Por isso, o desenvolvimento dessa linha de pesquisa tem interesses múltiplos.

Vale ressaltar que o desenvolvimento tecnológico atual tem permitido o monitoramento dos recursos naturais a partir de plataformas orbitais, possibilitando um melhor gerenciamento dos mesmos por parte das sociedades. Entretanto, não basta o desenvolvimento de sensores com crescente capacidade de resolução espacial e espectral, sem o acompanhamento correspondente de metodologias científicas que permitam um manuseio adequado dos dados fornecidos.

Além do desenvolvimento de sensores cada vez mais aprimorados, há de se considerar também a importância do desenvolvimento de computadores e programas com capacidades crescentes de processar dados e, ao mesmo tempo, mais acessíveis aos usuários como analistas e pesquisadores. Graças ao acesso a tais instrumentos, o processamento digital de dados de sensores multiespectrais e hiperespectrais pôde se tornar algo de aplicação mais frequente.

Para países como o Brasil, com território tão extenso, a geobotânica por sensoriamento remoto pode se constituir em mais um instrumento para o gerenciamento dos seus recursos naturais. Na prática, há preocupação no país no sentido de se utilizar o sensoriamento remoto a partir de plataformas orbitais no monitoramento dos recursos naturais, algo evidenciado pelo desenvolvimento do programa CBERS em parceria com o governo da China. Assim, a temática abordada por esta pesquisa possui relativa importância nesse contexto.

A presente pesquisa foi dividida em quatro etapas principais e complementares. A primeira esclarece os objetivos do trabalho. A segunda apresenta os materiais e procedimentos metodológicos utilizados. A terceira está focada na revisão bibliográfica, aprofundando a contextualização da pesquisa no campo da geografia, bem como analisando os fundamentos principais do sensoriamento remoto e do processamento digital de imagens multiespectrais. Ao longo desta são analisados ainda o comportamento espectral da vegetação, os procedimentos de realce espectral baseados nesse comportamento, os fundamentos da distribuição das plantas e o contexto geocológico da área escolhida como alvo de teste do método adotado para a prática da geobotânica por sensoriamento remoto (o Parque Estadual Campina do Encantado no Estado de São Paulo). Por fim, na quarta etapa, buscou-se analisar os resultados alcançados através dos procedimentos metodológicos adotados em um tipo de ambiente onde ainda não haviam sido aplicados.

Capítulo 2 - Objetivo e justificativa

2.1 Objetivos gerais

Esta pesquisa tem como objetivo geral contribuir com o conhecimento inserido no campo da ecologia da paisagem e que pode ser denominado de forma mais específica como geobotânica. Para isso, propõe analisar e adaptar procedimentos metodológicos que viabilizem o uso do sensoriamento remoto e do geoprocessamento como instrumentos de apoio para pesquisas em áreas cobertas por florestas tropicais, configurando uma linha de pesquisa específica que pode ser denominada como geobotânica por sensoriamento remoto em áreas de florestas tropicais.

Os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa se basearam, em um primeiro momento, na proposta formulada por Almeida (2005), a qual foi denominada como método sistêmico¹. Tal método possui como princípio abordar a planta como um sistema integrado ao seu meio. Os passos estabelecidos pelo método sistêmico permitem utilizar o comportamento espectral dos dosséis das coberturas vegetais para extração de informações sobre os diferentes tipos de comunidades vegetais existentes no espaço, bem como sobre os respectivos ambientes que as sustentam.

Considerando que a metodologia mencionada atua sobre a etapa de realce de imagens multiespectrais, a presente pesquisa buscou ampliar seu campo de aplicação, propondo o uso de técnicas para a etapa de pré-processamento e para a execução do mapeamento de unidades geobotânicas eventualmente identificadas a partir do realce de imagens. Outra intenção geral da pesquisa voltada à geoecologia, foi aplicar o método

¹ É preciso diferenciar o método sistêmico para aplicação do sensoriamento remoto na geobotânica dos princípios sistêmicos derivados da teoria geral dos sistemas, mas que fundamentou também o método.

sistêmico, originalmente elaborado para auxiliar no mapeamento geológico e localização de jazidas minerais, ao contexto ambiental da Floresta Atlântica da planície costeira do Estado de São Paulo, abrindo precedentes não somente em relação a um novo campo para sua aplicação, como também a um novo tipo de ambiente com suas especificidades.

Foi, portanto, intenção desta pesquisa contribuir para o avanço do desenvolvimento dos procedimentos metodológicos para a utilização do método sistêmico no processamento de imagens com a finalidade de difundir o uso do sensoriamento remoto multiespectral e do geoprocessamento na prática da geobotânica, principalmente em áreas cobertas por florestas tropicais nos compartimentos das planícies costeiras.

2.2 Objetivos específicos

São objetivos específicos desta pesquisa:

- Analisar a natureza da geobotânica por sensoriamento remoto no contexto científico geral e da geografia.
- Analisar os procedimentos técnicos, os quais formam o método sistêmico e a pertinência de sua aplicação à geobotânica em áreas cobertas pela Floresta Atlântica nos compartimentos das planícies costeiras, propondo e discutindo questões advindas da sua aplicação no contexto ambiental específico do Parque Estadual Campina do Encantando (PECE).
- Ampliar as técnicas integrantes do método, prevendo ações também para a fase de pré-processamento e para a utilização de imagens realçadas em mapeamentos de coberturas vegetais e de unidades geobotânicas.

Considerando-se tais objetivos específicos, tem-se que a proposta de analisar a natureza epistemológica da geobotânica por sensoriamento remoto se faz necessária, na

medida em que essa não tem sido uma temática muito abordada atualmente, embora seja uma área de pesquisa bastante praticada, ainda que sob outras denominações.

Já a análise dos procedimentos metodológicos preconizados pelo método sistêmico pode contribuir com sua evolução. Algo bastante significativo visto que “a evolução deste conhecimento deve aprimorar os resultados futuros” (ALMEIDA, 2005, p.96). Tal dado demonstra que o mesmo ainda não fora totalmente explorado possibilitando a análise do uso de novas técnicas para o integrar.

Quanto à adoção do PECE, parque localizado no município de Pariquera-Açu, no Estado de São Paulo (figura 1) como área para aplicação e teste do método sistêmico, tem-se que a mesma justificou-se a partir da análise do trabalho de Sztutman (2000), o qual pesquisou o parque com o objetivo principal de caracterizar a fisionomia, as características florísticas e a estrutura de três tipos de unidades florestais nele presentes. Tais florestas coincidiam com três ambientes físicos distintos: área com turfeira rasa (delgada), área com turfeira profunda (espessa) e área com solo firme. Assim, o autor chegou à conclusão da existência do condicionamento por parte do meio físico das três unidades florestais distintas.

Figura 1. Mapa de localização.

A identificação das três unidades de florestas foi feita preliminarmente com base na interpretação de fotografias aéreas em tons de cinza, podendo, portanto, ser considerado um estudo de geobotânica por sensoriamento remoto (embora o autor não tenha se utilizado do termo). Contudo, tal técnica se diferencia da proposta nesta pesquisa, na qual é utilizada a capacidade multiespectral dos sensores que constituem o ASTER.

De toda forma, o estudo feito por Sztutman concentrou-se nessas três unidades florestais, segundo o qual, são as mais representativas da cobertura vegetal do parque. O estudo classificou-as em três tipos, que estão relacionados com os ambientes onde as coberturas vegetais se desenvolveram, sendo, portanto, uma classificação ge ecológica. Os três tipos de comunidades florestais reconhecidos por esse autor foram classificados como: Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas (também denominada floresta sobre morrote), Floresta de Planície Litorânea Paludosa Turfosa Periodicamente Inundada (também denominada floresta turfosa rasa) e Floresta de Planície Litorânea Paludosa Turfosa sem Água Superficial Aparente (também denominada floresta turfosa profunda).

Uma vez que a pesquisa de Sztutman (2000) atestava as relações geobotânicas existentes no parque, ou seja, a profunda relação entre as comunidades vegetais e os tipos de ambientes gerados principalmente pela variação nas características do solo e subsolo, e as caracterizava floristicamente, enxergou-se a possibilidade na presente pesquisa de se utilizar o método sistêmico para identificá-las, esperando realçar nas imagens processadas os comportamentos espectrais diferenciados dessas comunidades com características florísticas e fisionômicas distintas. Esse fato poderia confirmar a capacidade do método em realçar e identificar relações geobotânicas em áreas cobertas por florestas tropicais nos compartimentos de planície costeira. Ressalta-se a diferença básica entre o presente estudo e o conduzido por Sztutman: enquanto este buscou aperfeiçoar um método de abordagem da geobotânica a partir do uso do processamento digital de imagens de sensoriamento

remoto, sendo o PECE apenas uma área de teste, aquele concentrou-se na caracterização florística e geocológica das três unidades florestais do PECE como finalidade última.

Dessa forma, a pergunta e problemática específica principal que norteou toda esta pesquisa foi acerca da possibilidade de realçar as três comunidades vegetais distintas apontadas por Sztutman (2000) como existentes no PECE, através do uso do método sistêmico para processamento de imagens de sensores multiespectrais e hiperespectrais. A hipótese inicial foi a de que seria possível realçar e separar essas unidades florestais, pois, sabendo-se que o método sistêmico trabalha com informações de compostos bioquímicos foliares e de texturas geradas pelos dosséis das coberturas vegetais, e que para espécies e comunidades vegetais diferentes tais variáveis também são heterogêneas, então, a consequência lógica seria esperar o sucesso do método. Como forma de avaliar a sua eficácia, adotou-se o critério da possibilidade de clara identificação das três comunidades vegetais do PECE. Assim, um outro objetivo específico desta pesquisa foi: identificar em imagem gerada pela aplicação do método sistêmico a Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas, a Floresta de Planície Litorânea Paludosa Turfosa Periodicamente Inundada e a Floresta de Planície Litorânea Paludosa Turfosa sem Água Superficial Aparente (três ambientes do Parque Estadual Campina do Encantado).

Capítulo 3 - Materiais e procedimentos metodológicos

3.1 Materiais utilizados

3.1.2 O sensor ASTER

Para execução da presente pesquisa foi escolhido o sistema sensor ASTER que apresenta algumas vantagens em relação ao LANDSAT TM e ETM+, entre elas: maior resolução espacial para as bandas das regiões do visível e infravermelho próximo, e maior resolução espectral na região do infravermelho ondas curtas.

O ASTER se constitui em um dos cinco instrumentos sensores que compõem o satélite EOS (*Earth Observing System*), também conhecido como TERRA. O satélite foi lançado em 18 de dezembro de 1999 pela NASA e possui uma órbita polar sincronizada com o Sol (LIU, 2007, p.77).

O ASTER é formado por três subsistemas distintos entre si: o *Visible and Near Infrared* (VNIR), o *Shortwave Infrared* (SWIR) e o *Thermal Infrared* (TIR), sendo que cada um possui seu próprio telescópio e sensor com o objetivo de registrar a REM entre 520 nm e 11.650 nm (NASA, 2007). As tabelas 1, 2 e 3 expõem as características da resolução espectral e espacial de cada subsistema. Já as tabelas 4 e 5 mostram respectivamente os valores de *offset* e de radiância máxima de cada banda do VNIR e SWIR, nas situações de alto ganho, ganho normal e baixo ganho, de acordo com JPL (2008).

Tabela 1- Resolução espacial e espectral no VNIR (NASA, 2007).

Banda	Resolução Espectral	Resolução Espacial
1	520 - 600 nm	15 m
2	630 - 690 nm	15 m
3 n	760 - 860 nm	15 m
3 (<i>Backward looking</i>)	760 - 860 nm	15 m

Tabela 2- Resolução espacial e espectral no SWIR (NASA, 2007).

Banda	Resolução Espectral	Resolução Espacial
4	1.600 - 1.700 nm	30 m
5	2.145 - 2.185 nm	30 m
6	2.185 - 2.225 nm	30 m
7	2.235 - 2.285 nm	30 m
8	2.295 - 2.365 nm	30 m
9	2.360 - 2.430 nm	30 m

Tabela 3- Resolução espacial e espectral no TIR (NASA, 2007).

Banda	Resolução Espectral	Resolução Espacial
10	8.125 - 8.475 nm	90 m
11	8.475 - 8.825 nm	90 m
12	8.925 - 9.275 nm	90 m
13	10.250 - 10.950 nm	90 m
14	10.950 - 11.650 nm	90 m

Tabela 4- Offset das bandas do ASTER $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$.

Banda 1	Banda 2	Banda 3n	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7	Banda 8	Banda 9
-0.6760	-0.7080	-0.8620	-0.2174	-0.0696	-0.0625	-0.0597	-0.0417	-0.0318

Tabela 5- Radiância máxima registrada pelo ASTER $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$.

Bandas	Alto Ganho	Normal	Baixo Ganho 1	Baixo Ganho 2
Banda 1	170.8	427	569	-
Banda 2	179.0	358	477	-
Banda 3N	106.8	218	290	-
Banda 4	27.5	55	73.3	73.3
Banda 5	8.8	17.6	23.4	103.5
Banda 6	7.9	15.8	21	98.7
Banda 7	7.55	15.1	20.1	83.8
Banda 8	5.27	10.55	14.06	62.0
Banda 9	4.02	8.04	10.72	67.0

O ASTER foi projetado para que o ND (Número Digital) de 254 representasse a máxima radiância, enquanto o ND de 255 representasse os *pixels* saturados e o valor 0 de radiância coincidissem com o ND 1.

A imagem multiespectral foi utilizada e trabalhada por meio de programas de processamento digital de imagens (PDI) e SIGs.

Foi realizado também um levantamento de campo para verificação dos aspectos geocológicos gerais do parque e coleta de pontos de controle com GPS, os quais auxiliaram na conferência dos dados já disponíveis.

3.2 Procedimentos metodológicos

Em se tratando de trabalhos científicos, a metodologia é um dos pontos centrais a ser considerado. Ao buscar definir a natureza da metodologia, é possível apontar que é “um caminho, um conjunto de regras e procedimentos comuns a várias ciências, que permitem obter explicações, descrições e compreensão” (ARAÚJO, 2003,p.16).

Considerando-se que o método sistêmico de processamento adotado nesta pesquisa atua na etapa de realce espectral, é importante observar que não foram encontradas, na literatura, comparações sobre os impactos provenientes do tipo de imagem utilizada na aplicação do método, em relação à etapa de pré-processamento (particularmente em relação à calibração radiométrica). Assim, surgiu uma pergunta a respeito dos impactos da calibração radiométrica sobre os resultados finais obtidos com o método sistêmico. Por isso, na presente pesquisa, foi feita também a comparação dos resultados obtidos com a aplicação do método sistêmico sobre imagens com valores de NDs e imagens com valores de reflectância, o que exigiu a adição de novas técnicas aos procedimentos metodológicos.

3.2.1 Pré-processamento

3.2.1.1 Imagens com valores de pixels em níveis de cinza

As imagens ASTER L1B já possuem correção geométrica, portanto, como pré-processamento, foi necessária apenas a reamostragem das imagens da banda do SWIR para

uma resolução espacial de 15 metros, igualando-as à resolução espacial das imagens das bandas do VIS. Em seguida, aplicou-se o método sistêmico de realce.

3.2.1.2 Imagens com valores de *pixels* em reflectância de superfície

Embora as imagens de sensores sobre plataformas orbitais sejam fornecidas geralmente com quantificação da radiância registrada em níveis de cinza, é preciso lembrar que a quantidade desta, representada por cada nível de cinza registrado para cada banda, é diferente. Consequentemente, o uso de imagens de bandas diferentes, em técnicas como a razão de bandas, resulta em realce menos condizente com a realidade física dos alvos. Por isso, buscou-se realizar, também, uma abordagem com o método sistêmico a partir de valores relacionados diretamente às propriedades físico-químicas dos alvos, bem como morfológicas, além de poderem ser diretamente comparados entre bandas diferentes.

O primeiro passo do pré-processamento nessa abordagem, consistiu na reamostragem das bandas do SWIR para resolução espacial de 15 metros. Posteriormente, foi realizada a conversão dos valores de cinza para valores de reflectância de superfície (com correção atmosférica).

Após a correção atmosférica, foi necessário georreferenciar novamente as imagens de cada banda utilizada. O RMS foi de apenas 0,05.

Após a conversão dos níveis de cinza para valores de reflectância e do georreferenciamento, aplicou-se os procedimentos convencionais do método sistêmico para realce, o qual é descrito mais detalhadamente a seguir.

3.2.2 Realce espectral

Nessa etapa, aplicou-se sobre as imagens com os dois tipos de pré-processamento as técnicas sequenciadas, conforme o método sistêmico de Almeida (2005), as quais seguem a seguinte ordem:

- Razão de bandas.
- Análise de componentes principais.
- Montagem de composição colorida.
- Aplicação de filtro de convolução passa-baixa.
- Introdução da imagem de albedo com a informação textural.

É preciso observar que, devido às características da área de estudo, foi necessário adotar um procedimento adicional de realce sobre a imagem de albedo, visto que esta apresentou baixo brilho. Optou-se pelo realce gaussiano, como será exposto mais adiante.

3.2.3 Etapa de verificação dos resultados

Essa etapa foi preparada particularmente para a presente pesquisa e teve o objetivo de estabelecer os critérios para avaliação dos seus resultados. A mesma consiste em plotar os pontos dos blocos florísticos pesquisados por Sztutman (2000) nas composições geradas para verificar a compatibilidade entre as três unidades geobotânicas por ele identificadas com o padrão de cores, tonalidades e texturas apresentadas pelas composições elaboradas nesta pesquisa, indicando ou não a capacidade destas de realçar unidades florísticas e geobotânicas diferentes.

Adicionalmente à plotagem dos dados, foi executado um trabalho de campo para verificar a consistência destes através do controle com GPS.

As coordenadas dos pontos pesquisados por Sztutman (2000b) são apresentados no anexo A.

3.2.4 Etapa de mapeamento das feições espectrais.

Nessa quarta etapa, foi utilizado o algoritmo de classificação de máxima verossimilhança para reunir as diversas características espectrais de uma composição colorida escolhida, conforme a maior probabilidade de pertencerem a classes previamente definidas, através da escolha de áreas de treinamento.

Das áreas de treinamento, três possuíam dados que atestavam serem unidades geobotânicas distintas, as demais não, sendo que o critério de seleção das mesmas se baseou na significativa diferença em termos visuais de outras áreas; por isso, não há como afirmar que se tratavam de unidades geobotânicas distintas, sendo somente uma hipótese consistente. De toda forma, julgou-se útil utilizar o classificador para geração de um mapa que pode ser considerado como um mapa probabilístico de unidades geobotânicas do PECE, o qual pode ser confirmado ou aperfeiçoado a partir de novos levantamentos de dados de campo.

A figura 2 mostra o fluxograma com os procedimentos metodológicos adotados nesta pesquisa.

Figura 2. Fluxograma com os procedimentos metodológicos da pesquisa

Capítulo 4 - Revisão bibliográfica

4.1 Contextualização da pesquisa

4.1.1 A pesquisa no contexto dos estudos sistêmicos em geografia

Considerar o ambiente como um todo dinâmico, onde as partes se influenciam mutuamente, tornou-se uma prática consolidada na ciência moderna. Assim, “em todos os horizontes físicos, biológicos, antropossociológicos, se impõe o fenômeno-sistema” (MORIN, 2003, p.128).

O sistema tomou o lugar do objeto simples e substancial e ele é rebelde à redução em seus elementos; o encadeamento de sistemas de sistemas rompe com a idéia de objeto fechado e auto-suficiente. Sempre se trataram os sistemas como objetos; trata-se de agora em diante de conceber os objetos como sistemas (Ibid., p.129).

Os sistemas podem ser definidos como: “uma inter-relação de elementos constituindo uma entidade ou uma unidade global” (Ibid., p.131). Essas duas características essenciais estão presentes nas definições de sistemas de vários pesquisadores, desde o século XVII, e mesmo nas definições dos adeptos da teoria geral dos sistemas. Nessas definições, observa-se que o sistema é “um conjunto de partes” (LEIBNIZ, 1966 apud MORIN, 2003, p.131), ou “(...) um conjunto de unidades em inter-relações mútuas” (VON BERTALANFFY, 1956 apud MORIN, 2003, p.131).

Ao se observar as influências dos princípios do pensamento sistêmico dentro do corpo teórico da geografia, é possível constatar alguns autores que enxergaram, já em teorias geográficas (como o ciclo de erosão de William Morris Davis 1899), os princípios fundamentais da noção de sistema, embora Bertalanffy tenha formulado a primeira

concepção geral de sistema somente após a Segunda Guerra Mundial (SANTOS, 2004, *passim*).

Considerando que a abordagem sistêmica em geografia é algo bastante consolidado na atualidade, torna-se necessário o correspondente desenvolvimento e utilização de métodos e técnicas que viabilizem as pesquisas guiadas por essa perspectiva. Uma vez que a presente pesquisa busca contribuir com o desenvolvimento de procedimentos metodológicos voltados ao estudo sistêmico do ambiente geográfico, por meio de procedimentos baseados no uso do sensoriamento remoto e do geoprocessamento, foi adotado como paradigma norteador da pesquisa a ecologia da paisagem ou, como também pode ser denominada, a geoecologia (KLINK, 1981, p.1).

A ecologia da paisagem pode ser considerada como a aplicação dos princípios do pensamento sistêmico nos estudos ambientais. Conforme Leser (1992, p.121), a geoecologia é uma área especial de estudos, sem, contudo, formar um ramo especializado de pesquisas. De acordo com essa perspectiva, é possível considerá-la como uma forma geral de abordagem científica do meio geográfico, a qual deve ser alimentada por métodos e técnicas de inúmeras áreas da ciência, à medida que auxiliem no entendimento da realidade do ambiente terrestre.

Sendo possível apontar a ecologia da paisagem como um paradigma para pesquisas em geografia, torna-se interessante refletir sobre a natureza dos paradigmas. Assim, tem-se que os mesmos:

[...] são em certo sentido modelos em escala ampla [...]. Os cientistas cuja pesquisa se baseia em paradigmas comuns estão empenhados nos mesmos problemas, regulamentos e padrões, isto é, formam uma comunidade contínua dedicada a uma tradição particular de pesquisa. (HAGGET; CHORLEY, 1974, p.8).

A geografia é uma das bases fundamentais nas quais se assentam os estudos que objetivam entender a dinâmica das paisagens (ecologia de paisagens). Tal fato é passível de compreensão na medida em que a paisagem foi adotada desde muito tempo por muitos geógrafos como o próprio objeto de estudo da geografia (MORAES, 1993, p.14).

Ao longo da evolução da história do pensamento geográfico moderno, a partir do século XIX, o conceito de paisagem acabou sendo relegado a segundo plano, ao surgirem ou se firmarem outras concepções conceituais, como a região, o espaço, o território e o lugar. Contudo, desde a década de 1970, é possível constatar que tem havido um resgate do conceito de paisagem, bem como inúmeras teorizações a seu respeito. Alguns pesquisadores chegam a apontar exatamente esse conceito como o eixo teórico capaz de conferir unidade à geografia (CORRÊA; ROSENDHAL, 2004, p.7-8).

Um dos motivos da retomada do conceito de paisagem foi exatamente a construção do paradigma da ecologia da paisagem, o qual associou duas posturas até então distintas, mas naturalmente complementares. Tais posturas se referiam à abordagem integrada de elementos do ambiente dentro da ecologia e à perspectiva de fenômenos espacializados da geografia.

Era de se esperar a aproximação desses dois ramos do saber, uma vez que a geografia e a ecologia, em função de seus objetos de estudo, não eram ramos tão distanciados da ciência. “A geografia e a ecologia tratam da distribuição, organização e morfologia dos fenômenos sobre a superfície da terra e ambas as disciplinas desenvolveram conceitos e técnicas semelhantes de manipular problemas semelhantes” (STODDART, 1974, p.23).

Embora a geografia tivesse como objeto de estudo o ambiente terrestre formado pelos mesmos componentes incluídos no conceito de ecossistema sistematizado por Tansley, em 1934, a abordagem dos componentes ambientais se processava de forma

diferente entre ela e a ecologia. Enquanto esta, com o conceito de ecossistema buscou enfatizar a dinâmica integrada dos componentes ambientais (visão vertical), aquela, em uma postura mais analítica, enfatizava a visão espacial (horizontal) de cada objeto e fenômenos abordados por suas diversas disciplinas de forma mais isolada (TRICART, 1977, p.19); (TROPPMAIR, 2000).

Com a evolução das pesquisas e do conhecimento científico, e o surgimento de novos problemas relacionados aos recursos naturais, devido à intensa exploração dos mesmos por parte das sociedades humanas, a abordagem sistêmica dentro da geografia ganhou impulso e o clássico estudo compartimentado passou a ceder terreno para as pesquisas integradas, a partir da adoção da abordagem geoecológica promovida pelo biogeógrafo alemão C. Troll, o qual criou seus fundamentos lançados em 1939. A abordagem geoecológica permitiu unir a visão vertical e horizontal da ecologia e da geografia respectivamente (ROSS, 2001, p. 66).

Esse novo paradigma tem tido aceitação crescente dentro do meio acadêmico no contexto da geografia, bem como fortalecido a abordagem sistêmica do meio geográfico, resultando na origem de modelos teóricos, tais como as unidades ecodinâmicas, bastante abordadas atualmente na geografia brasileira.

Uma evidência do entusiasmo advindo ao meio acadêmico geográfico com a aplicação da abordagem sistêmica pode ser encontrada na posição adotada por Stoddart:

O valor da análise de sistemas não está só em sua ênfase na organização, estrutura e dinâmica funcional; através de suas propriedades de sistema geral, ela traz a geografia de volta ao seu reino das ciências naturais e nos permite participar das revoluções científicas deste século, do qual a posição kantiana excepcionalista nos excluiu. (STODDART, 1974, p.87).

Tendo em vista que a presente pesquisa se ocupa especificamente com a geobotânica, torna-se importante retomar a questão das diferenças entre os conceitos de

geobotânica e de geoecologia, os quais, como já adiantado, não são vistos aqui exatamente como sinônimos.

A ecologia da paisagem pode ter como foco central tanto a natureza quanto as sociedades humanas. Para Metzger (2001, p.3), haveria uma abordagem geográfica de tradição européia, a qual se voltaria basicamente ao planejamento da ocupação territorial, ao estudo de paisagens modificadas pelo homem e à análise de amplas áreas espaciais. Não obstante, haveria também uma abordagem ecológica de origem mais recente (a partir da década de 1980), surgida através da influência de biogeógrafos e ecólogos americanos, cujo foco principal é a paisagem natural em contraposição à paisagem cultural. Nesse contexto, é possível concluir que a possibilidade de abordagem multifocal da ecologia da paisagem a distingue da geobotânica, cujo foco principal recai na relação da planta e seu meio, ainda que intervenções antrópicas possam influenciar nesse processo. Dessa forma, é possível apontar a geobotânica como um termo conceitual de abrangência mais restrita em relação à ecologia da paisagem que, por ser mais abrangente, constitui-se em um paradigma, o qual se aplica à geobotânica.

Ao se buscar entender a localização da geobotânica no corpo teórico da geografia, é interessante considerar o modelo teórico proposto por Boesch e Carol (1968). Segundo este, a totalidade em geografia seria representada pela geosfera, a qual seria composta pela atmosfera, hidrosfera, litosfera, biosfera e antroposfera. Nessa perspectiva, todo estudo que envolvesse todas as esferas presentes em determinada área, independente do seu tamanho, seria um estudo da paisagem (geoecológico). O quadro 1 mostra as três categorias de paisagens existentes conforme o modelo proposto.

Quadro 1- Modelo de paisagens e interações entre seus elementos (BOESCH; CAROL, 1968).

	Paisagem Natural		Paisagem Cultural
	Paisagem Inorgânica	Paisagem Orgânica	
Esferas representadas	--- --- Atmosfera Hidrosfera Litosfera	--- Biosfera Atmosfera Hidrosfera Litosfera	Antroposfera Biosfera Atmosfera Hidrosfera Litosfera
Leis que governam as inter-relações	Inorgânico	Inorgânico. Inorgânico + Orgânico.	Inorgânico. Inorgânico + Orgânico + Antrópico.
Exemplos	Deserto salgado Deserto gelado	Tundra Floresta Primitiva	Paisagem urbana e rural

Com base nesse modelo teórico, é possível apontar a geobotânica como um estudo da paisagem orgânica na qual interagem as leis inorgânicas e orgânicas. É bem verdade que as interferências dos fatores antrópicos tornam-se crescentemente relevantes na determinação da distribuição das espécies vegetais e não devem ser esquecidas (poder-se-ia questionar a existência de paisagens exclusivamente orgânicas ou inorgânicas nos dias atuais); contudo, o meio antrópico não é o objetivo central de estudo da geobotânica.

Em teoria, um estudo geobotânico poderia constituir-se também em um estudo geoecológico pleno, caso na área de pesquisa não houvesse grandes influências antrópicas a serem consideradas, entretanto, caso houvesse tais interferências, uma pesquisa geobotânica não seria uma pesquisa geoecológica plena, mas uma possível etapa para se chegar a esse ápice sintético.

É importante lembrar que o conceito de ecologia da paisagem foi elaborado a partir de uma observação e estudo geobotânico por parte de Troll.

O pesquisador alemão observou a existência de quatro coberturas vegetais completamente diferentes em Munique, sua cidade natal. Acontece que nessas coberturas distintas havia algo, a princípio, anormal. A aparente anormalidade residia no fato de, mesmo sob um clima temperado úmido, a área conter vegetação xerofítica. Na busca pela explicação do fenômeno, Troll constatou, através de pesquisas geomorfológicas e pedológicas, a ligação entre aquela vegetação e as características do solo. O pesquisador verificou que a área em questão era formada por cones de dejeção, com sedimentos pedregosos cobertos por fina camada de solo, a qual era incapaz de reter água por muito tempo, o que acabava gerando carência hídrica com impactos na cobertura vegetal (TROPPMAIR, 2000).

Percebe-se dessa maneira que a geobotânica faz parte do desenvolvimento do pensamento geográfico, estando presente na origem do que viria a ser um dos paradigmas da geografia moderna, ainda que pesquisas dessa área possam não ter sido rotuladas com esse título.

Além de se constituir em uma pesquisa no campo da geobotânica, o presente estudo utilizou o sensoriamento remoto como técnica de suporte a essa atividade; por isso, a linha de desenvolvimento adotada pode ser denominada como geobotânica por sensoriamento remoto. Nesta são utilizados os recursos disponibilizados pelos sensores multiespectrais e hiperespectrais como forma de extração de informações sobre as plantas e o ambiente que as mantém.

4.1.2 A contribuição da pesquisa para o desenvolvimento de um método aplicado ao estudo da geobotânica por sensoriamento remoto

Contribuir com o desenvolvimento de novas formas de prática da geobotânica por sensoriamento remoto, a partir da exploração de novos recursos oferecidos pelos sensores multiespectrais e hiperespectrais em áreas cobertas por florestas tropicais, como a Floresta Atlântica da planície costeira do Estado de São Paulo, é uma das finalidades centrais do presente estudo.

Embora o uso do sensoriamento não seja uma novidade no âmbito das pesquisas acerca da relação entre as plantas e seu meio, o contínuo desenvolvimento técnico-científico tem disponibilizado novos recursos ou aperfeiçoado outros já existentes nos sensores remotos; assim, faz-se necessário o desenvolvimento de metodologias capazes de explorar os novos recursos disponibilizados. Um dos muitas vezes subutilizado no sensoriamento remoto multiespectral em estudos que envolvem a vegetação e central para o método adotado por esta pesquisa é a resolução espectral. De acordo com Almeida (2005, p.49) há um amplo predomínio do uso da região do vermelho e infravermelho próximo, tanto por parte dos usuários do sensoriamento remoto, quanto nos artigos da comunidade acadêmica, em contrapartida à sub-utilização do infra-vermelho ondas curtas. De acordo com Vicente, Souza Filho e Perez Filho (2007, p.1921), os estudos sobre a cobertura vegetal que utilizam a região espectral do infravermelho ondas curtas para estimar seus compostos bioquímicos são algo ainda recente. Por isso, a possibilidade de uso efetivo dessa região espectral para tal finalidade ainda provoca divergências entre os especialistas, necessitando de maior quantidade de estudos para ser consolidado. Daí, uma explicação para a sub-utilização da região do infra-vermelho ondas curtas em pesquisas sobre a cobertura vegetal. De toda forma, o método sistêmico elaborado por Almeida (2005), e aqui utilizado, prevê o uso da região do infravermelho ondas curtas para obtenção

de informação sobre água foliar e matéria seca. Esse fato evidencia que o presente estudo se insere em um campo de pesquisa bastante atual e que necessita ser desenvolvido. Da mesma forma, o método explorado também carece de experimentos para a sua consolidação. Da parte deste, cabe ressaltar que, além da questão do uso do infravermelho ondas curtas, há o fato de não ter sido aplicado nas características geoecológicas da floresta atlântica da planície costeira.

É preciso observar que a geobotânica por sensoriamento remoto auxilia na caracterização geoecológica dos ambientes terrestres (o que é de interesse para a ciência de base), mas também possibilita outras aplicações, inclusive com finalidades econômicas, sendo interessante seu desenvolvimento a vários pesquisadores e usuários do sensoriamento remoto.

Apesar dos interesses potenciais desse ramo de pesquisa, em um caso particular, Ustin et al. (1999, p.190) constataram que a carência de entendimento interdisciplinar entre os especialistas em nutrição mineral de plantas, ecólogos especializados em plantas, geólogos e especialistas em sensoriamento remoto é um fator que tem dificultado a prática dessa linha de pesquisa voltada à busca de jazidas minerais. No entanto, é possível generalizar essa questão da falta de tratamento interdisciplinar para as mais diversas áreas de aplicação da geobotânica. Coutinho (2006, p.17), por exemplo, apontou a necessidade do entendimento dos processos de relações entre as comunidades vegetais e seus ambientes para classificação mais segura dos biomas brasileiros², lamentando a falta de pesquisas sobre as relações planta/meio e constatando a falta de levantamentos de dados sobre o meio físico em muitos estudos fitossociológicos. Ocorre que, se por um lado, muitos estudos ambientais conduzidos por pesquisadores com origem nas ciências biológicas possuem carência de dados sobre o meio físico, por outro, muitos estudos realizados por

² Equivalente ao que na tradição geográfica são conhecidos por domínios brasileiros.

pesquisadores com origem nas ciências da Terra carecem de maiores informações sobre a vegetação. Esta é uma questão antiga. Christofolletti (1981, p.13), observou que os ecólogos, com formação predominantemente em zoologia e botânica, costumavam focalizar seus estudos principalmente na relação entre os seres vivos, negligenciando a pesquisa dos biótopos, tradicionalmente o campo fundamental de pesquisas da geografia física. Tricart (1977, *passim*) também havia observado esse fato e apontou a necessidade de cooperação dos especialistas em ecótopos (incluindo os geógrafos) nos estudos ambientais com o objetivo de estabelecer um equilíbrio entre as diferentes tendências de abordagem.

De fato, a necessidade de mobilização de uma ampla gama de conhecimentos relativos a diversos ramos especializados da ciência é um desafio real para a prática da geobotânica, o que muitas vezes tem limitado os potenciais desse tipo de pesquisa.

Apesar das dificuldades outrora apontadas para a prática da geobotânica por sensoriamento remoto multiespectral, tem-se a pesquisa realizada por Sztutman (2000) no PECE como um exemplo de estudo que se preocupou com a abordagem tanto das plantas quanto do meio físico que as mantém. A partir dos resultados dessa pesquisa, tornou-se possível analisar, através do presente trabalho, o comportamento do método sistêmico para aplicação do sensoriamento remoto nos estudos geobotânicos em área de planície costeira. Tornou-se possível ainda contribuir com o desenvolvimento desse método.

4.2 Geobotânica por sensoriamento remoto: conceituação e visão geral

4.2.1 O conceito e objeto de estudo da geobotânica

Embora já tenham sido analisados alguns aspectos da relação da geobotânica com a ecologia da paisagem e com a geografia, neste momento é feita uma análise mais focada no significado desse conceito.

Devido à constante especialização dos estudos sobre as plantas e do ambiente que as cercam, não é possível encontrar na literatura uma definição única sobre os objetivos dos estudos geobotânicos.

É interessante observar a obra de Villar (1929, *passim*) na qual já era manifestada preocupação com a definição da geobotânica. Para esse autor, tratava-se da ciência da relação entre a vida vegetal e seu meio, ou ainda, a ciência responsável pelo estudo do hábitat das plantas na superfície terrestre. Em sua perspectiva, a geobotânica trataria dos fenômenos de localização, nos quais as inúmeras variações de espécies vegetais ocorreriam em conexão com diferentes fatores locais que estivessem atuando ou já tivessem atuado, resultando, conseqüentemente, em cada situação existente no presente. O autor observou também que a diferença entre a fisiologia e a geobotânica residiria no fato de a primeira explicar somente a vida da planta, enquanto a segunda se preocuparia com seu hábitat.

É válido verificar que Villar (op. cit.) diferenciou em sua obra o conceito de “situação” e “localização” com relação à vegetação. Assim, as plantas localizadas em dado lugar seriam fenômenos geobotânicos, ao contrário das situadas, as quais se encontrariam em certo lugar por fatores externos (ação antrópica como na agricultura). Ainda na

perspectiva de Villar, mesmo as plantas situadas em uma área poderiam ganhar um aspecto de localização, tornando-se um fenômeno geobotânico; isso porque também as culturas agrícolas dependeriam parcialmente das condições do meio físico que poderiam limitar o desenvolvimento de tais plantações.

O aspecto geobotânico presente ainda em áreas agrícolas (portanto, com plantas situadas) é um exemplo de possível aplicação prática da geobotânica por sensoriamento remoto, cuja finalidade é aumentar a produtividade das plantações através do monitoramento das culturas e detecção preventiva de problemas advindos de eventuais carências específicas das plantas. Um exemplo desse tipo de aplicação pode ser encontrado em Almeida, Souza Filho e Rosseto (2006), os quais formularam procedimentos metodológicos baseados também no método sistêmico para a previsão da safra de cana-de-açúcar. Entre os procedimentos adotados nessa pesquisa, estava a elaboração de índices espectrais para o realce dos compostos específicos da vegetação. Os resultados mostraram que as propriedades de tais índices eram afetadas pela relação planta-meio e, embora se tratasse de um caso de cultura homogênea cultivada em meio físico com pouca variação em seus atributos gerais, foi possível constatar diferenças nas respostas espectrais dos dosséis da cultura em questão, atribuíveis, provavelmente, às variações ambientais como nas propriedades do solo, pois, como já fora dito, tratava-se de cultura homogênea.

Outros autores também procuraram uma definição conceitual para a geobotânica. Strasburger et al. (1963, p.601) consideraram que os termos “geobotânica” e “fitogeografia” nada mais seriam do que sinônimos, sendo que a esse ramo de pesquisa caberia o estudo da distribuição das plantas, bem como conhecer as características essenciais das leis e causas que determinam a distribuição das mesmas. Tais autores lembraram que a geobotânica ou fitogeografia foi historicamente subdividida em quatro ramos, cada qual com um objetivo específico de estudo:

La florística (corología) tiene por objeto el estudio de la distribución de cada una de las diversas unidades sistemáticas; la fitosociología trata de las comunidades vegetales; la Geobotánica ecológica investiga los fundamentos ecológicos de la distribución de las plantas, y la Geobotánica genética (o histórica) la historia de la flora y de la vegetación (STRASBURGER et al. 1963).

Por sua vez, em seu tratado de fitogeografia do Brasil, Rizzini (1997, p.11) observou que o termo geobotânica passou a ser utilizado por alguns estudiosos para representar o conhecimento das plantas que muitos dividiam conceitualmente em três. A saber: autoecologia (estudo da planta-meio), sinecologia (estudo das estruturas das comunidades) e corologia (estudo da distribuição da vegetação), apontando que o termo representaria todas essas áreas. Nas palavras do próprio autor, embora o conceito pretendesse servir para expressar “[...] as interrelações do reino vegetal com o meio físico. [...] decididamente, tal palavra não teve aceitação geral” (RIZZINI, op. cit).

Com visões um tanto mais voltadas à aplicação prática da geobotânica, Liu (2006, p.179) e Ustin et. al. (1999, p.189-192) analisaram a mesma como instrumento capaz de fornecer indicações de depósitos minerais. Nessa perspectiva, a geobotânica poderia ser definida como o estudo das plantas em relação a seu ambiente geológico ou mesmo uma inspeção visual da vegetação a fim de explicar características geológicas da paisagem. Tal posição encontraria justificativa por parte dos autores na medida em que grande parte das terras emersas, com exceção de ambientes de clima extremo, como desertos e áreas glaciais, seriam cobertas por vegetação, impedindo a análise direta das respostas espectrais dos solos e rochas; daí, as plantas teriam a função de servir como indicadores de características do substrato.

Considerando a aplicação da geobotânica para exploração de recursos minerais, dois livros escritos por Brooks (*Geobotany and Biogeochemistry in Mineral Exploration; e Biological Methods of Prospecting for Minerals*) são atualmente suas bases principais (ALMEIDA, 2005 p.13). O desenvolvimento dessa linha de aplicação da geobotânica foi

intensificado após a Segunda Guerra Mundial, com grande destaque para a antiga União Soviética onde as pesquisas se desenvolveram de forma mais intensa (BROOKS, 1972).

Brooks lembrou que a prática da geobotânica como instrumento auxiliar da exploração mineral poderia ser dividida em duas etapas. A primeira seria relativamente fácil de ser executada por recorrer apenas aos recursos visuais para identificação de variações na vegetação que, em tese, seriam provocadas por variações do substrato. A segunda, por sua vez, seria de natureza bem mais complexa, ao exigir uma interpretação das unidades heterogêneas identificadas, fato que requereria o uso de conhecimentos baseados em inúmeras disciplinas, como a bioquímica, botânica, ecologia, biogeografia, entre outras.

Com base nas informações até agora apresentadas, ficam claros dois objetivos da prática da geobotânica. Enquanto de um lado muitos a praticam sob as mais diversas nomenclaturas, tendo como alvo o entendimento da relação planta-meio como um fim em si mesmo, outros a praticam apenas como instrumento para chegar a outros fins, como localização de depósitos minerais ou na da chamada agricultura de precisão. Baseando-se nesses dois objetivos, propõe-se, neste estudo, considerar a primeira corrente de pesquisa como geobotânica de base (na qual não há objetivo de aplicação além do conhecimento científico) e a segunda como geobotânica instrumental (na qual o que prevalece é a perspectiva de aplicação em atividades econômicas e práticas).

Embora a prática de associar variações na cobertura vegetal com as condições do solo e subsolo seja relativamente antiga, o uso do sensoriamento remoto como suporte a tal atividade somente pôde se efetivar mais recentemente com o desenvolvimento técnico e científico moderno, através do qual foi possível a invenção e constante aperfeiçoamento de sensores remotos.

As influências do ambiente sobre as plantas são conhecidas desde a antiguidade. Conforme Brooks (1972), é possível observar ao menos um registro de correlação geobotânica ainda no Império Romano durante o reinado de César Augusto (63 AC – 14 DC) quando Vitruvius reconheceu a vegetação como indicadora da disponibilidade hídrica dos solos. Kruckeberg (2002) lembrou haver a hipótese de que anteriormente a Vitruvius, Aristóteles teria escrito sobre as relações geobotânicas. Apesar de os escritos terem sido perdidos, a evidência dessa ocorrência seria o fato de seu discípulo, Teofrasto, descrever uma relação que podemos chamar de geobotânica ao observar uma formação de garrigue sobre calcário, isso há mais de 2.000 anos. Analisando épocas mais contemporâneas, Kruckeberg (2002, p.23) lembrou que Humboldt já havia percebido a influência do relevo sobre a distribuição das plantas, enquanto Franz Unger, ainda no século XIX, conceituou a relação entre as plantas e as condições geológicas do ambiente. Para Franz Unger, o conteúdo mineral, tanto das rochas quanto dos solos, exerceria o maior grau de influência por parte do substrato sobre a distribuição das plantas.

Se por um lado os estudos geobotânicos na prática são bastante antigos, por outro, o sensoriamento remoto representa atualmente uma alternativa a mais para o avanço de tais estudos, agregando novas possibilidades a um conhecimento que tem se desenvolvido já há bastante tempo e é bastante importante para países como o Brasil, com vastas áreas cobertas por florestas, como na região da Floresta Amazônica, além de outras, como as áreas remanescentes da muito devastada Floresta Atlântica. Sendo a geobotânica por sensoriamento remoto o alvo principal deste estudo, julgou-se útil resgatar de forma concisa também a história de seu desenvolvimento.

4.2.2 A diversificação das plataformas e sistemas sensores e a classificação da geobotânica por sensoriamento remoto

O sensoriamento remoto pode ser definido como “a tecnologia que permite a aquisição de informações sobre objetos sem contato físico com eles” (NOVO, 1989, p.1). Considerando algumas etapas relevantes de seu desenvolvimento histórico, é possível encontrar nas pesquisas de Isaac Newton no século XVII bases fundamentais para seu desenvolvimento.

A descoberta da origem das cores por parte do pesquisador inglês, publicada em 1672, foi um dos passos importantes para o processo de construção das técnicas que constituem as atividades do sensoriamento remoto. Isso porque viabilizou a criação da teoria das cores, fundamental para essa atividade. A invenção de aparelhos voltados ao registro de imagens, como a câmara obscura, cujos princípios fundamentais já eram conhecidos desde o quarto século A.C. na China (JENSEN, 2000, p.54), também se constituiu em fato relevante. Tão importante quanto essas descobertas foi a invenção do balão por Joseph e Etienne Montgolfier em 1783, na França, pois a primeira fotografia aérea da qual se tem conhecimento e que se constitui na forma original do sensoriamento remoto (SABINS, 1986) foi obtida através de um balão, pelo parisiense Gaspard Felix Tournachon, em 1858, nas proximidades de Paris. Desde o uso dos balões, outros tipos de plataformas para o transporte de câmeras foram utilizados ao longo do desenvolvimento do sensoriamento remoto (como pipas e pombos), chegando a um meio bastante utilizado ainda hoje, o avião, cujo primeiro registro de uso para obtenção de fotografias aéreas remonta a 1908 com L. P. Bonvillain, acompanhado por Wilbur Wright também na França (JENSEN, 2000, p.64).

As imagens obtidas pela até então inovadora técnica da aerofotogrametria representaram um avanço tecnológico de grande relevância para as pesquisas científicas de

inúmeras áreas do conhecimento. Uma menção importante particularmente no contexto da geografia, é o caso do biogeógrafo Carl Troll que, de acordo com Troppmair (2000), como apoio às suas pesquisas geoecológicas, passou a usar o que para a época (entre 1928 e 1929) se constituía em uma técnica inovadora: a fotointerpretação. Mais do que isso, ele apontou em obra publicada em 1938, com o título “Fotointerpretação e Pesquisa Ecológica”, o uso dessa tecnologia como a técnica do futuro para pesquisas nas mais diversas áreas do saber, como a geografia, geologia, planejamento, entre outras.

O contínuo desenvolvimento científico e tecnológico, impulsionado pelas duas guerras mundiais e pela Guerra Fria, fez surgir novas plataformas para obtenção de imagens de sensoriamento remoto, além do aperfeiçoamento de meios já existentes. Uma das novas plataformas que passou a ser empregada foi a orbital, graças ao desenvolvimento dos satélites artificiais.

O primeiro satélite a orbitar a Terra foi o Sputnik I, lançado pela antiga União das Repúblicas Socialistas Soviética em 4 de outubro de 1957. Os Estados Unidos, por sua vez, competindo e acompanhando o desenvolvimento de novas tecnologias e sua aplicação para aquisição de informações espaciais e da Terra a partir do espaço, desenvolveu a partir de 1960 um programa orbital que consistia no uso de satélite secreto de reconhecimento. O programa foi chamado de “Corona” e logrou êxito em obter informações fotográficas do território de sua rival, a União Soviética. (JENSEN, 2000, p.74-75).

A inovação não se limitou apenas às plataformas dos sensores, ao contrário, repercutiu inclusive no desenvolvimento de novos sistemas sensores com o objetivo de aumentar suas capacidades de registro de dados.

De acordo com Novo (1989, p.3), a partir de 1960 a história do sensoriamento remoto entrou em uma segunda fase. Isso porque, enquanto nos períodos anteriores o mesmo se baseava nas fotografias aéreas e em seus sistemas sensores para registro das

imagens, a partir desse período passaram a ser utilizados múltiplos tipos de sensores para aquisição dos mais diversos tipos de dados. Entre tais sensores, estão os imageadores multiespectrais e hiperespectrais, de interesse maior para a presente pesquisa.

Considerando o processo de desenvolvimento dos sensores multiespectrais, é possível observar que o primeiro satélite a operar na faixa espectral do infravermelho foi o TIROS-1, lançado em 1960. Esse satélite era capaz também de captar imagens baseadas em um sistema de televisão e foi exatamente com ele que surgiu o termo “sensoriamento remoto”. Ainda na década de 1960, teve início nos Estados Unidos o desenvolvimento do programa ERTS (*EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITES*), com o lançamento do ERTS-1, voltado para as investigações dos recursos existentes na superfície terrestre, cujo nome foi alterado para Landsat, tendo o último satélite do programa sido lançado em 1999, o Landsat 7 (LUCHIARI; KAWAKUBO; MORATO, 2005, p.42); (NASA, 2007).

Atualmente, sensores orbitais com as mais diversas resoluções espectrais, espaciais e temporais desempenham importante papel no monitoramento e levantamento de recursos naturais terrestres. Tais sensores podem ser usados para a aquisição de informações relacionadas à natureza bioquímica e textural da vegetação, o que auxilia na distinção de coberturas vegetais heterogêneas e, por consequência, de variações nas condições ambientais, como será visto ao longo deste estudo, justificando a importância desses instrumentos para a prática da geobotânica moderna.

A geobotânica por sensoriamento remoto pode ser classificada em duas categorias: geobotânica de reconhecimento e geobotânica de alvo, tendo como parâmetro a abrangência espacial dos estudos, o que é também função da resolução espacial dos sistemas sensores utilizados.

Na geobotânica de reconhecimento, o objetivo básico é a busca pela identificação de anomalias e diferenças em áreas cobertas por vegetações capazes de serem identificadas

por sensores com resoluções espectrais e espaciais, que variam de baixa a média. A geobotânica de alvo, por sua vez, busca identificar variações nas próprias unidades de plantas, o que é possível graças ao desenvolvimento de sistemas sensores de alta resolução espectral e espacial (ALMEIDA, 2005 p.4). No caso da presente pesquisa, conforme esse parâmetro de classificação e seus objetivos, bem como as resoluções espectral e espacial do sensor utilizado, é possível enquadrá-la na geobotânica por sensoriamento remoto de reconhecimento.

4.3 Fundamentos do sensoriamento remoto multiespectral

4.3.1 Tipos e propriedades dos sensores

O conhecimento de certas propriedades dos sensores é de fundamental importância para o planejamento e utilização adequada de seus produtos.

Um dos conhecimentos indispensáveis está relacionado ao tipo de sensor a ser utilizado pelo pesquisador, o que é uma função dos seus objetivos de estudo. Os sensores devem ser entendidos como aparelhos capazes de converter as formas de energia presentes no ambiente em dados a respeito dos mais diversos alvos. Tais aparelhos, de acordo com Novo (1989, p.52-53), podem ser classificados conforme vários critérios, os quais consideram inúmeros fatores, tais como a forma de representação da radiação detectada, a fonte da energia captada pelos aparelhos e as regiões do espectro nos quais operam.

Considerando o critério de classificação de acordo com a forma de representação da radiação detectada por parte dos sensores, tem-se que os mesmos podem ser classificados como imageadores e não imageadores. A diferença entre ambos consiste no fato de os primeiros terem a capacidade de converter a radiação eletromagnética (REM) detectada em imagens, ao contrário de os segundos, conhecidos como radiômetros e espectro-radiômetros³, que produzem informações de alvos na forma de gráficos e dígitos não espacializada (NOVO, op. cit.).

Quanto ao critério de classificação dos sensores, segundo o qual se considera a fonte de energia, os mesmos podem ser classificados como ativos e passivos. Enquanto os ativos detectam a própria radiação (como os sensores que operam na região espectral de

³ Enquanto os radiômetros operam com faixas espectrais largas, os espectro-radiômetros operam com faixas espectrais mais estreitas.

micro-ondas), os passivos dependem da radiação gerada por fontes externas, como o Sol, para registrarem dados sobre os alvos (NOVO, 1989).

Com relação ao critério de adoção das regiões do espectro nas quais os sensores operam para respectiva classificação, é possível dividi-los em sensores ópticos e de micro-ondas. A diferença entre ambos reside tanto em suas constituições como nas faixas espectrais de operação. Enquanto os sensores ópticos operam na faixa espectral compreendida entre 380 e 15.000 nm, os sensores de micro-ondas operam na faixa entre 1 mm e 1 metro (NOVO, 1989).

O desenvolvimento de sensores capazes de operar em mais de uma banda espectral fez surgir um conceito importante: o de sensores multiespectrais. Como o próprio termo já evidencia, tais instrumentos são capazes de detectar a energia refletida, emitida e/ou espalhada por um objeto (ou área de interesse para determinado estudo) em múltiplas bandas ou regiões do espectro eletromagnético. Existem atualmente sensores capazes de detectar a REM através de centenas de bandas espectrais, os quais, devido a essa grande capacidade de registro, são denominados hiperespectrais (JENSEN, 2000 p.181).

A capacidade diferenciada dos sensores em discriminar bandas espectrais é função de sua resolução espectral. Quanto mais finas e numerosas forem as bandas que conseguirem distinguir, maior será a resolução espectral dos mesmos. A vantagem de uma alta resolução espectral reside no fato de tornar mais preciso o registro de respostas espectrais referentes às feições diagnósticas dos mais distintos alvos pesquisados. Isso porque as sobreposições de feições espectrais diagnósticas de origens diferentes são passíveis de ocorrer de forma mais intensa em bandas espectrais largas, reduzindo a precisão desses instrumentos no registro de feições de elementos mais específicos (LILLESAND; KIEFER, 1994 p.357), (ALMEIDA, 2005 p.54).

O quadro 2 mostra a classificação das principais regiões do espectro eletromagnético, conforme os comprimentos de ondas. Sensores com alta resolução espectral possuem várias bandas para registro da REM dentro de uma mesma região espectral.

Quadro 2- Regiões espectrais (adaptado de WILKIE; FINN, 1996, p.16).

Nome da Região Espectral	Tamanho das Ondas
Raios Gama	< 0,003 nm
Raio-X	0,03-3 nm
Ultravioleta (UV)	3-400 nm
Visível (VIS)	400-700 nm
Infravermelho (IR)	700-15.000 nm
Microondas	0.3-300 cm

No caso dos sistemas que formam o ASTER, tem-se que são sensores ópticos, sendo que as regiões do espectro de maior interesse, por serem utilizadas nesta pesquisa, são as do visível e infravermelho. O ASTER possui várias bandas espectrais para cada uma dessas regiões, por isso, torna-se interessante verificar como podem ser subdivididas (quadro 3).

Quadro 3- Sub-regiões espectrais (Baseado em MATHER, 2004; ALMEIDA, 2005).

Visível <i>Visible (VIS)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Violeta: 390-455 nm • Azul: 455-492 nm • Verde: 492-588 nm • Amarelo: 577-597nm • Laranja: 597-622 nm • Vermelho: 622-780 nm
Infravermelho <i>Infrared (IR)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Infravermelho Próximo (<i>NIR</i>): 700-1.300 nm • Infravermelho Ondas Curtas (<i>SWIR</i>): 1.300-2.500 nm • Infravermelho Termal (<i>TIR</i>): 3.000-15.000 nm

Outras propriedades importantes dos sensores, que devem ser consideradas com cuidado, são as resoluções espacial, radiométrica e temporal (NOVO, 1989, p.98).

Por resolução espacial, deve ser entendida a capacidade de identificação de feições do terreno de forma que, quanto menores forem as dimensões das feições passíveis de ser identificadas, maior será a resolução espacial do sensor (WILKIE; FINN, 1996, p.38).

Quanto à resolução radiométrica, a mesma refere-se à habilidade dos sensores de discriminarem os níveis de intensidade de energia por eles captados. A REM detectada é registrada na forma de uma matriz preenchida por NDs, que quantificam o fluxo de energia proveniente de dada superfície e acabam formando as imagens à medida que cada ND é representado por uma tonalidade de cinza. A disponibilidade de níveis de cinza de um sensor é dada através de sua resolução radiométrica, que em outras palavras é sua sensibilidade em discernir níveis diferenciados de fluxo de energia. A escala de níveis de cinza, com a qual um sensor trabalha, é expressa por *bits*. Quanto maior for a resolução radiométrica de um sensor, ou seja, quanto mais *bits* tiver, maior será a possibilidade de distinção de alvos que possuem intensidades de reflectância relativamente próximas. Um sensor com 8 *bits*, por exemplo, é capaz de representar o fluxo de energia detectado através

de uma amplitude de 256 níveis de cinza (JENSEN, 2000, *passim*); (MATHER, 2004, p.33).

Com relação à resolução temporal, a mesma refere-se ao tempo de frequência com o qual um determinado sensor registra as imagens de uma mesma área. Cabe observar que através de imagens multitemporais, é possível verificar as mudanças históricas ocorridas em determinados lugares (JENSEN, op. cit), item de fundamental importância na abordagem da evolução temporal das paisagens.

4.3.2 O processamento digital de imagens multiespectrais

Enquanto os sensores imageadores disponibilizam dados sobre diversos alvos de interesse, cabe ao analista avaliá-los e transformá-los em informações úteis às finalidades que conduziram às suas aquisições. Para tanto, são utilizados computadores e programas específicos com inúmeros recursos técnicos e alta capacidade de processamento de dados, como os sistemas de processamento de imagens e os sistemas de informações geográficas (SIGs), por exemplo.

Os métodos e técnicas voltados ao processamento e extração de informações de imagens no contexto do sensoriamento remoto podem ser ordenados em três grandes grupos de procedimentos: preparação de imagens (restauração de imagem), realce de contraste e técnicas de classificação (NOVO, 1989 p.218).

4.3.2.1 Procedimentos de restauração de imagens

A aplicação de técnicas voltadas à restauração de imagens é necessária por inúmeras razões. O registro de dados pelos sensores passa por processos de armazenamento, transmissão e recepção, através de bases terrestres. Durante esses processos, pode haver a perda parcial de dados ou os mesmos podem sofrer distorções, as quais produzem ruídos e interferências nas imagens.

Os procedimentos e técnicas existentes, voltados a solucionar as distorções contidas nas imagens, variam conforme os tipos de distorções e ruídos apresentados pelas mesmas. Tais técnicas podem ser agrupadas em três grupos funcionais: as de restauração radiométrica, as de restauração geométrica e as de restauração atmosférica (NOVO, 1989, p.218-225).

Os processos técnicos voltados à restauração radiométrica objetivam corrigir as indesejáveis diferenças entre os níveis de cinza presentes em cada matriz de dados (imagens), causadas por problemas na calibração dos sensores (que impedem uma relação completamente linear entre os valores de radiância e os níveis de cinza apresentados pelas imagens), ou pela falta de dados, devido às ausências de respostas dos detectores.

Outro procedimento que pode ser adotado nessa etapa e é importante para certas aplicações do sensoriamento remoto é a conversão dos NDs para valores físicos como radiância e reflectância. Como lembraram Pereira, Batista e Roberts (1996), embora os NDs possuam uma relação com os valores físicos reais dos alvos registrados, os mesmos não representam quantitativamente tais propriedades a não ser indiretamente. Os NDs se relacionam com o fluxo radiante refletido por um alvo através de um modelo linear, sendo assim, os mesmos mantêm uma proporção com os valores reais de radiância registrada pelos sensores.

As diferentes bandas espectrais de sensores, como o Landsat 7 e o ASTER (nas bandas do VIS, NIR e SWIR), registram a radiância em cada banda com amplitudes limítrofes diferentes. Entretanto, para todas elas, os valores de radiância são distribuídos proporcionalmente entre 256 níveis de cinza, o que torna a comparação estatística entre os dados das imagens de bandas diferentes representados por níveis de cinza algo, a princípio, incompatível. O quadro 4 exemplifica essa questão ao mostrar diferentes limites de registro de radiância que o Landsat 7 apresentou para cada banda espectral em situação de alto ganho.

Quadro 4- Limites de registro de radiâncias para as bandas do Landsat ETM + em Maio de 2001 (fonte: NASA, 2007).

Bandas	Intervalo Espectral (nm)	Lmin	Lmax
Banda 1	450-520	-6.2	191.6
Banda 2	520-600	-6.4	196.5
Banda 3	630-690	-5.0	152.9
Banda 4	760-900	-5.1	157.4
Banda 5	1550-1750	-1.0	31.06
Banda 7	2080-2350	-0.35	10.80

Enquanto *Lmax* se refere ao limite máximo de radiância que um sensor é capaz de registrar, *Lmin* negativo, o qual é um valor mínimo, não se refere exatamente à radiância refletida pelos alvos, uma vez que fisicamente não poderiam ocorrer valores negativos. Na realidade, tais valores se devem ao fato do sistema que converte a radiância em sinal elétrico, bem como o sinal elétrico em número digital, produzir uma saída maior que zero, mesmo quando não há radiância chegando ao sensor (LUIZ et al. 2003). A figura 3 ilustra a relação linear entre os níveis de cinza e os valores de radiância e reflectância para uma banda do LANDSAT 7. Percebe-se que o nível zero de radiância não coincide com o ND 0. Essa aparente lacuna, entre o valor 0 de radiância refletida registrada e o ND 0, é

ocupada pelo sinal gerado pelo próprio sistema do sensor, formando o *offset* que é uma quantidade aditiva (MATHER, 2004, p.113).

Figura 3. Relação entre os NDs a radiância e a reflectância (adaptado de LUIZ et al. 2003).

Através da equação 1, é possível executar a conversão dos valores de níveis de cinza de uma imagem para valores de radiância medida em watts por unidade quadrada de área por esterradiano (ângulo sólido) por comprimento de onda [$W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$] (ANTUNES; TAVARES JÚNIOR, 2005, p.776).

$$L_{\lambda} = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{NC_{\max} - NC_{\min}} (NC - NC_{\min}) + L_{\min} \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

L_{λ} é o valor de radiância em dada banda.

$L_{\max}$ e $L_{\min}$ são respectivamente os valores de radiância máxima e mínima registradas em dada banda.

$NC_{\max}$ e $NC_{\min}$ são respectivamente os níveis máximos e mínimos de cinza para dada banda.

Nota-se que o quociente resultante da razão entre a diferença dos limites de radiância pela diferença entre o valor máximo e mínimo dos níveis de cinza resulta no ganho, que representa a inclinação da reta, a qual relaciona os NDs a seus respectivos valores de radiância.

Há situações em que a conversão dos NDs para valores de radiância não é o suficiente, como no caso de pesquisas multitemporais, nas quais cenas de datas diferentes são utilizadas. Isso porque o valor da radiância pode se alterar devido a diferenças nas condições de iluminação (por conta de fatores como a distância Terra-Sol) e no ângulo de iluminação, como lembraram Antunes e Tavares Júnior (2005). Dessa forma, quando se usa imagens de datas ou sensores diferentes, os NDs devem ser convertidos para valores de reflectância, que é uma unidade de medida adimensional por se tratar basicamente de uma razão entre a irradiância e radiância dos alvos (MATHER, op. cit). A equação 2 mostra os procedimentos para a conversão da radiância para valores de reflectância:

$$\rho = \frac{\pi L d^2}{E_s \cos \theta_s} \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

ρ é o valor de reflectância em cada banda ao nível do satélite.

π é o valor do ângulo sólido do hemisfério projetado (sr).

L é o valor da radiância na abertura do sensor.

d é o valor da distância entre a Terra e o Sol em unidades astronômicas no dia da aquisição da imagem.

E_s é o valor da irradiância solar exoatmosférica.

θ_s é o valor do ângulo zenital solar.

O valor de reflectância obtido é aparente, uma vez que possui interferências tanto da absorção quanto do espalhamento atmosférico. Contudo, é possível se obter uma boa estimativa da reflectância de superfície mediante a aplicação da correção atmosférica, minimizando as interferências da atmosfera.

Outras técnicas da etapa de restauração de imagens objetivam reorganizar seus *pixels* com a finalidade de ajustá-las a determinada projeção cartográfica, e mesmo corrigir distorções geradas, por exemplo, pelo movimento de rotação da Terra, sendo essa fase conhecida por restauração geométrica.

Já o grupo das técnicas de restauração atmosférica, como já mencionado, busca reduzir as interferências provocadas pela absorção e espalhamentos atmosféricos presentes nos dados das imagens. Essas interferências estão presentes mesmo nas janelas atmosféricas que são regiões espectrais nas quais a transmissão da REM é muito alta, porém, de forma mais reduzida (por isso constituem-se nos intervalos mais úteis para a prática do sensoriamento remoto).

Com relação ao efeito de espalhamento da REM, o mesmo se divide em três tipos: de Rayleigh, Mie e não seletivo (CCRS, 2008). O espalhamento de Rayleigh ocorre por partículas com raios menores do que o dos comprimentos de ondas e é inversamente proporcional a quarta potência do comprimento destas (MATHER, 2004, p.16). O espalhamento Mie, por sua vez, ocorre por partículas com o tamanho aproximadamente igual ao dos comprimentos de ondas afetadas e atua mais sobre os comprimentos menores, porém com menor diferença em relação ao espalhamento de Rayleigh. Já o espalhamento não seletivo afeta aproximadamente da mesma forma todos os comprimentos de ondas, diferenciando-se assim dos dois tipos descritos anteriormente, os quais são também conhecidos genericamente como espalhamentos seletivos (MATHER, op. cit).

Com relação à absorção da REM, a mesma ocorre devido a gases, como o vapor de água, o dióxido de carbono e o ozônio presentes na atmosfera (CCRS, 2008, 14), sendo que tanto na faixa do visível quanto do infravermelho próximo, a água e o dióxido de carbono promovem a absorção da REM, enquanto o ozônio absorve na região do ultravioleta (LIU, 2007, p.16).

Os procedimentos expostos voltados à restauração de imagens fazem parte do que é conhecido como a primeira etapa do processamento de imagens, ou seja, formam a fase de pré-processamento, pois precedem as outras duas etapas que focam respectivamente o

realce do contraste das imagens e a extração de informações (LILLESAND et al. 1994 p.525).

4.3.2.2 Procedimentos de realce de contraste

Segue após a etapa de pré-processamento, a fase de realce que busca tornar as imagens mais propensas para análises e classificação. O termo realce se refere “à alteração da aparência de uma imagem de forma que a informação contida na imagem possa ser visualmente e prontamente interpretada de acordo com uma necessidade particular” (MATHER, 2004, p.120, tradução nossa). As variações entre os fluxos de energia refletidos por parte dos inúmeros alvos da Terra geram diferenças no registro dos sensores, perceptíveis pelas dissimilaridades nos números digitais dos *pixels* das imagens (ou nos valores de radiância/reflectância após a conversão), produzindo contraste nos materiais gerados. Muitos possuem diferenças tênues no fluxo de energia refletida, resultando em baixo contraste e, conseqüentemente, dificultando a distinção dos mesmos. O realce de imagem busca solucionar esse problema, por meio de técnicas apropriadas que, embora possam ser divididas em dois tipos: lineares e as não lineares, têm o mesmo objetivo: expandir as diferenças dos valores originais para facilitar a interpretação das feições presentes nas imagens (JENSEN, 1996, p. 145). É importante observar que as técnicas utilizadas especificamente no método sistêmico como proposto por Almeida (2005) se encaixam exatamente nesse grupo de processos, por isso, elas são abordadas com maior detalhe nesta pesquisa mais adiante⁴. Algumas técnicas comuns nessa fase são: a

⁴ Tais técnicas são abordadas após a revisão sobre a interação da REM com as plantas a fim de que possam ficar mais claros os seus objetivos.

manipulação dos histogramas, as razões de bandas, os filtros de convolução e a análise por principais componentes.

Uma observação importante é que as técnicas de realce alteram de forma considerável os valores radiométricos das imagens. Logo, se uma determinada análise depender do conhecimento das respostas espectrais reais dos alvos, os procedimentos para realce de contraste não são medidas adequadas a serem tomadas (NOVO, 1989, p.234).

4.3.2.3 Procedimentos de classificação de imagens

A terceira categoria de técnicas possíveis de ser utilizadas com o objetivo de extrair informações das imagens promove a classificação das feições espectrais nelas presentes. Uma vez que as imagens possuem feições de interesse às mais diversas aplicações, torna-se preciso interpretá-las e identificá-las com a finalidade de inseri-las dentro de classes de informações que possam ser utilizadas. Daí a necessidade de adoção de técnicas de classificação, as quais podem ser tanto de natureza puramente visual quanto digital. Dessa forma, enquanto as primeiras dependem da experiência do intérprete e da formulação de chaves de interpretação, as segundas são realizadas totalmente ou parcialmente por programas computacionais (NOVO, 1989, p.235).

A classificação de imagens pode ser definida como “o processo usado para produzir mapas temáticos de imagens” (SCHOWENGERDT, 1997, p.389, tradução nossa). Atualmente, com os avanços informacionais, é possível utilizar diversos algoritmos no processo de classificação, delegando ao computador a missão de agrupar os *pixels* das imagens em classes distintas de informação, conforme suas assinaturas espectrais. Novo (op. cit. p.235) considerou um fato positivo o uso de algoritmos de classificação de

imagens, julgando que isso tornaria tanto o processo de mapeamento quanto de reconhecimento de feições algo mais objetivo em relação à classificação feita apenas pela interpretação através da visão humana.

Quanto às assinaturas espectrais dos *pixels* e classes espectrais, tem-se que se referem às características dos dados numéricos das imagens, interpretáveis por meio de análises estatísticas univariadas (média, desvio padrão, etc.) e bivariadas (variância-covariância) (WILKIE; FINN, 1996, p195).

O processo de classificação digital pode ocorrer de duas formas: com supervisão (classificação supervisionada), quando o analista seleciona amostras de treinamento a partir das quais são definidos os parâmetros para classificação do restante da imagem, e não supervisionado, processo com menor grau de interferência do analista. Embora possam ter os benefícios de seguirem critérios mais objetivos, a classificação digital não é imune a dificuldades e falhas, por isso, existem inúmeras técnicas de classificação digital e estudos que buscam avaliar e comparar os resultados produzidos por cada classificador. De acordo com Richards e Jia (2006 p.193), a classificação supervisionada geralmente é mais utilizada.

4.4 Comportamento espectral da vegetação

Uma das bases na qual se assenta a geobotânica por sensoriamento remoto é o princípio de que as coberturas vegetais refletem as condições ambientais nas quais se encontram. O conhecimento do comportamento espectral das plantas fornece informações sobre elas e os ambientes nos quais vivem a partir do uso das mesmas como indicadores ambientais. Nesse contexto, tem-se que os sensores remotos podem fornecer inúmeros dados a respeito dos vegetais e de seus ambientes. A aquisição de tais dados por parte dos sensores depende de suas capacidades técnicas, enquanto a transformação de tais dados em informações úteis dependerá do conhecimento por parte do pesquisador a respeito da forma como a radiação interage com o dossel da vegetação, bem como da metodologia de extração dos dados que utilizada (CURRAN, 1989 p.271).

4.4.1 A interação da radiação eletromagnética com a vegetação

Considerando que o entendimento dos princípios que regem o comportamento espectral da vegetação é de fundamental importância para os estudos geobotânicos por sensoriamento remoto, o primeiro fundamento a ser esclarecido é de que a radiação eletromagnética emitida pelo Sol pode ser absorvida, transmitida ou refletida pela vegetação. Na interação entre a REM e as coberturas vegetais destacam-se as folhas.

As folhas se destacam pelo fato de os demais componentes da vegetação possuírem menor significância em termos de área, bem como comportamento espectral pouco diagnóstico, tudo isso somado à relativa falta de pesquisas relacionadas ao comportamento espectral dos demais órgãos das plantas (ALMEIDA, 2005, p.30).

A interação da REM com as folhas, de acordo com Jensen (2000, p.334), pode ser descrita pela seguinte equação 3:

$$\Phi_{i_{\lambda}} = \Phi_{\rho_{\lambda}} + \Phi_{\alpha_{\lambda}} + \Phi_{\tau_{\lambda}} \quad (\text{equação 3})$$

Onde (λ) é o fluxo espectral radiante em interação com as folhas; Φ_i é a quantidade de fluxo de radiação incidente nas folhas diretamente do Sol ou da radiação difusa devido ao espalhamento atmosférico; Φ_{ρ} , por sua vez, é a quantidade de energia refletida pelas folhas; Φ_{α} é a quantidade de energia absorvida pelas folhas e, Φ_{τ} é a quantidade de energia transmitida através das folhas.

Ao se dividir cada variável pelo fluxo radiante original incidente, torna-se possível identificar o peso proporcional de cada destino tomado pela REM na interação com as folhas (Equação 4):

$$\frac{\Phi_{i_{\lambda}}}{\Phi_{i_{\lambda}}} = \frac{\Phi_{\rho_{\lambda}}}{\Phi_{i_{\lambda}}} + \frac{\Phi_{\alpha_{\lambda}}}{\Phi_{i_{\lambda}}} + \frac{\Phi_{\tau_{\lambda}}}{\Phi_{i_{\lambda}}} \quad (\text{equação 4})$$

Resultando na equação 5:

$$1 = \rho_{\lambda} + \alpha_{\lambda} + \tau_{\lambda} \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

1 é a unidade que representa a energia em interação com as folhas.

ρ_{λ} é a reflectância espectral hemisférica das folhas.

α_{λ} é a absorptância espectral hemisférica das folhas.

τ_{λ} é a transmitância espectral hemisférica das folhas.

O destino a ser tomado pela REM dependerá de inúmeros fatores atuantes em sua relação com as plantas, sendo que, para os sensores sobre plataformas orbitais, devido a limitações tecnológicas, a energia refletida ou emitida pelos alvos da superfície terrestre é a única passível de ser registrada, fazendo com que a energia transmitida e absorvida possa ser analisada somente de forma indireta (MOREIRA, 2004, p.75).

Dessa forma, Jensen (op.cit.) aponta o caráter prático de se pensar a interação da REM como aponta a equação 6:

$$\rho_{\lambda} = i_{\lambda} - (\alpha_{\lambda} + \tau_{\lambda}) \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

ρ_{λ} é a reflectância hemisférica das folhas em um dado λ .

i_{λ} é a quantidade de energia incidente nas folhas em um dado λ .

α_{λ} é a absorptância espectral das folhas em um dado λ .

τ_{λ} é a transmitância espectral das folhas em um dado λ .

Essa fórmula focaliza a energia refletida pelas plantas em um dado λ , já que para sensores sobre plataformas orbitais é a partir dele que outras variáveis podem ser também estimadas.

De acordo com Barret et al. (1992), os principais fatores que determinam a reflectância da REM em interação com a vegetação são: a geometria, morfologia, fisiologia e química das plantas, bem como o tipo de solo, o ângulo de incidência da radiação solar e as condições climáticas. No caso dos dosséis das comunidades vegetais, cabe observar que suas folhas em conjunto refletem menos do que as folhas isoladas. Isso justamente devido à questão dos ângulos de incidência, que são influenciados pelas inúmeras formas de disposições das folhas que compõem os dosséis. Quando o *LAI* é inferior a 100%, há também interferências de elementos, como os troncos, caules, sombreamento e o próprio solo na reflectância (PEREIRA, 1996, p.551).

Fica claro que coberturas vegetais com dosséis diferentes por possuírem plantas de tamanhos e formas variadas apresentam características de reflectância também diferenciadas.

Outra propriedade que chama a atenção na diferenciação da resposta espectral das plantas se relaciona a suas diferenciações químicas e fisiológicas, como já visto. Kokaly e Clark (1999, p.268) apontaram como razão primária da reflectância dos vegetais as propriedades ópticas de seus componentes, tais como: proteínas, lignina, celulose, amido e açúcares no *SWIR*, sendo possível lembrar ainda os pigmentos no *VIS*.

Uma parte da REM que não é refletida pelas plantas é absorvida por tais compostos bioquímicos em intensidades diferentes, de acordo com os comprimentos de ondas do espectro eletromagnético. Isso é uma questão fundamental, pois o fato de um componente absorver a REM em determinado intervalo de onda de forma relativamente singular, quando comparado com os demais componentes, acaba dando origem ao que é conhecida como feição diagnóstica do referido composto. O significado prático disso para a geobotânica por sensoriamento remoto reside no fato de o componente com a feição diagnóstica em questão ser o principal responsável pelos valores apresentados pelos *pixels* das imagens produzidas com base no intervalo de comprimento de onda, na qual ocorre a correspondente feição diagnóstica. Assim, torna-se possível utilizar faixas espectrais específicas para analisar com maior precisão os compostos também específicos da vegetação. Algo tanto mais viável, quanto maior for a resolução espectral dos sensores utilizados, justificando a importância desta para a prática da geobotânica por sensoriamento remoto.

De acordo com Curran (1989 p.272), de forma geral, os tipos de folhas das vegetações possuem espectros de reflectância com um padrão geral, desde a região do

visível até o infravermelho ondas curtas. A figura 4 mostra o padrão geral da assinatura espectral das plantas verdes que é analisado mais adiante.

Figura 4. Reflectância espectral das plantas verdes (Adaptado de Jackson, 1986).

A existência de um padrão geral não significa que os mais variados tipos de plantas possuem comportamentos espectrais exatamente iguais; ao contrário, ocorrem variações de intensidade em relação ao padrão geral entre as plantas verdes, e mesmo entre as secas. Isso porque os compostos bioquímicos que absorvem a REM não se fazem presentes com o mesmo teor em todas as plantas. Dessa maneira, é preciso atentar ao fato de as variações florísticas resultarem em diferentes quantidades de compostos bioquímicos, pigmentos, água e atividades dos fitocromos, bem como na área foliar e participação de cada órgão na composição da planta. Tais compostos podem variar inclusive dentro de uma mesma espécie vegetal, devido às condições ambientais diferenciadas, embora entre espécies diferentes o quadro seja mais expressivo (ALMEIDA et al. 2007, p.1954). O gráfico a seguir (figura 5) mostra como duas folhas em idades diferentes possuem um mesmo padrão geral de reflectância, no entanto, refletem a REM em quantidades diferentes.

Figura 5. Diferença de assinatura espectral de uma folha madura e uma folha nova (adaptado de COLWELL, 1983 apud LIU, 2006).

Uma vez que a interação da REM com os compostos foliares e arquitetura dos dosséis permite a identificação de coberturas vegetais diversificadas em termos florísticos ou fisionômicos, torna-se necessário o conhecimento específico da forma como se processa essa interação para concretização dessa possibilidade.

4.4.2 A região do visível e as feições diagnósticas dos pigmentos

Os pigmentos são elementos importantes para os vegetais, pois desempenham funções como a absorção de energia para uso no processo fotossintético (COUTINHO, 1970). A clorofila, por exemplo, é responsável pela fotossíntese a partir da qual se produz matéria seca (LIU, 2006, p.133).

Os pigmentos das plantas, com base na frequência de ocorrência, podem ser divididos em duas categorias: de ocorrência em massa, como as próprias clorofilas e os carotenos, e grupo dos fotossensores, os quais ocorrem apenas em pequenas proporções (MC DONALD, 2003, p.31).

De acordo com Coutinho (1970, p.54-55), os pigmentos presentes nas plantas podem ser reunidos em três grupos conhecidos como: tetrapirrólicos, carotenoides e antocianinas. Entre os tetrapirrólicos, o grande destaque é para as clorofilas: os pigmentos mais abundantes das plantas saudáveis. Quanto aos carotenoides, constituem-se no segundo grupo mais importante em ocorrência na natureza, subdividindo-se entre os carotenos (os mais comuns são o α e β) e as xantofilas. As antocianinas, por sua vez, se fazem presentes em flores e frutos, mas ocorrem também nas folhas e caules de algumas plantas, principalmente ornamentais.

Com relação aos pigmentos de ocorrência mais restrita (fotossensores), os mesmos são importantes por atuarem no controle da morfogênese das plantas, isto é, na germinação das sementes, intensidade do crescimento dos caules, na síntese dos pigmentos e na expansão da área foliar, entre outras atuações (MC DONALD, 2003, *passim*); (ALMEIDA, 2005, p.20); (COUTINHO, 1970, p.57).

O quadro 5 mostra os picos de absorção espectral de alguns pigmentos, enquanto a figura 6 mostra a assinatura espectral de alguns deles na região do visível, na qual o índice de absorção da REM se deve essencialmente a presença de pigmentos e fica em torno de 75% (MOREIRA, 2004, p.86).

Quadro 5- Picos de máxima absorção pelos pigmentos com base em Moreira (2004) e Almeida (2005).

Pigmentos	Máxima absorção da energia (nm)
Clorofila <i>a</i>	442; 676
Clorofila <i>b</i>	472; 656
α Caroteno	420; 440; 470
β Caroteno	425; 450 e 520
Xantofila (Lutol)	425; 445 e 475
Xantofila (Violoxanto)	425; 450 e 475
Fitocromos P660	660
Fitocromos P730	730

Figura 6. Assinatura espectral dos pigmentos na região do visível (BARET, 1999).

Observando a Figura 6, verifica-se na prática uma sobreposição de picos de absorção dos pigmentos entre 400 e cerca de 525 nm, enquanto as clorofilas possuem picos de absorção menores; contudo, mais isolados na região do vermelho. De toda forma, de acordo com Jackson (1986, p.268) é na região do verde que ocorre o pico de reflectância

no VIS (entre 520 e 550 nm) enquanto ocorre maior absorção na região do azul e vermelho, basicamente devido às clorofilas.

O conhecimento dos principais picos de absorção das clorofilas e carotenoides é importante, pois permite acessar informações sobre o estado fisiológico das plantas a partir de sensores remotos. Dessa forma, com relação às clorofilas, tem-se que se fazem presentes em quantidades menores nas plantas mais jovens, além de diminuírem de quantidade com o advento da senescência. Isso ocorre também quando estão submetidas a ambientes estressantes devido à presença de elementos químicos em teores excessivos nos solos, ou mesmo, devido à falta de outros nutrientes essenciais ao desenvolvimento da vegetação. Conforme as clorofilas diminuem de quantidade nas plantas, já que são os primeiros pigmentos a se degradarem, as respostas espectrais dos carotenoides e demais pigmentos tornam-se menos mascaradas durante os períodos já mencionados, tornando-se relevantes na caracterização das comunidades vegetais. Ainda assim, com essas condições, a reflectância na região do azul e vermelho aumenta devido à degradação das clorofilas (ALMEIDA, 2005, *passim*); (JACKSON, op. cit).

4.4.3 A região do infravermelho próximo e os índices de vegetação

O quadro de destacável participação dos pigmentos na absorção da REM na região do visível se altera na porção do *NIR* (Infravermelho próximo), quando os pigmentos já não mais desempenham o mesmo papel em sua absorção. Na realidade, nem mesmo outros compostos bioquímicos ou a água foliar possuem elevados picos de absorção nessa faixa espectral. Como resultado, apenas algo entre 5 e 10% da REM é absorvida, sendo a porção restante refletida ou transmitida. O relativo e abrupto aumento da reflectância por parte da

vegetação nessa região forma a feição espectral conhecida como *red edge*. Ao contrário do que ocorre na região do visível, onde a reflectância possui relação inversa com o tamanho da área foliar das plantas, na região do infravermelho próximo, a reflectância está diretamente relacionada com o índice de área foliar dos dosséis das comunidades vegetais. Ou seja, será tanto maior quanto maior for esta (JENSEN, 2000 p.341-342).

Uma vez que a reflectância no infravermelho próximo depende, portanto, da arquitetura dos dosséis, e que o índice de reflectância é elevado, tem-se que a região pode informar consideravelmente sobre o albedo da vegetação.

As regiões do Vermelho e Infravermelho Próximo foram apontadas por muitos autores como as faixas espectrais detentoras de cerca de 90% das informações ligadas aos vegetais. Por isso, foram elaborados inúmeros índices de vegetação baseados nelas, os quais separam com eficiência o que é vegetação daquilo que não é (ALMEIDA, 2005, p.48).

Quanto aos índices espectrais, tem-se que podem consistir na diferença entre bandas, na razão entre elas, ou mesmo na combinação dessas operações. Entre vários índices, Liu (2006, *passim*) mencionou, entre outros, a existência de três, considerados aqui como exemplos. São eles: RVI (*Ratio Vegetation Index*) (equação 7); DVI (*Difference Vegetation Index*) (equação 8) e NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (equação 9).

$$\text{i) } RVI = \frac{NIR}{VIS} \quad (\text{equação 7})$$

$$\text{ii) } DVI = NIR - VIS \quad (\text{equação 8})$$

$$\text{iii) } NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} \quad (\text{equação 9})$$

Enquanto o RVI e o DVI são índices bastante sujeitos a distorções de resultados devido a interferências da atmosfera, o NDVI é menos susceptível a tais influências, além de minimizar os efeitos da variação do ângulo solar e de visada dos sensores. O quociente do NDVI varia entre -1 e 1 sendo que, quanto mais próximo de 1, maior a *LAI*. Já os valores negativos e próximos a zero representam solo nu e interferências das nuvens (LIU, 2006, *passim*). De toda forma, os índices espectrais mencionados se baseiam nos efeitos gerados pela absorção da REM por parte dos pigmentos ao utilizarem a região do Visível, bem como na fraca absorção dos compostos foliares ao utilizarem a região do Infravermelho Próximo.

4.4.4 A Região do infravermelho ondas curtas e as feições diagnósticas da água foliar

O teor de água foliar disponível nos dosséis é um item relevante, já que, além de ser um componente essencial à vida dos vegetais, também está relacionado com as características e condições do solo (ALMEIDA et al., 2007).

De forma geral, a água disponível no solo é absorvida pelas raízes das plantas pelo processo passivo da osmose até que estas atinjam a condição de saturação. Existem plantas que continuam absorvendo água mesmo após atingirem o estado de saturação; porém, eliminam o excesso pelo processo de gutação. A água retirada do solo pelas raízes das plantas é transportada até as folhas, passando antes pelos caules dos vegetais, sendo que a

maior parte da água absorvida é lançada na atmosfera na forma de vapor, com apenas uma pequena parte sendo utilizada nos processos metabólicos (COUTINHO, 1970, *passim*).

Ao se buscar detectar através do sensoriamento remoto as respostas espectrais das folhas, geradas particularmente pela água foliar, é possível constatar que a mesma possui alguns picos discretos de absorção no NIR, além de dominar a reflectância das folhas não secas dos dosséis na região do SWIR (ALMEIDA, 2005, p.22) ao ponto de muitos pesquisadores chamarem essa região de a “região de absorção da água” (JACKSON, 1986, p.268). Nela, conforme observou Jensen (2000, p.343), a reflectância dos vegetais está profundamente associada ao teor de água nas folhas. Logo, ela aumenta com a diminuição da quantidade de água foliar e diminui, conseqüentemente, com o aumento de concentração desse componente.

Observando a assinatura espectral da água foliar em diferentes teores⁵ (fig. 7), percebe-se, como característica geral, uma correlação positiva entre o aumento de absorção da REM com o aumento do comprimento das ondas eletromagnéticas. Percebe-se ainda como a quantidade em teor de água foliar afeta a quantidade de REM absorvida. Cabe, no entanto, observar também que no SWIR ocorre ainda absorção por parte da matéria seca, como será visto mais adiante, e poderá ser constatado que tais compostos absorvem principalmente a partir de cerca de 1.900 nm. Assim, no intervalo entre 1.300 nm e 1890 nm, ocorrem as feições diagnósticas mais puras da água foliar.

⁵ Em experimento Kokaly e Clark (1999 p.282) observaram os efeitos que diferentes teores de água possuíam na assinatura espectral da água foliar. O experimento consistiu basicamente em observar o espectro de reflectância de uma folha seca, sem água, e acompanhar as alterações na reflectância da folha cada vez que se adicionava 10% de água até alcançarem 80% de água adicionada.

Figura 7. Espectro de reflectância de folha seca com acréscimo de água em incrementos de 10% de água (adaptado de KOKALY; CLARK, 1999).

4.4.5 A região do infravermelho ondas curtas e as feições diagnósticas de compostos bioquímicos

Além de pigmentos e água, as plantas possuem milhares de outros compostos bioquímicos que as formam (ELVIDGE, 1990). Ao se observar a assinatura espectral da celulose, hemicelulose, lignina, amido, açúcar e proteínas na região do *SWIR* (fig.8) percebe-se que as maiores feições diagnósticas ocorrem a partir de ondas com comprimentos superiores a 1890 nm em situação de intensa superposição de picos de absorção. Apesar da existência dessas feições diagnósticas, a água foliar dificulta o registro das respostas espectrais desses compostos bioquímicos, uma vez que absorve fortemente a radiação no *SWIR* (fig.7). Por esse motivo, a região do *SWIR* atualmente é pouco utilizada para o registro das respostas espectrais dos compostos bioquímicos, pairando ainda dúvidas sobre essa possibilidade por parte de alguns pesquisadores (VICENTE; SOUZA FILHO; PEREZ FILHO, 2006, p.1921).

Figura 8. Assinatura espectral de compostos bioquímicos (BARET, 1999).

De acordo com estudo feito por Elvidge (1990), tanto a água como os compostos bioquímicos têm na ligação O-H o motivo da absorção da REM. Por isso, a água, que corresponde com algo entre 40% e 80% do peso das folhas verdes, mascara a resposta espectral dos demais compostos, com persistência desse quadro inclusive em folhas amarelas, nas quais os teores de água permanecem ainda elevados.

Almeida (2005, p.23) comparou o gráfico da assinatura espectral da água foliar em diferentes teores apresentado por Kokaly e Clark (1999) (fig.7) com o gráfico das assinaturas espectrais dos compostos bioquímicos fornecidos por Baret (1999) (fig. 8). Ele observou que o aumento da absorção da REM devido ao aumento no teor da água não é constante, possuindo diferenças máximas em 1450 nm e 1940 nm com diferenças mínimas no intervalo entre 2150 nm e 2350 nm. Os maiores picos de absorção dos compostos

bioquímicos, entretanto, se situam a partir de 1890 nm, sendo que o amido possui picos nas regiões de 1750 e 2150 nm (o maior) e a lignina em 2300 nm, abrangendo, portanto, o intervalo espectral onde os diferentes teores de água pouco influem no espectro de reflectância das folhas. Tais resultados permitiram vislumbrar a possibilidade de se obter algum traço de informação sobre os compostos bioquímicos nessa janela deixada pela água (entre 2150 nm e 2350 nm). Observa-se que o método sistêmico busca trabalhar com informações dos compostos bioquímicos possíveis de serem extraídas da região do SWIR.

4.5 O método sistêmico como instrumento de realce das respostas espectrais das coberturas vegetais

Após terem sido considerados os principais aspectos da interação entre a REM e as plantas, torna-se mais fácil o entendimento do realce de imagens pelo método aqui utilizado.

O método de abordagem e processamento sistêmico de imagens multiespectrais utilizado na etapa de realce espectral neste trabalho foi elaborado, como já mencionado, por Almeida (2005). O ordenamento no uso de técnicas, proposto pelo método, aborda a planta como um sistema dependente do meio onde se encontra. Tal abordagem é feita através do uso intenso das resoluções espectrais disponíveis nos sensores a partir da adoção de técnicas apropriadas no processamento digital das imagens. O que se busca com o método é a identificação de variações das coberturas vegetais devido a alterações nas características do ambientes nos quais vivem. É princípio teórico do método que comunidades vegetais diferentes possuem interações heterogêneas com a REM. Mas, se muitas vezes as diferenças espectrais registradas nas imagens e produzidas pela interação entre a REM e as comunidades vegetais heterogêneas são relativamente pequenas, então torna-se necessário realçar tais feições, a fim de tornar visível o que anteriormente poderia ser visualizado apenas com muita dificuldade, ou mesmo, nem ser percebido pelos olhos humanos.

Tomar a planta como um sistema por meio de tal método significa considerá-la formada por pigmentos, água e inúmeros compostos bioquímicos, bem como pelos dosséis, em quantidades e formas diferentes, conforme o tipo de vegetação, suas espécies e o ambiente onde vivem.

Analisando a estrutura básica da metodologia adotada para o realce de imagem tal como foi proposta, tem-se que a mesma faz uso de até quatro técnicas de processamento, cada qual com uma finalidade específica e em momentos intencionalmente pré-determinados. As técnicas propostas pelo método em suas sequências lógicas são:

- Razão de bandas
- Análise de componentes principais.
- Montagem de composição colorida.
- Filtro de convolução passa-baixa.
- Introdução da imagem de albedo com a informação textural nas composições formadas.

As técnicas mencionadas não se constituem em uma inovação no contexto do sensoriamento remoto, pois são amplamente utilizadas. O fato inovador, no entanto, encontra-se no embasamento filosófico de natureza sistêmica do método, o qual determina a forma e os motivos das aplicações de tais técnicas, trazendo consigo propostas teóricas importantes para o desenvolvimento da Geobotânica por Sensoriamento Remoto, especialmente em áreas de florestas tropicais e equatoriais.

4.5.1 Etapa 1 – Razão de bandas

A primeira etapa do processamento utilizado consiste na aplicação da razão de bandas sobre um conjunto original de imagens com o objetivo de promover o realce das respostas espectrais associadas a componentes mais específicos da vegetação (água foliar, pigmentos e outros compostos bioquímicos).

Esse processo pode ser entendido na medida em que as imagens são formadas por *pixels* com seus respectivos valores de níveis de cinza, radiância ou reflectância, formados a partir da radiância refletida⁶ pela vegetação e registrada pelos sensores.

A razão de bandas consiste na divisão dos valores que formam uma imagem em determinada região espectral, pelos valores correspondentes em outra banda espectral (SABINS, 1986 p.263). Conforme Schowengerdt (2007, p.186) a equação básica dessa transformação espectral de natureza não linear pode ser representada pela equação 10:

$$R_{mn}(x, y) = \frac{DN_m(x, y)}{DN_n(x, y)} \quad (\text{equação 10})$$

Lillesand e Kiefer (1994) consideraram as imagens geradas pela razão entre bandas como “*intensity blind*”, na medida em que alvos do terreno com reflectâncias absolutas bastante desiguais podem apresentar valores iguais nos índices gerados, bastando, para isso, que os quocientes resultantes sejam os mesmos (fig.9).

Banda m				Banda n				Razão de Bandas		
<u>100</u>	120	105	/	<u>20</u>	10	35	=	<u>5</u>	12	3
105	120	<u>50</u>		35	10	<u>10</u>		3	12	<u>5</u>
90	140	100		45	5	20		2	28	5

Figura 9. Ilustração da geração de um índice espectral “*intensity blind*”.

Nas imagens resultantes, também conhecidas como índices espectrais, tanto mais escuro será um *pixel* quanto maior for o valor denominador em relação ao numerador, pois resultará em um *pixel* com baixo valor. O contrário também é verdadeiro, ou seja, tanto

⁶ Poderia ser o fluxo de REM emitido caso se estivesse trabalhando também com o TIR.

mais claro será um *pixel*, quanto maior for o valor do numerador em relação ao denominador, pois o valor resultante será mais alto. Quando o numerador e o denominador possuem o mesmo valor, não há diferenças nas informações, que por consequência serão suprimidas (SABINS, 1986). Assim, um problema desse recurso é a supressão da informação textural, pois o albedo é suprimido.

Apesar da perda de informação textural como fato negativo em um primeiro momento, Almeida (2005, p.53) apontou que o realce dos compostos bioquímicos da vegetação pela razão de bandas se dá exatamente por meio da supressão de respostas espectrais iguais entre a imagem de referência (numerador) e as imagens índices (denominadores).

É possível apontar a lógica do uso da razão de bandas em um processamento voltado à geobotânica com base no fato de que, ao se escolher uma imagem de referência em uma porção do espectro geralmente na qual a vegetação mais reflete a REM⁷, e uma imagem índice em outros comprimentos de ondas que formem feições de absorção, conforme os compostos bioquímicos que se deseja realçar, estar-se-á colocando em evidência tais componentes na imagem resultante em intensidade proporcional às suas abundâncias.

É comum o uso de imagens relativas ao NIR como referência. Tal fato pode ser explicado se for recordado que a REM no intervalo entre 750 e 1.300 nm é fracamente absorvida pela vegetação. Assim, as imagens de áreas florestadas tendem a possuir valores relativamente altos no NIR, quando comparadas com imagens em outros comprimentos do visível ou SWIR. Isso porque diversos compostos bioquímicos são responsáveis pelo aumento da absorção da REM, tanto no VIS como no SWIR. Dessa forma, na imagem

⁷ Geralmente na região do NIR, embora não obrigatoriamente, já que nessa porção do espectro o comportamento espectral das folhas é relativamente independente em relação aos pigmentos, aos teores de água foliar e compostos bioquímicos.

resultante da razão de bandas, quanto maior for a absorção de REM nas demais bandas espectrais, maior será o quociente, devendo realçar, portanto, as feições espaciais de absorção de determinado(s) componente(s).

Com relação aos compostos foliares que se busca realçar com a razão de bandas, os mesmos podem ser apontados como sendo, de acordo com a resolução espectral dos sensores, as clorofilas *a* e *b*, os carotenoides, a antocianina, os fitocromos P730 e P660, a lignina, a celulose, o nitrogênio e a água foliar. No caso do sistema ASTER, existe a possibilidade de serem realçados os elementos mencionados no quadro 6, que estão acompanhados dos respectivos índices.

Quadro 6- Índices espectrais para o sensor ASTER (adaptado de ALMEIDA, 2005).

Compostos/propriedade foliar	ASTER (Índices Espectrais)
Clorofilas <i>a</i> e <i>b</i>	Banda1/Banda2
Clorofilas <i>a</i> e <i>b</i> e carotenoides	Banda3/Banda1
Clorofilas	Banda3/Banda2
Água foliar (LWC)	Banda3/Banda4
Compostos bioquímicos	Banda3/Banda5*Banda6*Banda7*Banda8
Compostos bioquímicos (ênfase no Amido)	Banda3/Banda5
Compostos bioquímicos (ênfase na Lignina)	Banda3/Banda8

A escolha das bandas a formarem os índices espectrais baseados no método sistêmico se baseia no objetivo de realçar a presença e respostas espectrais dos compostos da vegetação, não se aplicando a observação de que “[...] Frequentemente, o analista simplesmente monta várias razões e então seleciona a de maior apelo visual” (JENSEN, 1996, p.153, tradução nossa).

4.5.2 Etapa 2 – Análise de Componentes Principais (ACP)

Na segunda etapa do método, os índices espectrais gerados pela aplicação da técnica de razão de bandas são submetidos a um tratamento estatístico conhecido como análise de componentes principais (ACP).

A ACP é uma técnica estatística de natureza multivariante. De acordo com Landim (2006), tais técnicas, em geral, preocupam-se com a relação existente entre variáveis. Nesse contexto, tem-se que:

A análise de componentes principais procura interpretar a estrutura de um conjunto de dados multivariados (...) partir da respectiva matriz de variâncias-covariâncias ou de correlações, pela obtenção de ‘autovalores’ e ‘autovetores’. Consiste numa transformação linear das ‘m’ variáveis originais correlacionadas entre si em ‘m’ novas variáveis ortogonais... (LANDIM, 2006, p.4.).

A transformação promovida pela ACP, nos dados das imagens originais, ocorre de forma que: “a primeira componente principal retenha a maior quantidade de variância possível, e cada componente seguinte retenha progressivamente menos variância” (SUMNER, 1978, p.69, tradução nossa).

No método sistêmico, em um primeiro momento, o objetivo da aplicação da ACP é “separar as parcelas de informação redundante e as de informação espúria, bem como concentrar a informação de interesse em componentes específicas” (ALMEIDA, 2005, p.57). Ter tal objetivo em foco é relevante uma vez que a técnica geralmente é aplicada apenas com a finalidade de reduzir a dimensionalidade de dados espalhados em várias bandas de uma imagem multiespectral, concentrando-os em poucas imagens (ou componentes principais (CP), como podem ser chamadas). Isso permite a formação da composição colorida falsa cor, que possui, em apenas três componentes principais, praticamente todos os dados espalhados anteriormente por várias bandas (NOVO, 1989, p.231).

Para entender melhor o funcionamento e utilidade da ACP no contexto do sensoriamento remoto, torna-se preciso compreender que os valores dos *pixels* de imagens formadas por bandas espectrais adjacentes são geralmente bastante correlacionados entre

si. Isso significa que, quando o valor de um *pixel* em uma banda é conhecido, torna-se mais previsível o valor do *pixel* correspondente nas bandas adjacentes, o que representa redundância de dados (SABINS, 1986, p. 261).

O uso de bandas altamente correlacionadas na montagem de composições coloridas forma composições com baixo grau de contraste (WILKIE; FINN, 1996, p.156-157). Portanto, uma vez que é verificada a existência de correlação entre um conjunto de imagens, é possível realizar um tratamento estatístico dos dados presentes nas mesmas por meio da ACP. A partir de critérios matemáticos e estatísticos, com a aplicação dessa técnica, ocorre a formação de CPs não correlacionadas, o que permite a formação de composições coloridas com maior nível de contraste, além da possibilidade de verificação da origem dos dados de cada CP gerada, analisando, a princípio, a matriz dos autovetores.

A repercussão dessa técnica, para os objetivos do método sistêmico, é que, em um primeiro momento, ao se aplicar a ACP sobre os índices espectrais, os quais possuem dados realçados sobre os compostos bioquímicos da vegetação, torna-se possível construir composições coloridas com maior nível de contraste, além de se manter o controle sobre a origem das informações contidas em cada CP. Em um segundo momento, a repercussão do uso da ACP é que sua aplicação sobre as imagens originais, nas quais a variância está distribuída entre várias bandas, faz grande parte desta se concentrar na CP1, a qual passa a servir como fonte de informação sobre o albedo.

Ao se buscar entender a ACP, dois conceitos estatísticos ganham importância relevante: a variância e a covariância. Enquanto a primeira pode ser definida como a média quadrada do desvio de uma população (ou amostra) em relação à sua média aritmética, mostrando com isso o grau de dispersão dos dados em relação a essa média, a segunda é uma medida relacional da variação dos dados de um par de variáveis (bandas espectrais,

por exemplo) (DAVIS, 1986) ou, ainda, uma medida que mostra o quão similar esse par de variáveis é (MILMAN, 1999, p.103).

As bases para a obtenção das CPs são as matrizes de variâncias-covariâncias (ou matriz S) e de correlação (ou matriz R). Na matriz S, a diagonal principal informa sobre a variância de cada banda espectral, enquanto fora dela se encontram as covariâncias entre as bandas. A obra de Richards e Xiuping (2006) é uma referência para o entendimento do processo de geração dessa matriz.

Com base na obra mencionada, é possível verificar que, para se obter a matriz S, o primeiro passo é o encontro das médias aritméticas dos valores dos *pixels* de cada imagem utilizada, as quais descrevem o que, de acordo com Richards e Xiuping (op.cit.), pode ser chamado de vetor do *pixel* médio (*mean pixel vector* - abordando a questão também de forma geométrica) em um espaço multiespectral. Isso é possível pela aplicação da equação 11:

$$m = \mathcal{E}(x) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x_k \quad (\text{equação 11})$$

Onde:

m é o vetor do *pixel* médio.

x_k é o valor de um *pixel* que compõe a imagem em um total k .

A partir da obtenção do vetor do *pixel* médio, a matriz S pode ser obtida por meio da fórmula representada pela equação 12.

$$\sum_x = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (x_k - m)(x_k - m)^t \quad (\text{equação 12})$$

Onde:

$\sum_x$ é a matriz de variâncias-covariâncias (no caso estimativa).

x_k é a matriz coluna com os valores de um *pixel* em cada banda.

m é a matriz coluna que descreve o vetor do *pixel* médio.

K são os números de produtos de matrizes existentes.

$()^t$ é a matriz transposta.

As variâncias de cada banda estão em uma escala quadrada em relação aos dados originais e sua raiz forma o desvio padrão. Ambos os índices informam sobre a dispersão dos dados de cada banda, sendo medidas unidimensionais. A covariância, por sua vez, é uma medida bidimensional, e tem a função, no contexto desta pesquisa, de mostrar a relação existente na forma de dispersão dos dados entre imagens de bandas diferentes (variáveis). Embora a interpretação numérica da covariância não seja algo óbvio, o mais importante na sua análise, em um primeiro momento, é o sinal (se positivo ou negativo) e não tanto o seu valor absoluto (SMITH, 2006). De acordo com Smith (op. cit.), o sinal positivo de uma covariância indica um padrão de dispersão de dados entre duas variáveis em um mesmo sentido, enquanto o sinal negativo evidencia uma dispersão correlacionada de forma inversa. A covariância zero, por sua vez, indica independência entre os dados das bandas envolvidas.

A matriz de coeficientes de correlação facilita mais a análise da relação entre duas variáveis, como as imagens e os índices espectrais, já que se trata de uma matriz com dados padronizados. Nessa matriz, na diagonal principal, encontram-se as variâncias unitárias entre as bandas e fora dela, os coeficientes de correlação entre as variáveis, os quais indicam “o nível de intensidade que ocorre na correlação entre as variáveis” (CORREA, 2003) e Os podem ser obtidos, de acordo com Richards e Xiuping (2006), pela aplicação da equação (13).

$$Q_{ij} = \frac{v_{ij}}{\sqrt{v_{ii} v_{jj}}} \quad (\text{equação 13})$$

Onde:

v_{ij} é a covariância entre duas variáveis.

v_{ii} e v_{jj} são as variâncias de cada variável.

Os coeficientes de correlação resultantes podem ser índices que vão de (1) a (-1), pois, sendo razões, tem-se que embora a covariância possa se igualar ao produto dos

desvios padrões das variáveis em questão, as mesmas não podem ultrapassá-lo (DAVIS, 1996, p.38).

O coeficiente de correlação zero indica a não correlação linear entre as variáveis comparadas, ao passo que os demais índices indicam algum grau de correlação. Assim, que o índice (1) representa o maior grau de correlação possível, enquanto os sinais (positivo ou negativo) indicam, respectivamente, correlação positiva (no mesmo sentido) ou negativa (relação inversa) (DAVIS, op.cit.). O quadro 7 apresenta um padrão qualitativo de interpretação desses valores de acordo com Correa (2003, p.109-110).

Quadro 7- Classificação qualitativa dos coeficientes de correlação.

Coeficientes de correlação	Grau qualitativo de correlação
0 a 0,3 ou $\ast 100 = (0\% \text{ a } 30\%)$	Correlação muito difícil de ser estabelecida ou muito fraca.
0,3 a 0,6 ou $\ast 100 = (30\% \text{ a } 60\%)$	Correlação fraca.
0,6 a 1 ou $\ast 100 = (60\% \text{ a } 100\%)$	Correlação de média a forte.

Se por um lado a ACP pode ser feita tanto a partir da matriz S quanto a partir da matriz R, por outro, é preciso ficar claro que as componentes principais geradas a partir de cada matriz são diferentes umas das outras, embora tal diferença não tenha sido ainda completamente explorada (MATHER, 2004, p.157). Isso é um dado importante de ser observado, uma vez que Almeida (2005) também não se deteve nessa discussão.

A princípio, tanto a ACP feita a partir da matriz S quanto a da R devem produzir imagens não correlacionadas; porém, a forma como isso ocorre é diferente, pois o impacto das variâncias unitárias e covariâncias padronizadas da matriz de correlação é significativamente importante.

Quando a ACP é aplicada a partir da matriz S, a definição do peso de importância de cada imagem original (índice espectral) na formação das novas imagens é definido

principalmente com base no tamanho das variâncias originais, pois, “embora a ACP não ignore a covariância ou a correlação, ela se concentra nas variâncias” (JOLLIFFE, 2002, p.2, tradução nossa). Se as diferenças entre as variâncias das imagens forem grandes e não tiverem grande importância para o processamento delas, obviamente essa forte influência da variância na ACP será algo negativo e será retratado nas novas imagens obtidas.

Para o caso da matriz de correlação, na qual as variâncias são todas iguais (unitárias), torna-se evidente que essa matriz força todas as imagens originais ou índices espectrais a terem um mesmo peso na análise de componentes principais (JENSEN, 1996, p.179). Com isso, a distribuição das variâncias originais é feita com base na correlação entre os dados das imagens ou no padrão espacial de comportamento espectral, uma vez que os efeitos das diferenças nas magnitudes das variâncias dessas variáveis são removidos (MATHER, 2004, p.151).

É preciso observar que o uso da matriz S e de seus autovetores mascara parcialmente a influência de uma imagem original sobre uma nova, com base no padrão espacial de comportamento espectral dos alvos das imagens. Com isso, a interpretação da origem das informações, contida em cada CP e apontada pelos autovetores torna-se mais ambígua⁸. Cabe observar também que, como efeito da padronização das variáveis e uso da matriz R , a mesma “tende a inflar as variáveis cujas variâncias são pequenas e reduzir a influência das variáveis cuja variância é larga” (DAVIS, 1986, p.536, tradução nossa). Por isso, é preciso reflexão sobre a importância da variância para as finalidades de determinado processamento, já que as imagens obtidas não serão iguais.

⁸ O peso de participação de uma variável na formação de certa CP é mostrado pelos autovetores, mas os *factor loadings*, que mostram a influência de uma variável original sobre uma CP, a partir da correlação entre as mesmas, pode não indicar o mesmo que os autovetores, criando uma ambigüidade para interpretação das informações. Esse tema é retomado no capítulo sobre a análise dos resultados.

De toda forma, para ambas as matrizes, a fórmula de transformação realizada pela ACP sobre as imagens ou índices originais pode ser representada, conforme Richards e Xiuping (2006, p.141) pela equação 14:

$$y = D^t x \quad (\text{equação 14})$$

Onde :

y representa os valores dos *pixels* das componentes principais.

D^t é a matriz de transformação que é a transposta da matriz de autovetores.

x são os valores dos *pixels* das imagens originais.

A origem da matriz de transformação remete à álgebra linear e, conforme Davis (1986, p.126), relaciona-se com a equação 15, que define as condições para existência dos autovetores:

$$[A] [X] = \lambda [X] \quad (\text{equação 15})$$

Onde:

$[A]$ é a matriz de variâncias-covariâncias ou correlação.

$[X]$ é um autovetor.

$[\lambda]$ é um escalar ou o autovalor.

Em termos práticos, os autovalores são quantias que mostram quanto da variância, ou seja, informação original, foi capturada por cada uma das componentes principais geradas, enquanto os autovetores definem o peso de participação de cada imagem original, ou índice espectral, na formação de cada CP (RICHARDS; XIUPING, 2006, *passim*); (SUMNER, 1978, p. 71). Com a aplicação da ACP, são geradas tanto a matriz dos autovalores como a dos autovetores, através das quais é possível acessar respectivamente as informações sobre a quantidade de variância contida em cada CP e a participação de cada imagem original na composição delas.

Para se encontrar os autovetores de uma matriz, primeiramente são obtidos os autovalores através da equação característica 16, para então se obter os autovetores com a equação 15, reescrita na forma da equação 17. Uma vez encontrados os autovetores, os

mesmos são padronizados para um valor unitário (RICHARDS; XIUPING, op. cit.); (DAVIS, 1986, *passim*); (MILMAN, 1999, 119).

$$|A - \lambda I| = 0 \quad (16)$$

$$[A - \lambda I] [X] = 0 \quad (17)$$

Analisando os pontos positivos e negativos da técnica, tem-se que, apesar de poder aumentar o contraste de imagens com alto grau de correlação e organizar os dados de interesse dos pesquisadores e analistas, a ACP também apresenta a desvantagem dos valores dos *pixels* das CPs não estarem ligados de forma direta às respostas espectrais dos alvos imageados. Como consequência, apenas o conhecimento das características espectrais dos alvos pode não ser suficiente para a identificação de feições presentes nas CPs, algo que acaba requerendo o auxílio de informações extraídas de outras fontes, como fotografias aéreas e mapas temáticos, dependendo do tipo de aplicação (WILKIE; FINN, 1996, p.159-160). No caso desta pesquisa, porém, a matriz dos autovetores e o conhecimento das respostas espectrais realçadas nas diversas razões de bandas são utilizadas para interpretar as informações contidas nas CPs

4.5.3 Etapa 3 –Montagem de composições coloridas

Na terceira etapa do método sistêmico são escolhidas as componentes principais que devem formar as composições coloridas falsa cor. Uma das fontes de informações que pode ser consultada e auxilia na escolha das CPs é a matriz de autovetores.

Nos processos de escolha das CPs a formar as composições, em várias aplicações, é comum se descartar as últimas, pelo fato de suas poucas variâncias serem consideradas apenas ruídos (EASTMAN, 2006, p.35). Contudo, dependendo dos objetivos das

pesquisas, esse pode ser um procedimento equivocado, uma vez que não se pode descartar a presença de informações importantes nas mesmas, as quais podem estar relacionadas às características do meio físico (RICHARDS; XIUPING, 2006, p.149). Dessa forma, cabe considerar que, caso o objetivo da aplicação da ACP seja apenas a redução da dimensionalidade dos dados, como ocorre na extração da imagem de albedo no próprio método sistêmico, as demais CPs não possuem grande importância. Contudo, se o objetivo for a obtenção de imagens não correlacionadas, com uma nova organização dos dados, como na aplicação da ACP sobre os índices espectrais, também no método sistêmico, mesmo a última CP deve ser cuidadosamente analisada. De acordo com o método, cada CP informa sobre o índice (ou índices) de maior peso na sua formação.

A cada CP escolhida para montagem da composição colorida é atribuída uma cor conforme o sistema RGB. As cores e tonalidades dentro do sistema RGB são formadas pela combinação das diversas tonalidades de vermelho, verde e azul que, por sua vez, variam conforme os níveis de cinza presentes em cada imagem. O modelo RGB pode ser representado através de um cubo no qual existem três eixos (preto-vermelho, preto-verde e preto-azul) (fig. 10). O vetor que determina as cores dentro do cubo pode ser deslocado nesse sistema de coordenadas formando as diversas cores e tonalidades, como o ciano, o branco, o amarelo e o magenta.

Figura 10. Modelo RGB representado através de um cubo (adaptado de Mather, 2004)

4.5.4 Etapa 4 – Aplicação do filtro de convolução passa-baixa

O quarto momento dos procedimentos metodológicos é reservado para a aplicação opcional do filtro de convolução passa-baixa, com a finalidade de se obter uma maior uniformização de zonas homólogas e o realce de respostas semelhantes das composições coloridas feitas a partir das CPs.

Uma vez que as CPs ressaltam e organizam os dados sobre os compostos bioquímicos específicos da vegetação em imagens também específicas, permitindo a análise do padrão de distribuição de florestas, a filtragem passa-baixa, na etapa posterior, serve para realçar as respostas dominantes ao minimizar os ruídos e feições espectrais de caráter mais isolado.

Ao analisarem a natureza da técnica do filtro de convolução passa-baixa, Lillesand e Kiefer (1994) apontaram seu objetivo geral como sendo, de um lado, o realce da baixa frequência de uma imagem e, de outro, a minimização dos componentes de alta frequência.

Por componentes de alta frequência devem ser entendidos os poucos *pixels* isolados com valores destoantes dos *pixels* vizinhos, produzindo, consequentemente, feições com

contrastes abruptos nas imagens. As feições de baixa frequência, ao contrário, são aquelas representadas relativamente por inúmeros *pixels* nas quais a transição de valores destes é mais suave. A figura 11 ilustra o efeito de minimização de um DN de alta frequência através de um filtro de convolução passa-baixa com máscara 3x3. É possível perceber claramente, como resultado de sua aplicação, uma maior aproximação do valor do *pixel* central, mais destoante de seus vizinhos na imagem original, para uma situação mais equilibrada na imagem transformada.

Filtro 3x3		DNs Originais		DN Transformado
1/9	1/9	1/9		
1/9	1/9	1/9		
1/9	1/9	1/9		

Convolução:

$$1/9(67)+1/9(67)+1/9(72)+1/9(70)+1/9(68)+1/9(71)+1/9(72)+1/9(71)+1/9(72) = 530/9 = 70$$

Figura 11. Ilustração da atuação de um filtro passa baixa baseado em Lillesand, 1994.

Ainda com relação à natureza da técnica, é possível relembrar que “a filtragem espacial é uma transformação que depende do contexto no qual se insere um dado pixel” (NOVO, 1989). Isso porque o novo valor gerado para o *pixel* central depende dos valores dos *pixels* vizinhos (além de seu próprio valor a ser modificado, como visto na ilustração). Assim trata-se de uma média dos valores envolvidos (o que depende do tamanho do filtro). A transformação dos valores realizada *pixel* por *pixel* é determinada pelo algoritmo de filtragem.

Ao promover uma maior uniformização dos valores dos *pixels* destoantes nas imagens digitais, é possível entender que a técnica é aplicada no método sistêmico para melhorar a visualização das informações mais dominantes, facilitando a identificação do padrão de distribuição das comunidades vegetais. Tal técnica é capaz ainda de diminuir eventuais ruídos existentes, quer por erros na transmissão do sinal dos sensores, quer por diferenças na sensibilidade dos mesmos (NOVO, op.cit.).

4.5.5 Etapa 5 – Introdução da imagem de albedo

O quinto passo é a introdução da imagem de albedo, anulado com a aplicação das razões de bandas sobre os canais originais.

Ao se conceituar o albedo terrestre, tem-se que o mesmo se refere à reflectância da REM por parte da superfície da terra no intervalo do espectro eletromagnético refletido (LIU, 2007, p.253). No caso da presente pesquisa, em que o relevo é basicamente plano e as unidades florestais são os alvos de interesse, o albedo é relacionado à reflectância principalmente das coberturas vegetais. Estas, sendo diferentes, produzirão albedos diferenciados, visto que a reflectância associada estritamente à vegetação está na dependência da geometria das folhas (consequentemente também do dossel), da fisiologia da planta e de sua química (BARRET et al., 1992). O albedo é responsável pela informação textural das imagens.

De acordo com Mather (2004, p. 238), enquanto o nível de cinza de um único *pixel* pode ser denominando como tom, a variação dos tons de cinza entre os *pixels* vizinhos formam a informação textural da imagem.

Para a recuperação da informação textural perdida com a aplicação da razão de bandas através da obtenção da imagem de albedo, a melhor forma, segundo Almeida

(2005, p.62), é aplicar a ACP sobre um subconjunto das bandas originais (escolhidas conforme as características do sensor e da atmosfera da região), selecionando posteriormente a CP1 que melhor informará sobre o albedo, ao ter concentrada em si a maior variância entre todas as CPs. Nesse momento, portanto, a ACP é aplicada em seu sentido mais tradicional de reduzir a dimensionalidade dos dados distribuídos em inúmeras bandas.

4.6 Distribuição das plantas: fundamentos teóricos

4.6.1 Fundamentos geocológicos da distribuição das plantas

A geobotânica por sensoriamento remoto baseia-se na existência de correlação entre os tipos de comunidades vegetais e as características de seus *habitats*, de forma que as mudanças das características ambientais correspondam com mudanças nos padrões de coberturas vegetais. Desse princípio, surge uma questão fundamental, que diz respeito ao critério de distribuição das plantas.

A distribuição das espécies vegetais não ocorre ao acaso, mas é resultante da relação entre as plantas e o meio, e entre elas próprias. Tivy (1973, p.83) lembrou que, para determinada espécie sobreviver em dado ambiente físico, o mesmo deve satisfazer pelo menos seus requisitos mínimos. Porém, não é somente tal ambiente que determina ou influencia a existência ou frequência de ocorrência de certa espécie em dado território, mas também a presença de outras espécies de vegetais e animais. Uma lei importante a ser lembrada nesse contexto é a de tolerância dos seres vivos, que ajuda a entender o sucesso de determinadas espécies em detrimento de outras, ao explorarem certos tipos de *habitats*. De acordo com Odum (1988, p.142), tal lei postula que os organismos apresentam limites mínimos e máximos de tolerância às condições impostas pelos fatores ambientais, bem como uma demanda ideal. Conforme Dajoz (1983, p.29), é possível lembrar ainda que todos os seres vivos possuem seus próprios ótimos ecológicos, situados entre seus limites de mínima e máxima tolerância às variáveis ambientais. O conceito de ótimo ecológico é um fator importante ao se analisar o sucesso de certas espécies em detrimento de outras na colonização de certo ecótopo, isto é, de um ambiente físico colonizado por plantas, no contexto de competição entre espécies.

Retomando alguns aspectos da lei de tolerância, Odum (op. cit.) mencionou alguns princípios que podem ser derivados da mesma, tais como:

- A faixa de tolerância dos organismos não é a mesma para todos os fatores ambientais, podendo ser mais larga para alguns e curta para outros.
- Organismos com faixas de tolerância largas para todos os fatores serão distribuídos provavelmente de forma mais ampla.
- Espécies que não estão em condições ambientais ótimas, devido à ação de algum fator limitante em relação a uma certa faixa de tolerância, podem ter tais faixas reduzidas também para outros fatores.
- Alguns fatores limitantes podem ser mais importantes do que outros.
- Os seres vivos são ainda mais sensíveis aos fatores limitantes na época de reprodução.

Ao lado dos abióticos, os fatores bióticos também devem ser considerados como atuantes na distribuição das espécies vegetais. Considerando um ambiente onde apenas começa a colonização das plantas; a princípio, as espécies podem se estabelecer de forma esparsa, conforme o grau de tolerância às variáveis físicas do *habitat*, o que faz as características do ecótopo em questão serem primordiais. Mas, com o passar do tempo, ocorre o processo de agregação dos indivíduos até então mais isolados, devido ao aumento numérico de organismos. A partir desse momento faz-se presente, então, o processo de competição entre espécies na comunidade vegetal formada e os fatores bióticos passam também a controlar a presença ou ausência de espécies em dado ecótopo, fato esse conhecido já há bastante tempo, como pode ser verificado em Weaver e Clements (1938, p.4). Por comunidade vegetal, entende-se todo agrupamento vegetal existente onde as plantas se relacionam umas com as outras (OOSTING, 1951, p.17). O termo comunidade é de natureza geral (RIZZINI, 1997, p.10).

A geobotânica por sensoriamento remoto, ao buscar identificar também os ecótopos sobre os quais as plantas se fazem presentes, geralmente não se detém no estudo de uma planta isolada, mas em todo um conjunto de comunidades vegetais. Por isso, torna-se útil observar que:

os melhores indicadores das condições do habitat não são as espécies isoladas, mas a comunidade, a comunidade vegetal, entendida de forma mais restrita ou ampla (...). A partir da comunidade vegetal é possível extrair conclusões sobre o habitat; uma unidade florística de vegetação possui uma unidade de habitat correspondente... (BRAUN-BLANQUET, 1979, p.19, tradução nossa).

As três categorias da matéria (o espaço, a energia e o tempo), lembradas por Bobek e Schmithüsen (2004, p.78) ao analisarem a paisagem e o sistema lógico da geografia, são instrumentos fundamentais de análise das comunidades vegetais. Assim, é possível compreender que tais as comunidades não somente se distribuem no espaço, mas também no tempo e de forma dinâmica, trazendo à tona a questão das sucessões que, como bem lembrou Tivy, é o “processo onde uma comunidade substitui outra em um dado lugar, como um resultado de mudanças do habitat” (TIVY, 1973, p.193, tradução nossa). De acordo com Odum (1988, p.283), a sucessão é previsível quando não afetada por forças externas na medida em que é direcional, isto é, faz a cobertura vegetal de determinada área evoluir de uma comunidade com estruturas e composições mais simples e instáveis para outras mais complexas e estáveis, até chegar à chamada comunidade clímax. Nessa última etapa da sucessão, as plantas usam ao máximo os potenciais oferecidos pelo *habitat* e as mudanças no sistema tornam-se mais improváveis, ocorrendo somente reposição da composição e estrutura da comunidade, sem maiores mudanças na área, já que todos os nichos ecológicos encontram-se ocupados. Disso resulta o fim do ciclo de sucessão, caso as condições ambientais não sejam alteradas. As várias comunidades que se sucedem no tempo, até chegar à clímax, formam os conhecidos estágios serais (TIVY, op. cit).

A evolução seral de comunidades menos complexas para mais complexas ocorre porque cada estágio de sucessão contribui com alterações nas características do *habitat*. Assim, o que a princípio era inóspito para espécies maiores, torna-se área apta para abrigar tais espécies mais complexas e com maiores exigências de recursos do meio. Dessa forma, as espécies que precedem o advento de outras mais agressivas geralmente preparam o caminho para sua própria substituição, pois não conseguem competir com as mesmas. Enquanto no princípio dos estágios de sucessão o meio físico é primordial na seleção das espécies colonizadoras, posteriormente, as alterações e controle das características do meio exercido pelas novas espécies estabelecidas passam a ganhar igualmente grande importância. Ao se aproximarem da comunidade clímax “em grande parte, tanto a composição quanto a estrutura das comunidades de plantas são controladas pelas plantas que podem competir mais eficazmente pelos recursos de determinado habitat” (TIVY, op. cit., tradução nossa).

Quanto ao processo de competição entre as espécies, tem-se que:

A competição, ou ‘a luta pela existência’ entre as plantas da mesma espécie ou espécies diferentes surge porque os recursos de determinado habitat é insuficiente para satisfazer as demandas de todas as plantas disponíveis e capazes de nele crescer. O relativo sucesso das plantas individuais ou espécies nessa luta competitiva vai depender do ótimo de seus requerimentos (...). As que possuem as maiores demandas ou são “mais agressivas” podem, por conta de suas elevadas capacidades reprodutivas, vigor de crescimento e tamanho, modificarem o clima e as condições edáficas tanto para deprimir como excluir aquelas menos demandantes e agressivas de um determinado habitat. (TIVY, 1973, p.84, tradução nossa).

Embora no contexto do processo de competição o estabelecimento de uma espécie possa implicar na exclusão ou redução significativa de outras, principalmente se as demandas pelos recursos naturais forem semelhantes, obviamente nem sempre a presença de uma determinada espécie impossibilita a coexistência com outra. Na realidade, muitas vezes uma espécie depende de outra para sua existência, pois se complementam como em

uma interação mutualística. Odum (1988, p.234) apresentou nove tipos de relações existentes no contexto de interações entre espécies, tanto vegetais, quanto animais (quadro 8).

Quadro 8- Análise de interações populacionais entre dois tipos de espécies (adaptado de Odum, 1988).

Tipo de Interação	Natureza Geral da Interação
1. Neutralismo	Nenhuma população afeta a outra.
2. Competição: tipo interferência direta.	Inibição direta de cada espécie pela outra.
3. Competição: tipo utilização de recursos.	Inibição indireta quando o recurso comum está limitado.
4. Amensalismo	População 1 inibida; 2 não afetada.
5. Parasitismo	População 1, o parasita, geralmente menor que 2, o hospedeiro.
6. Predação (incluindo herbívora)	População 1, o predador, geralmente maior que 2, a presa.
7. Comensalismo	População 1, o comensal, é beneficiada, enquanto que 2, o hospedeiro, não é afetada.
8. Protocooperação	Interação favorável às duas populações, sem ser obrigatória.
9. Mutualismo	Interação favorável às duas populações, sendo obrigatória.

Como esclarecido por Odum, enquanto no tipo de interação neutra as espécies envolvidas não interferem uma com a outra, as interações que vão dos itens 2 a 4 são classificáveis como negativas (a convivência entre as espécies é difícil ou mesmo impossível). As dos itens 5 a 6 podem ser classificadas tanto como negativas quanto positivas e as dos itens 7 a 9 são consideradas positivas (não há competição entre as espécies, mas sim uma complementação).

Observando-se os tipos de relações estabelecidas entre as espécies, torna-se mais clara a participação do meio biótico na distribuição das espécies vegetais, pois aperfeiçoa a distribuição delas nos diferentes meios físicos.

Outra questão importante, relacionada à dimensão espacial das comunidades vegetais, é a da escala de abordagem, pois, como já visto, a comunidade é um conceito

geral e coexiste juntamente com outros mais específicos, ligados às escalas de tratamento. A classificação apresentada por Oosting exemplifica essa questão. Segundo ele, a níveis regionais as comunidades existentes poderiam ser chamadas de formações as quais podem apresentar subdivisões denominadas associações⁹. Dentro destas poderiam ser reconhecidas, ainda, as faciações e, nestas, em uma escala ainda mais detalhada, as localidades. Tal tipologia, apresentada como exemplo, está aberta à inclusão de novas categorias inferiores se for necessário (OOSTING, 1951, p.17).

É importante considerar a escala de abordagem das comunidades vegetais, pois, dependendo do nível de grandeza das escalas, os principais fatores que influenciam nas características florísticas e fisionômicas podem se alterar. De acordo com Braun-Blanquet (1979, p.693), a zonation da vegetação em grandes áreas estaria relacionada principalmente ao clima, enquanto, a níveis locais, estaria mais ligada a fatores edáficos e bióticos.

Um exemplo clássico da prática de associação entre o clima e as comunidades vegetais, em níveis macrorregionais é a classificação climática de Köppen, cujo primeiro modelo foi proposto em 1900 e relaciona o clima aos tipos de vegetação existentes. Esse modelo é muito utilizado até os dias atuais (AYOADE, 2007, p.232). Clements foi o primeiro a defender a ideia de que, para cada zona climática da Terra, haveria somente um tipo de formação vegetal associada, dando origem a uma teoria que explica o processo de desenvolvimento das coberturas vegetais, baseada no conceito de clímax (WATTS, 1971, p.259); (BLANQUET, 1979, p.979).

A teoria elaborada por Clements partia exatamente do conceito de formação cuja definição seria:

⁹ A definição de associação diverge dependendo da linha de abordagem, enquanto no presente exemplo as associações seriam divisões maiores das comunidades vegetais, com outras subdivisões, para muitos o termo remete à uma unidade básica das comunidades vegetais.

[...] a maior unidade da vegetação. Ela é uma comunidade totalmente desenvolvida ou clímax de uma área natural na qual as relações climáticas essenciais são similares ou idênticas. Cada formação é um complexo e entidade orgânica definida com uma característica e estrutura. Ela é um produto do clima e é controlada por ele (WEAVER; CLEMENTS, 1938 p.89, tradução nossa).

As postulações teóricas dessa corrente de pensamento reconhecem cada formação que ocorre em níveis regionais como uma espécie de grande “organismo” composto por partes menores, como as associações vegetais. Dentro de uma região climática poderiam existir inúmeras comunidades com hábitos e fisionomias diferentes, em etapas de sucessões distintas, devido às variações nas condições de outros elementos do meio (nas características do solo, por exemplo). Contudo, todas essas comunidades caminhariam para a constituição de um único tipo regional de vegetação estável (a vegetação clímax), graças a alterações ocorridas no ambiente, inclusive pela interferência dos componentes bióticos da paisagem. Portanto, com o tempo, a variedade de tipos de comunidades com hábitos de vida heterogêneos dentro das formações, tenderiam a diminuir. A vegetação clímax se caracterizaria tanto pela fisionomia quanto pela forma de vida semelhante das espécies dominantes. Cabe ressaltar que a vegetação clímax não significaria a completa uniformidade florística dentro das formações, mas a homogeneização em níveis mais gerais do tipo de vegetação, conseqüentemente, dentro das formações ainda poderiam haver várias comunidades com diferentes composições florísticas, embora com traços gerais semelhantes (OOSTING, 1951).

Essa visão conhecida como monoclímáxica e proposta inicialmente por Clements foi alvo de críticas por parte de pesquisadores como Tansley, o criador do conceito de ecossistema (ODUM, 1988, p.9). Para esses autores, outros fatores ambientais, tais como os edáficos e topográficos também exerceriam influência sobre os tipos de formações, propondo assim uma postura de abordagem conhecida como “policlímax” em contrapeso à monoclímáxica. Especialistas como Gleason, com visões mais individualistas sobre as

plantas, chegaram a apontar a teoria “monoclimática” como inaplicável na natureza (WATTS, 1971, p.261). Para Odum (1988, p.299), contudo, as sucessões autogênicas (determinadas predominantemente pelas interações internas da comunidade) conduzem de fato a uma comunidade estável; porém, a hipótese “policlimática” seria algo mais próximo da realidade. Ainda de acordo com Odum, a solução dessa problemática seria considerar a existência teórica de um clímax climático com interferências de climaxes edáficos, os quais poderiam impedir a concretização do clímax teórico para as condições de determinado clima regional em uma escala temporal razoável.

Para Oosting (1951, p.254) o conflito entre ambas as correntes seria basicamente relacionado à terminologia, apontado que os conceitos de clímax edáfico, fisiográfico ou qualquer outro além da climática seriam conceitualmente inapropriados e que os eventos explicados por eles já seriam atendidos pelos de subclímax, disclímax, pré-clímax e pós-clímax, da própria abordagem baseada no monoclímax.

O subclímax ocorreria quando a evolução seral se detivesse em estágio anterior ao clímax por muito tempo e devido a inúmeras razões, como a interferência de incêndios¹⁰.

O disclímax seria consequência de perturbação intensa, capaz de mudar até mesmo o clímax teórico de dado lugar e causada geralmente pelo fator antrópico, por meio da introdução de novas espécies originalmente estranhas à região, as quais poderiam tornar-se dominantes.

Por fim, o pós-clímax e preclímax seriam em um primeiro momento as variações vegetacionais ocorrentes em áreas mais próximas dos limites dos climaxes; portanto, áreas de transições. Estas seriam áreas com clima em transição, onde o mesmo começaria a adquirir outras características, ou mais úmido ou mais seco, conforme as características da

¹⁰ Quando a sucessão passa a ser controlada por forças com origens externas à comunidade, como no caso dos incêndios, a mesma pode ser definida como alogênica em contraposição à sucessão autogênica (ODUM, 1988, p.283).

região climática adjacente. Enquanto o pós-clímax seria uma variação das características da formação produzida pela condição climática mais favorável em relação ao clima dominante dela, algo possível graças às características climáticas da região adjacente, o pré-clímax seria uma variação da formação produzida pelas características climáticas menos favoráveis para dado tipo de vegetação.

Os conceitos de pós-clímax e pré-clímax seriam capazes de explicar ainda as variações advindas devido às mudanças climáticas ao longo da história natural. Com elas, ocorreria também a migração das comunidades clímaxes para novas áreas de colonização onde o clima fosse adequado para o seu estabelecimento. As comunidades vegetais poderiam retornar para a área de exploração original com a retomada das condições climáticas anteriores. Nesse movimento migratório de ida e retorno, contudo, sempre haveria a possibilidade de algumas comunidades remanescentes permanecerem em áreas mais restritas onde ainda as condições locais possibilitassem suas existências. Tais comunidades remanescentes formariam os chamados enclaves fitogeográficos, também denominados como pós-clímax ou pré-clímax¹¹, conforme as relações que mantivessem com as condições climáticas vigentes no presente. De acordo com Ab'Saber (2003, p.145-146), há exemplos de relictos no Brasil. Um deles seria a presença de manchas de cerrado espalhadas dentro da Floresta Amazônica. Outro exemplo, seria a presença das caatingas em Macaé e Cabo Frio cercadas pela Floresta Atlântica. Neste contexto, é possível lembrar Zunino e Zullini (2003, p.76), os quais defenderam as plantas como excelentes indicadores, não só das atuais condições ambientais, mas também de condições pretéritas.

Embora haja consenso da primazia dos fatores climáticos nas características das formações vegetais, Kruckeberg (2002, p.41) sugeriu uma reformulação nesse pensamento

¹¹ As expressões mais utilizadas atualmente são relictos, enclaves, redutos e refúgios, porém, originalmente, no modelo teórico do monoclímax, tais comunidades são explicadas pelos conceitos de pós-clímax e pré-clímax.

mais tradicional de que, em níveis maiores de grandeza, o clima seria o fator primeiro na distribuição das espécies vegetais. Ele propôs que os fatores geológicos ocupassem essa posição ao nível da biosfera e, mesmo a nível regional, que o clima somente fosse considerado fator primeiro se claramente mostrado que os aspectos geológicos e geomorfológicos não a ocupavam. A argumentação do autor para a primazia dos fatores geológicos e geomorfológicos a nível global se sustentaria no fato de os climas, em última instância, serem fenômenos geofísicos influenciados pelo formato da Terra, bem como pela sua relação com o Sol. Já no contexto regional, o relevo assumiria muitas vezes papel primordial, onde o clima se tornaria dependente principalmente dessa variável.

É notável, contudo, a funcionalidade da adoção do clima como ponto de partida para as classificações das formações vegetais. Como exemplo, tem-se o trabalho de Walter (1986). Nele, os climas mundiais são classificados em nove grandes zonas, às quais estariam associadas grandes unidades ecológicas chamadas de zonobiomas. O autor reconheceu a existência de casos dentro das zonobiomas onde haveria grande influência do relevo e do solo sobre os tipos de vegetações existentes, fazendo com que as características das comunidades não fossem por vezes compatíveis com as esperadas para as zonobiomas previstas. A fim de acomodar tais situações aparentemente “anômalas” para uma visão que considerasse apenas a influência climática, foram propostas as classificações de orobiomas (quando ocorresse a influência dominante do relevo na determinação da cobertura vegetal) e pedobiomas (quando ocorresse a influência dominante dos solos na determinação da cobertura vegetal) associados aos zonobiomas aos quais tais tipos de coberturas vegetais pertencessem.

Se em uma macro escala de abordagem a ação da variável climática sobre a distribuição das espécies e tipos de coberturas vegetais torna-se um fator geralmente preponderante, em escalas mais localizadas não é o que geralmente ocorre, pois como, já

mencionado, os fatores edáficos e bióticos (e mesmo o relevo) ganham ainda maior destaque: “Dentro de certa região climática, o crescimento da vegetação é determinado principalmente pelo caráter da topografia e dos materiais parentais” (KRUCKERBERG, 2002, p.44, tradução nossa).

De acordo com Zunino e Zullini (2003, p.110), embora a heterogeneidade de ambientes seja uma das hipóteses que procura explicar a variação na biodiversidade em lugares diferentes, sendo que nos trópicos essa relação seria ainda mais evidente, há outras oito hipóteses para tal explicação. Entre elas, algumas são de caráter complementar, enquanto uma última, mencionada e denominada como hipótese das oportunidades iguais, acaba contradizendo as demais, alegando que todas as espécies possuem capacidades próximas de colonizar novos espaços, bem como competir com sucesso. Conforme essa linha de pensamento, o que determinaria a diversidade de espécies localmente seria tão somente a quantidade de espécies presentes na área, aliada a fatos casuais. Já Almeida et al. (2007a) lembraram a existência do modelo ecológico neutro, base para pesquisadores considerarem que a similaridade florística dependeria do logaritmo da distância geográfica, conseqüentemente, as mudanças nas características das vegetações seriam graduais. De toda forma, se a capacidade das espécies locais se estabelecerem em áreas com características topográficas, de solo e subsolo diferentes fosse similar, a geobotânica por sensoriamento remoto não faria muito sentido, pois a estrutura espacial de distribuição das plantas não seria indicadora de variações ambientais. Zunino e Zullini (2003, p.94) reconheceram, no entanto, que a distribuição das espécies de seres vivos, de forma geral, é determinada tanto por questões ecológicas (visão da biogeografia causal) quanto históricas (visão da biogeografia histórica) e, ao se referirem especificamente às plantas (Ibid, p.76), defenderam serem as mesmas indicadores confiáveis das características ambientais como o clima e o solo.

São inúmeros os trabalhos que evidenciam a ligação entre a distribuição de espécies e as características dos ambientes em níveis locais. Um exemplo é o estudo realizado por Ernst Van de Ven e Lyon (2003), no qual foi analisada a relação entre a vegetação, a zonation climática e os tipos de solo e de rocha da área central das montanhas de White-Inyo na Califórnia, Estados Unidos. O objetivo era mostrar que a distribuição e abundância de espécies vegetais na área eram exatamente uma função das características do microclima, do relevo, do solo e do tipo de rocha.

As variáveis do meio natural que interferem nas características das coberturas vegetais podem ser divididos, de acordo com Rizzini (1997, p.15), em quatro grupos:: climáticas, edáficas, fisiográficas e bióticas. Obviamente, sendo a natureza um todo sistêmico, alterações de uma variável interferem nas características dos mais diversos componentes da paisagem. Florinsky (1998), por exemplo, revisou como as propriedades do relevo atuam no desenvolvimento do conjunto da paisagem, inclusive nas características da cobertura vegetal (quadro 9).

Quadro 9- Atuação das variáveis do relevo sobre os componentes da paisagem (adaptado de Florinsky, 1998).

Variáveis do Relevo	Influência sobre os componentes da paisagem
Elevação	Zonação vertical da vegetação e solos. Indicador da estabilidade das rochas frente ao intemperismo.
Declividade	Velocidade de escoamento, <i>runoff</i> bem como perda de solo, e ainda na espessura dos horizontes do solo e algumas propriedades das plantas.
Orientação	Direção de escoamento, espessura dos horizontes do solo e algumas características das plantas.
Declive, Orientação e elevação	Insolação e microclima.
Curvatura da vertente	Desaceleração relativa do escoamento, umidade do solo, pH, espessura dos horizontes do solo, matéria orgânica, distribuição da cobertura vegetal.
Curvatura plana	Convergência do escoamento, umidade do solo, pH, espessura dos horizontes do solo, matéria orgânica, distribuição da cobertura vegetal.
Área específica de captura	Umidade do solo, distribuição da cobertura vegetal entre outros.
Relevo (rugosidade topográfica)	Características da drenagem da paisagem (logo, podemos lembrar também os efeitos sobre a distribuição das plantas).

Além das ações diretas dos fatores climáticos e geomorfológicos na distribuição das espécies e tipos de plantas, outro item importante é a água que se associa às características climáticas, geomorfológicas e edáficas do ambiente. De acordo com Braun-Blanquet (1979, p.257), a água determina a estrutura espacial das comunidades vegetais em níveis locais, a ponto de pequenas variações na disponibilidade hídrica do meio provocarem alterações acentuadas na cobertura vegetal. Um exemplo, de como a presença da água em teores diversos pode impactar na diversidade e distribuição de espécies, foi apresentado por Bianchini et al. (2003), ao estudarem a diversidade e estrutura de espécies arbóreas no Parque Estadual Mata do Godoy, em Londrina (PR). Este apresenta diferenças no ecótopo, com uma porção norte mais alta e uma porção sul mais baixa. A pesquisa constatou que a área alagável do parque apresentou riqueza de gêneros inferior à floresta da porção norte,

bem como um índice de equabilidade alto, portanto, sem espécies dominantes. O setor alagável apresentou ainda índice de diversidade menor do que outras áreas do parque. Os autores esperavam encontrar um alto índice de similaridade entre a vegetação da área alagável e da floresta ciliar, devido à sobreposição parcial entre ambas; contudo, o índice ficou em 40%. O resultado foi atribuído ao fato de a floresta ciliar possuir áreas mais elevadas sem influência direta de alagamentos, onde espécies que não são tolerantes a esse tipo de estresse também puderam se estabelecer. Já a baixa similaridade entre a vegetação da área alagável e da porção norte do parque foi atribuída também a diferenças na temperatura e nos tipos de solo. Ainda nesse estudo, foi observado que a diversidade do setor alagável do parque foi superior àquela encontrada na várzea do rio denominado como Bitumirim, atribuindo como um dos prováveis responsáveis pela situação a duração do período da inundação, que é menor no primeiro caso em relação ao segundo, propiciando a ocorrência de um número de espécies mais elevado no parque.

As características dos solos também influenciam na distribuição das plantas. Assim, além da própria disponibilidade hídrica, outros fatores que influem, de acordo com Braun-Blanquet (1979), são: aeração, temperatura, estrutura e disponibilidade de nutrientes do solo.

Com relação à extração de elementos dos solos para nutrição, “Os três elementos essenciais que as plantas absorvem do solo e usam são: (1) a *água* que é principalmente evaporada pelas folhas das plantas, (2) os *nutrientes* para nutrição, e (3) o *oxigênio* para respiração das raízes” (FOTH, 1990, p.1, tradução nossa).

Existem cerca de 16 nutrientes que são essenciais às plantas superiores. Enquanto o carbono, o hidrogênio e o oxigênio, que formam cerca de 90% da matéria seca das plantas, são extraídos do ar e da água, os outros 13 elementos são obtidos predominantemente do solo em quantidades variadas. O nitrogênio (N), o fósforo (P), o potássio (K), o cálcio

(Ca), o magnésio (Mg) e o Enxofre (S) são requeridos em maiores quantidades e são chamados de macronutrientes. Já o boro (b), o cloro (Cl), o cobre (Cu), o ferro (Fe), o manganês (Mn), o molibdênio (Mo) e o zinco (Zn) são requeridos em menores quantidades em relação aos macronutrientes e conhecidos como micronutrientes¹² (Ibid, p.2).

Um exemplo das interferências das propriedades do solo sobre as comunidades vegetais é apresentado no trabalho de Araújo, Martins e Shepherd (1999), no qual buscou-se encontrar a relação da variação na estrutura e composição florística de uma comunidade lenhosa xerófila de carrasco e as variáveis pedológicas no planalto da Ibiapaba (CE), domínio do semiárido, onde ocorreu a dominância de algumas espécies. A pesquisa mostrou que a vegetação de carrasco não só apresentou grande variação florística no espaço, como foi detectada uma correlação da variação florística com diferenças nas variáveis dos solos¹³.

Considerando que “As necessidades dos distintos nutrientes variam de uma planta para outra, e mesmo em uma mesma planta ao longo do seu desenvolvimento” (BRAUN-BLANQUET, 1979, p.321, tradução nossa) é importante observar que a composição química e mineralógica dos solos e subsolos não é algo secundário, pois tanto a ausência de determinados elementos como a sua presença “excessiva” atuam na seleção de espécies vegetais melhores adaptadas para exploração de determinado ambiente.

O trabalho apresentado por Almeida *et al.* (2007b) é uma referência importante nessa perspectiva. Trata-se de um estudo realizado em área de Floresta Atlântica no município de Guarulhos, Estado de São Paulo. A pesquisa constatou alterações nas características florísticas e fisionômicas provocadas na cobertura vegetal de duas comunidades vizinhas, devido aos efeitos da seleção promovidos pelas características distintas do ecótopo de cada comunidade vegetal. A diferença entre os dois ambientes foi

¹² Algumas plantas requerem em menores quantidades também o cobalto (Co)

¹³ pH, soma de bases, teores de areia grossa e areia fina.

devido às alterações hidrotermais associadas às mineralizações de ouro em rochas do substrato de uma das comunidades vegetais. Isso em um contexto onde as demais variáveis ambientais não ofereciam grandes diferenças, pois as comunidades estavam basicamente em uma mesma cota altimétrica, orientação e inclinação de vertente, e história de sucessão vegetacional. Portanto, as diferenças entre as comunidade eram provocadas basicamente pelas variações nas propriedades físicas e químicas do solo e subsolo.

Cabe mencionar que um dos ambientes, cuja influência dos solos e do substrato rochoso é bastante evidente na seleção de tipos e espécies de plantas, é exatamente naquele composto por teores mais elevados de certos elementos químicos devido à ocorrência de mineralizações. Kruckeberg (2004, p.254) lembrou a hipótese da não existência de sucessões em vários desses ambientes, tomando como exemplo aqueles formados por serpentina e classificados como extremos, onde haveria somente a vegetação clímax por ser a única capaz de colonizá-lo. Brooks (1983), por sua vez, relacionou alguns exemplos de alterações morfológicas e de mutações provocadas nas plantas expostas a situações de estresse devido à presença de mineralizações com alta concentração de elementos químicos (quadro 10), cujos efeitos podem ser tanto diretos quanto indiretos.

As repercussões diretas podem ser exemplificadas pela ação do ouro e do mercúrio que, ao reduzirem a permeabilidade da membrana celular, impedem a passagem do potássio, sódio e outras moléculas orgânicas. Outra ação passível de ocorrência é a substituição de alguns elementos químicos nas células por outros que não permitem o processamento das ações fisiológicas de maneira adequada (BROOKS, 1983).

Quadro 10- Mudanças morfológicas e mutacionais em plantas afetadas por mineralizações (adaptado de BROOKS, 1983).

Elemento ou Mineral	Efeitos Sobre as Plantas
Alumínio	Encurtamento das raízes e queimaduras nas folhas.
Betume	Gigantismo e florescimento precoce ou reincidente.
Boro	Atrofiamento, formas prostradas, deformações, manchas escuras nas folhas.
Cromo	Clorose.
Cobalto	Clorose ou aumento da clorofila.
Cobre	Clorose das folhas e nanismo.
Ferro	Escurecimento das folhas.
Manganês	Clorose das folhas com manchas brancas nas folhas.
Molibdênio	Clorose, brotos anormalmente coloridos, vulnerabilidade ao ataque de insetos.
Níquel	Clorose e necrose das folhas.
Serpentina	Nanismo, atrofia, mudança das cores das folhas.
Materiais Radioativos	Variação nas cores das plantas, frutos anormais e crescimento acelerado.
Zinco	Clorose das folhas e sintomas da deficiência de magnésio.

Já as consequências indiretas ocorrem quando os elementos químicos presentes no solo impedem o fornecimento adequado de outros mais essenciais às plantas, como o ferro, por exemplo, resultando em sua carência e respectivamente na clorose por parte das folhas, ainda que exista ferro no solo (op. cit.).

Em um primeiro momento, as alterações nas características das plantas e comunidades vegetais, como resposta ao estresse e sinal marcante de áreas com mineralizações, parece algo alentador para a prática da geobotânica por sensoriamento remoto voltada ao encontro de jazidas minerais. Contudo, de acordo com Almeida (2005, *passim*), tal aplicação é facilitada nas altas latitudes, quando comparadas às áreas de baixa

latitude. Os motivos para isso são diversos, como a existência de interação mais característica no sistema rocha-solo-vegetação, devido a menor fitodiversidade das coberturas vegetais das médias e altas latitudes em contraposição à riqueza de espécies daquelas das baixas latitudes, as quais podem possuir plantas mais adaptadas a ambientes mais críticos. Outra diferença é o ciclo fenológico mais marcado das coberturas vegetais das médias e altas latitudes, fato que permite identificar suas alterações quando fora do padrão de normalidade (com exceção das florestas de coníferas). Como consequência, a aplicação do sensoriamento remoto multiespectral, na busca por sinais de estresse, torna-se menos complexa nas áreas de clima temperado, pois a menor biodiversidade produz maior homogeneização da resposta espectral das plantas, facilitando sua observação e, conseqüentemente, a identificação de unidades florestais relativamente “anormais” para o padrão local e regional.

Ainda de acordo com Almeida (2005), para a prática da geobotânica por sensoriamento remoto em áreas de florestas tropicais, deve-se buscar, em vez de sinais de estresse, alterações na composição florística e fisionômica da comunidade vegetal em relação a um determinado padrão geral. Princípio que pode ser extrapolado para além da busca de jazidas minerais, ou seja, que pode ser aplicado para os mais diversos objetivos geocológicos, nos quais se fizerem necessárias identificações das características dos ecótopos e compartimentos da paisagem, a partir do uso da cobertura vegetal como elemento indicador, ou mesmo, para estudos que buscam verificar a influência do meio físico sobre as características da cobertura vegetal.

Embora os sinais de estresse possam ser menos evidentes ou mesmo inexistentes em áreas cobertas por florestas tropicais, é razoável esperar que a ação seletiva do meio se faça presente de forma muito intensa em decorrência da vigorosa competição estabelecida entre as mais diversas espécies vegetais, lembrando aqui Dajoz (1983 p.29), ao apontar que

todos os seres vivos possuem seus próprios ótimos ecológicos, situados entre seus limites de mínima e máxima tolerância às variáveis ambientais, o que faz determinadas espécies terem maior vantagem na colonização de certos nichos ecológicos em detrimento de outras.

A existência de nichos ecológicos para cada espécie de planta ou grupos de plantas e suas variações permite classificá-las com base em critérios geoecológicos (quadro 11).

Quadro 11- Classificação geoecológica das plantas (adaptado de FRANCO 1993).

Classificação Geoecológica das plantas	Característica
Calcícolas	Plantas que gostam de cálcio
Calcífugas	Plantas que não gostam de cálcio
Acidífilas	Plantas que gostam de meio ácido
Acidífugas	Plantas que não gostam de meio ácido
Basífilas	Plantas que gostam de meio básico
Basífugas	Plantas que não gostam de meio básico
Psamófilas	Plantas que gostam de solo arenoso
Hidrófilas	Plantas que vivem dentro da água
Higrófilas	Plantas que vivem em solo pantanoso
Mesófilas	Plantas que vivem em solos enxutos
Xerófilas	Plantas que vivem em regiões áridas
Heliófilas	Plantas que gostam de luz
Ciáfilas	Plantas que gostam de sombra
Halófilas	Plantas que gostam de solos salinos
Litófilas	Plantas que gostam de solos pedregosos

Um aspecto importante de ser lembrado, ainda, é que o meio não influi somente na distribuição das espécies vegetais, mas também nos ecotipos gerados por influências do próprio ambiente. De acordo com Odum (1988, p.148), os fatores ambientais podem desencadear a formação de vários ecotipos em espécies de ampla distribuição em termos de área. Os ecotipos são variações dentro de cada espécie, permitindo melhor adaptação às características ambientais locais.

4.7 O Parque Estadual Campina do Encantado e seu contexto geoecológico

O parque foi criado por lei estadual (8.873 de 16/08/1994) com o nome de Parque Estadual do Pariquera Abaixo, o qual foi alterado por outra lei estadual (10.316 de 16/05/1999) para Parque Estadual Campina do Encantado. Sua área total é de 2.359,50 hectares¹⁴.

4.7.1 Contexto climático do PECE

O macrocontexto fitogeográfico no qual o PECE está inserido é o da Floresta Atlântica. Esse conjunto vegetacional se constitui no segundo maior complexo de florestas tropicais do Brasil e tem sido intensamente alterado pela ação antrópica ao longo da história social e econômica do país. Ele é formado por várias comunidades florestais com características distintas e está disposto em um perfil norte-nordeste/sul-sudoeste na porção mais oriental do território brasileiro (Brasil Atlântico), estendendo-se desde o Rio Grande do Norte até o Rio Grande do Sul. Essa orientação e abrangência geográfica da Floresta Atlântica fazem com que a mesma possua característica marcadamente azonal, apresentando variações climáticas diversas (AB'SABER, 2003, p.45); (RIZZINI, 1997, p.372).

Nesse contexto azonal da Floresta Atlântica, o PECE se localiza em uma região com características climáticas gerais de transição. De acordo com Nimer (1989 p.275), de forma geral, a região sudeste se constitui em uma área onde ocorre a transição entre o

¹⁴ Informações extraídas do relatório do plano de gestão ambiental do parque ainda em fase de elaboração.

clima tropical e temperado. Enquanto o primeiro caracteriza-se principalmente por apresentar uma estação com maior abundância da pluviosidade e outra com menor nível de chuvas, o segundo caracteriza-se principalmente pelas diferenças de temperatura no verão e inverno. O mesmo autor, contudo, ressaltou que embora o clima geral da região sudeste possua caráter de transição, este inclina-se mais para o tropical do que para o temperado. Já, de acordo com Conti e Furlan (2001, p.108), embora os limites das áreas climáticas não possam ser delimitados com linhas rígidas, a faixa latitudinal formada pelos estados de São Paulo e Paraná corresponde ao início da área onde o clima subtropical passa a atuar, pois, tanto as ações da massa polar atlântica, como de sistemas extratropicais, se fazem presentes de forma dominante.

Entre as classificações climáticas, uma bastante utilizada e já mencionada neste trabalho é a de Köppen, que relaciona clima e vegetação (AYOADE, 2007, p.232) sendo por isso, de interesse para o presente estudo. O tipo climático mais específico da área onde as comunidades vegetais do PECE estão inseridas se aproxima, em um primeiro momento, do (Afa), isso é, clima tropical chuvoso de floresta. Esse tipo climático se caracteriza por possuir temperatura média não inferior a 18°C no mês mais frio (limite crítico para sobrevivência de determinadas plantas tropicais) e a pluviosidade superar durante o ano a evapotranspiração. Caracteriza-se ainda por não possuir estação seca e o mês mais quente possuir temperatura média superior a 22°C (2007, p.232-233).

Observando os dados climatológicos de Pariquera-Açu (fig. 12), de acordo com a normal climatológica, é possível perceber que essa área possui meses com baixo nível de pluviosidade em relação aos meses de maior pluviosidade¹⁵; no entanto, não ocorre seca. A partir do mês de setembro, o nível de chuva aumenta progressivamente até o mês de

¹⁵ O baixo índice pluviométrico se inicia em abril, quando há forte queda na quantidade de chuva, e se estende até agosto, formando um período no qual a tendência de queda é contínua.

março. Percebe-se, portanto, claramente a presença de um período com chuvas mais abundantes e outro com chuvas menos abundantes, típicos do clima tropical.

Figura 12. Médias mensais de pluviosidade e temperatura (1961-1990) de Pariquera-Açu (Fonte: elaborado com base nos dados disponibilizados por ROLIM; SENTELHAS, 1998).

Com relação à temperatura, a mesma varia de acordo com a normal climatológica de uma média de 26,2°C em fevereiro, que é o mês mais quente, até o mínimo médio de 18,2°C em julho, o que mostra que se trata de área de transição, já que possui temperatura mínima média pela normal climatológica próxima ao limite de 18°C¹⁶. Com relação à evapotranspiração, é possível perceber que a pluviosidade, com total médio de (1.516mm), supera praticamente durante todo o ano a evapotranspiração, exceto em agosto, como mostra o balanço hídrico (fig.13).

¹⁶ De acordo com Sztutman (2000, p. 14) o clima é do tipo Cfa (mesotérmico úmido sem estação seca), o que precisaria que a média ficasse abaixo de 18° no mês mais frio.

Figura 13. Balanço hídrico de Pariquera-Açu (Fonte: ROLIM; SENTELHAS, 1998).

4.7.2 Contexto geomorfológico e geológico do PECE

Além da característica marcadamente azonal da Floresta Atlântica, que a faz estar sob condições climáticas heterogêneas, a mesma pode ser subdividida e classificada em três grandes unidades espaciais, as quais estão relacionadas às características diferenciadas dos macrocompartimentos geomorfológicos do Brasil Atlântico, a saber: Florestas das planícies costeiras, Florestas de encosta e Florestas de altitude (TABARELLI *et al.* 1999, p.217).

Considerando que o PECE situa-se em uma unidade morfoescultural de planície costeira, esse setor demanda maior atenção. De acordo com Suguio e Martin (1978) apud IPT (1981 p.55), o litoral do Estado de São Paulo pode ser dividido em quatro unidades distintas denominadas como: Unidade Cananéia-Iguape (onde o PECE se insere), Unidade Itanhaém-Santos, Unidade Bertioga-Ilha de São Sebastião e Unidade São Sebastião-Serra do Parati. Enquanto as unidades de Cananéia-Iguape e Itanhaém-Santos são maiores, com

destaque para a primeira, e geralmente denominadas como litoral sul, as demais comumente referidas como litoral norte, são de extensões menores, haja vista que a Serra do Mar chega a atingir diretamente o oceano (IPT, 1981,p.55). Uma observação quanto às formas de relevo litorâneo é que:

[...] estão geneticamente relacionadas com as interações oceano-continente, constituem-se basicamente pelas formas de relevo do tipo Planícies de Manguê, Planícies Marinhas, Planícies Flúvio-Marinhas, Terraços Marinhos, Cordões Arenosos, Campos de Dunas e Planícies Flúvio Lacustres-Marinhas (ROSS et al. 1997, p.52).

Uma vez que as regiões costeiras “constituem as faixas limítrofes entre os continentes [...] e os oceanos [...], representando uma das áreas de mais intenso intercâmbio de energia e matéria do Sistema Terra” (SUGUIO, 2003, p.3), tem-se que o entendimento da dinâmica da paisagem desse ambiente requer a compreensão de vários processos, ligados tanto a fatores continentais como oceânicos, na dimensão espacial e temporal.

As características atuais do ambiente costeiro são frutos de uma dinâmica natural compreendida por episódios de transgressão e regressão do nível relativo do mar e de variações também do nível médio dos continentes, devido aos fenômenos de tectono-eustasia, glacio-eustasia e eustasia-geoidal¹⁷, bem como pela isostasia ou tectônica (ROSS; MOROZ, 1997, p.53); (SUGUIO et al., 2005, p.115).

Uma evidência arqueológica de que as variações dos paleoníveis marítimos e continentais atingiram também a área atualmente ocupada pelo PECE são os sambaquis nele presentes, os quais podem ser considerados, de acordo com Suguio (2001, p.245), como vestígios de tempos nos quais os níveis relativos do mar eram mais altos, em relação ao atual. Os sambaquis foram produzidos por índios que habitavam a região durante esse período.

¹⁷ A eustasia-geoidal é também conhecida como geoidoeustasia.

Os aspectos litológicos e estratigráficos do substrato do PECE também fornecem outras evidências dessa dinâmica. Assim, tem-se que os mesmos são formados basicamente por sedimentos de origem fluvio-lagunares (areias e argilas) do holoceno, bem como por areias marinhas litorâneas do pleistoceno (Formação Cananéia) (SUGUIO, 1978).

Considerando o período do quaternário, é possível considerar, de acordo com Tessler et al. (2007, *passim*), a influência de dois episódios de transgressão e regressão do nível relativo do mar na modelagem da planície costeira.

No Pleistoceno, no máximo do ciclo transgressivo há cerca de 120.000 A.P., o nível do mar chegou a algo entre 6 e 10 metros acima do atual. Os sedimentos depositados por esse episódio de transgressão marinha ficaram conhecidos no Estado de São Paulo como Formação Cananéia. Considerando as modestas altitudes do relevo do PECE, que de acordo com Sztutman (2000, p.16) possui amplitude entre 5 e 18 metros, com média de 12, torna-se evidente que, durante o máximo da transgressão Cananéia, essa área esteve abaixo do nível relativo do mar. Isso justifica a presença dos sedimentos da Formação Cananéia, como demonstrado por Suguio (op. cit.), os quais, na realidade, são outra evidência de que a área já esteve submersa.

No máximo do período regressivo, por volta de 17.000 A.P., o nível do mar esteve a cerca de 110 metros abaixo do atual. Consequentemente, a própria plataforma continental, ao ter se tornado exposta, passou a ser erodida pela erosão fluvial. O nível do mar voltou a subir com o fim do último ciclo glacial, tendo atingido aproximadamente a marca atual a cerca de 7000 A.P., já na época do holoceno, e se elevado a cerca de quatro metros acima dela por volta de 5100 A.P., no episódio conhecido como Transgressão Santista, o que certamente interferiu no regime hidrológico das bacias presentes na região.

Analisando o contexto geomorfológico do PECE, através de uma aproximação que parte das características hidrográficas, tem-se que o mesmo se situa na Bacia Hidrográfica do Ribeira de Iguape. Essa bacia possui, conforme Ross (2002), os seguintes compartimentos: morros da superfície de cimeira regional, morros fortemente dissecados dos níveis intermediários da Serra do Mar, terras da depressão tectônica do baixo Ribeira e a planície costeira marinha e fluvial. Estando o PECE inserido mais especificamente no compartimento da planície costeira marinha e fluvial, é importante considerar as seguintes características dessa área:

[...] as planícies são mais largas, originadas principalmente a partir de vales afogados pela sedimentação marinha, com muito baixo gradiente topográfico, onde as águas encontram grande dificuldade em serem drenadas para o mar. Nesse trecho inferior do rio Ribeira do Iguape, prevalece uma grande sinuosidade em forma de meandros divagantes e o tempo de permanência das águas de inundações são de maior duração. Nesse setor, as planícies são mais arenosas e mais úmidas apresentando lençol freático muito próximo à superfície e freqüentemente aflorando na mesma e formando extensos brejos e pântanos (ROSS, 2002).

4.7.3 Características das três unidades geobotânicas do PECE, alvos de identificação por sensoriamento remoto

O PECE se enquadra na característica geral de possuir lençol freático próximo à superfície. Ele possui turfeiras em seu interior que são dois dos alvos de identificação neste trabalho por meio do uso do sensoriamento remoto. De acordo com Sztutman (2000, p.22), dois tipos básicos de turfeiras ocorrem no PECE: turfeira com afloramentos periódicos de água¹⁸ (figs. 14 e 15) e turfeira sem afloramento de água¹⁹. Enquanto a primeira com afloramentos durante os meses mais chuvosos, foi classificada como Floresta de Planície

¹⁸ Também chamada de turfeira rasa, porém, para termos de precisão conceitual será chamada de turfeira delgada.

¹⁹ Também chamada de turfeira profunda, porém, para termos de precisão conceitual será chamada de turfeira espessa.

Litorânea Paludosa Turfosa Periodicamente Inundada, e representa o maior tipo de comunidade vegetal em termos de área no parque; a segunda, sem afloramento, mas possuidora do substrato encharcado, foi classificada como Floresta de Planície Litorânea Paludosa Turfosa Sem Água Aparente (fig. 16).

Figura 14. Trilha na floresta turfosa delgada (foto: Pacheco, 2008)

Figura 15. Dossel da floresta turfosa delgada (foto: Pacheco 2008).

Figura 16. Floresta turfosa espessa (foto: Pacheco, 2008).

As turfeiras são áreas cujas características ambientais mais marcantes são as de serem formadas por terrenos úmidos e pantanosos, nos quais se encontram depósitos de turfas (GUERRA; GUERRA, 2003, p.623). “A turfa é uma matéria lenhosa que perdeu parte do seu oxigênio por ocasião da carbonização, transformando-se assim em carvão, cujo valor econômico como combustível é, no entanto, pequeno.” (Ibid., p.622). Leinz e Amaral (1998, p.208) observaram que, sendo as turfas um primeiro estágio no processo de formação do carvão, as mesmas são originadas pela deposição de detritos vegetais que enchem depressões cobertas por água, viabilizando a colonização dessa nova superfície por outros tipos de vegetais, como gramíneas, até chegar a plantas de portes maiores (processo

de sucessão). As depressões preenchidas pelos detritos vegetais misturados com a água formam, em um primeiro momento, os pântanos. Os detritos depositados se transformam gradativamente, por processos bioquímicos, em turfas, ao serem soterrados por mais sedimentos em processo que dura centenas de anos. Em áreas tropicais e mesmo subtropicais, as turfeiras são restritas a pequenas áreas, pois, embora a vegetação possa ser densa, a decomposição da matéria orgânica por parte das bactérias é também muito intensa, tornando tais ambientes desfavoráveis à formação de turfeiras mais amplas.

De acordo com Sakai, Lepsch e Amaral (1983), os solos dominantes na área do parque são os orgânicos, embora ocorram também podzólicos vermelho-amarelos álicos. Os solos representam uma das principais variáveis a atuar na seleção de espécies no compartimento da planície costeira. “A vegetação do litoral ou região justamarítima depende intimamente da natureza do substrato e da fisiografia” (RIZZINI, 1997, p.530). A profunda relação entre as comunidades vegetais e os tipos de solo na planície costeira fez com que muitos pesquisadores as denominassem como edáficas, exatamente por serem determinadas predominantemente pelos fatores edáficos (em vez dos climáticos), ganhando importância para a existência dessas comunidades. Juntamente com os solos, são relevantes também, os aspectos relacionados com a topografia, com o substrato e com a idade dos depósitos sedimentares (SZTUTMAN, 2000, p.6).

No caso do PECE, uma das diferenças entre os depósitos de turfas é que, enquanto a turfeira delgada, a qual sustenta a Floresta Paludosa Turfosa Periodicamente Inundada, possui depósito com espessura em torno de 1,5 e 3 metros de profundidade, a turfeira espessa, que sustenta a Floresta Paludosa Turfosa sem Água Superficial Aparente, possui espessura superior a cinco metros (SZTUTMAN; RODRIGUES, 2002, p.2).

O grau de seletividade de espécies em ambientes de turfas costuma fazer com que os mesmos possuam espécies dominantes com baixo índice de diversidade arbórea, haja

vista que as plantas que neles se estabelecem precisam ser adaptadas, entre outras coisas, à condição de saturação hídrica do solo (DORNELES, 2004, p.815).

Para as duas florestas de turfeiras do PECE, Sztutman (2000) fez o levantamento de amostras a partir das quais constatou que, entre a floresta sobre turfeira espessa e a floresta sobre turfeira delgada, o índice de similaridade de Jaccard foi muito baixo, apenas ($J=0,0833$). Valores abaixo de 0,25 indicam florestas floristicamente dissimilares (MUELLER-DOMBOIS et al., 1974). Enquanto na floresta sobre turfeira delgada o número de espécies encontradas foi de 46, na floresta sobre turfeira espessa esse número reduziu-se para apenas 5 e, embora o tamanho das áreas amostradas tenham sido diferentes (0,2 ha para a floresta sobre turfeira espessa e 0,3 ha para a floresta sobre turfeira delgada), o critério se pautou na diversidade encontrada em cada área verificada através das curvas do esforço amostral. Das 5 espécies presentes sobre a turfa espessa, 4 foram encontradas também na floresta sobre turfeira delgada. A grande diferença florística entre ambas, portanto, seria a presença de mais espécies na turfeira delgada, indicando que o ambiente da turfa profunda é altamente rigoroso para a maioria das espécies das áreas vizinhas.

Não é notável somente o baixo nível de diversidade da floresta sobre turfeira espessa. Chama a atenção, também, seu desenvolvimento morfológico, produzindo uma arquitetura de dossel consideravelmente diferente, sendo mais baixa em relação à floresta sobre turfeira delgada, o que certamente produz diferenças no albedo entre tais unidades. Sztutman (2000, *passim*) apontou algumas causas para a grande diferença morfológica e florística entre ambas as unidades florestais sobre turfeiras e, para tanto, considerou inclusive dados sobre a química dos solos e da água. As principais causas levantadas com grande destaque para a primeira foram:

- O processo de redução do sulfato na Floresta Paludosa Turfosa sem Água Superficial Aparente, que produz sulfeto de hidrogênio (H_2S), elemento tóxico para a

vegetação e que prejudica o desenvolvimento das plantas. Uma das evidências apontadas, desse fenômeno, seria a produção do gás metano nessa unidade.

- Considerando que grande parte dos nutrientes presentes na matéria orgânica das turfas não é disponível para a vegetação, essas se tornam dependentes dos nutrientes trazidos pela água de outras áreas. Contudo, uma vez que a Floresta Paludosa Turfosa sem Água Superficial Aparente seria mais espessa e reteria mais água, a circulação de água seria também mais lenta do que na Floresta Paludosa Turfosa Periodicamente Inundada. Portanto, a segunda teria maior acesso aos nutrientes trazidos pela água.

- A turfeira mais espessa isolaria ainda mais a vegetação do substrato mineral abaixo das turfas, dificultando um possível aporte de minerais por parte dessa camada, algo que poderia ser mais fácil no ambiente da turfeira mais rasa.

Tais fatores somados fariam com que o ambiente da turfeira espessa se tornasse bem mais limitante para as plantas do que o da turfeira rasa, não obstante à condição de grande saturação hídrica nessa segunda, sendo possíveis responsáveis pelas diferenças florísticas e morfológicas entre ambas as comunidades florestais. Para Sztutman (2000, p.98) essas duas comunidades formariam dois subtipos florestais de uma mesma formação originados pela seletividade diferenciada de cada ambiente.

Embora as turfeiras possam se destacar em área ocupada no PECE, existe ainda a floresta sobre morrote (fig. 17), que é livre de alagamentos e seu solo é do tipo podzólico vermelho-amarelo. Localmente a área é conhecida como Morro do Carrapato. Sztutman (op. cit) encontrou 112 espécies nesse ecótopo. O índice de similaridade de Jaccard entre essa unidade florestal e a floresta sobre turfeira delgada foi de apenas ($J = 0,1095$), com 15 espécies comuns a ambas as unidades, equivalente a 32,6% das espécies da floresta sobre turfeira delgada e 13,4% das espécies da floresta sobre morrote, o que aponta para duas comunidades diferentes. Entre estas, nenhuma espécie em comum foi encontrada,

consequentemente, trata-se também de comunidades distintas. A figura 18 auxilia na visualização da diferença fisionômica existente entre essas três florestas, as quais, sobre três ecótopos e compartimentos distintos, são os alvos de identificação desta pesquisa, por meio de imagens multiespectrais processadas com o método sistêmico. No PECE, contudo, existem outras comunidades vegetais.

Figura 17. Floresta sobre morrote (foto: Pacheco, 2008).

Figura 18. Perfis das três unidades florestais (Fonte: SZTUTMAN; RODRIGUES, 2002):
A- floresta turfosa espessa (Floresta de Restinga Paludosa com Turfeira Livre de Inundações); B- floresta turfosa delgada (Floresta de Restinga Paludosa com Turfeira Periodicamente Inundada); C- floresta sobre morrote (Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas).

Capítulo 5 - Análise dos resultados

5.1 Imagens com dados baseados em valores de níveis de cinza

O primeiro procedimento de processamento realizado foi baseado em imagens com valores de dados em níveis de cinza e os resultados são mostrados a seguir.

5.1.2 Análise dos dados estatísticos básicos

Seguindo os procedimentos metodológicos adotados para o realce espectral das três unidades florestais do PECE, o primeiro passo foi a elaboração de índices espectrais com a finalidade de realçar as respostas dos compostos bioquímicos da vegetação. Os alvos de realce foram as respostas das clorofilas, carotenoides, água foliar e outros compostos bioquímicos com ênfase no amido e na lignina. É possível visualizar as distintas características dos índices espectrais formados através do apêndice (A).

A comparação estatística dos dados presentes nos índices pode ser feita ao se analisar as matrizes *S* e *R* referentes à área do PECE. Embora existam dados referentes a setores que extrapolem o parque, sem interesse específico para esta pesquisa, grande parte da cena refere-se à resposta espectral da vegetação do local. Na tabela 6 estão apresentados em acréscimo à matriz *S* os valores de covariância média, obtidos pela média aritmética das covariâncias referentes a cada índice. Já na tabela 7 tais dados são apresentados de forma padronizada através da matriz *R*.

Tabela 6- Matriz de variância-covariância.

	1/2	3/1	3/2	3/4	3/5	3/8
1/2	0,020817	0,016817	0,057349	0,028152	0,064977	0,099004
3/1	0,016817	0,029790	0,077888	0,035583	0,092228	0,130901
3/2	0,057349	0,077888	0,221561	0,106601	0,261499	0,379785
3/4	0,028152	0,035583	0,106601	0,088683	0,171664	0,254579
3/5	0,064977	0,092228	0,261499	0,171664	0,402130	0,555846
3/8	0,099004	0,130901	0,379785	0,254579	0,555846	0,880105
Covariância Média	0,05326	0,070683	0,176624	0,119316	0,229243	0,284023

Tabela 7- Matriz de correlação.

	1/2	3/1	3/2	3/4	3/5	3/8
1/2	1,000000	0,675307	0,844451	0,655217	0,710176	0,731441
3/1	0,675307	1,000000	0,958712	0,692287	0,842641	0,808424
3/2	0,844451	0,958712	1,000000	0,760492	0,876074	0,860050
3/4	0,655217	0,692287	0,760492	1,000000	0,909025	0,911244
3/5	0,710176	0,842641	0,876074	0,909025	1,000000	0,934339
3/8	0,731441	0,808424	0,860050	0,911244	0,934339	1,000000
Correlação Média	0,723318	0,795474	0,859956	0,785653	0,854451	0,8491

Observa-se através dos dados apresentados nas matrizes que nenhum índice possui correlação inferior a 60%, nem mesmo correlação em sentido inverso, sendo a correlação média mínima superior a 72%. Logo, tratam-se de imagens com dados bastante correlacionados, o que em termos práticos significa que apresentam em grande grau um mesmo padrão espacial de variações das características espectrais. A princípio, isso poderia ser considerado uma evidência de estarem de fato informando sobre alvos com características gerais semelhantes (no caso, sobre a vegetação, já que a porcentagem de solo exposto é pequena). No entanto, não se pode esquecer o fato de os dados dos índices se referirem a imagens com valores originais em níveis de cinza, os quais, embora mantenham relações diretamente proporcionais com os valores de radiância para as respectivas bandas que representam, não são proporcionais entre estas. Assim, tem-se uma variável externa à interação da REM com as plantas, que interfere nos resultados.

Uma questão que chama muito a atenção na análise das variâncias e correlações é a diferença nas magnitudes das variâncias dos índices 1/2 e 3/2, pois, apesar de ambos informarem basicamente sobre as clorofilas, apresentam diferenças significativas no tamanho da variância (superior a 10 vezes). É importante atentar, no entanto, para o fato de que “a variância e o desvio padrão medem a variabilidade absoluta de uma amostra. Portanto, a variabilidade de amostras de grandezas diferentes ou de médias diferentes não pode ser comparada diretamente pelas estimativas da variância ou do desvio padrão obtidas” (FERREIRA, 1996, p.24). A variância é uma medida univariante. Outras medidas estatísticas multivariantes, como a covariância e os coeficientes de correlação, devem ser usadas para comparar o grau de similaridade dos padrões espaciais de reflectância contidos nas imagens (JENSEN, 1996). A tabela 8 apresenta os dados estatísticos básicos de cada índice espectral utilizado e mostra como se tratam de variáveis com grandezas diferentes, o que impede a comparação direta entre os valores de variância ou desvio padrão. No caso do coeficiente de variação, o mesmo demonstra a importância da dispersão de cada índice em relação a suas respectivas médias, podendo, portanto, ser uma medida de comparação alternativa entre os índices.

Tabela 8- Dados estatísticos básicos dos índices espectrais.

Índices	Valor Mínimo	Valor Máximo	Média	Desvio Padrão	Coef.de Variação
1/2	1,032967	2,480000	2,020828	0,144281	7,14%
3/1	0,402597	2,227273	1,440430	0,172598	11,98%
3/2	0,540984	4,741935	2,927679	0,470703	16,08%
3/4	0,680000	4,214286	2,286816	0,297797	13,02%
3/5	1,062500	6,350000	4,103812	0,634137	15,45%
3/8	1,240000	8,916667	5,657298	0,938139	16,58%

Retomando a análise das correlações entre os índices espectrais, devido ao grande nível de correlação entre os mesmos, seria de se esperar que a aplicação da análise de componentes principais produzisse imagens com dados organizados de forma diferente em relação àqueles apresentados pelos índices originais.

Dessa forma, a ACP foi aplicada tanto a partir da matriz S como a partir da matriz R (apêndices B e C). As tabelas 9 e 10 mostram os autovalores das CPs produzidas a partir de cada matriz, os quais equivalem as suas variâncias (particularmente para o caso dos autovetores referentes a matriz S, como será visto).

A tabela 11 mostra as variâncias das CPs produzidas a partir da matriz S medidas diretamente nas novas imagens geradas, demonstrando, ao ser comparada com a tabela 9, a equivalência entre os seus autovalores e as variâncias das CPs produzidas. A relativa surpresa foi, no entanto, a verificação de que os dados da tabela 12, os quais mostram a variância das imagens geradas a partir da ACP com o uso da matriz R, não corresponderam com os respectivos autovalores da matriz R (tabela 10), tão pouco a variância foi disposta em ordem decrescente. Algo que não deveria ocorrer conforme a natureza da técnica.

Tabela 9- Matriz de autovalores da matriz de variância-covariância.

CPs	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
Variância	1,531962	0,059241	0,034111	0,010920	0,006565	0,000287
Var. %	93,24%	3,61%	2,08%	0,66%	0,40%	0,02%

Tabela 10- Matriz de autovalores da matriz de correlação.

CPs	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
Variância	5,068883	0,462204	0,338932	0,068538	0,056655	0,004789
Var. %	84,48%	7,70%	5,65%	1,14%	0,95%	0,08%

Tabela 11- Variância das CPs geradas a partir da matriz de variância-covariância

CPs	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
Variância	1,531962	0,059241	0,034111	0,010920	0,006565	0,000287
Var. %	93,24%	3,61%	2,08%	0,66%	0,40%	0,02%

Tabela 12- Variância efetiva das CPs geradas a partir da matriz de correlação com índices não padronizados.

CPs	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
Variância	1,103484	0,154789	0,014290	0,260970	0,047827	0,061726
Var. %	67,16%	9,42%	0,87%	15,88%	2,91 %	3,76 %

A discussão sobre as diferenças entre o uso das matrizes S e R no processamento de imagens de sensoriamento remoto é pouca. Entretanto, quanto ao material consultado, foi possível perceber que muitas vezes a mesma é feita de forma bastante abrangente e pouco esclarecedora. Em manuais de processamento de imagens é possível encontrar declarações como: *“Tipicamente, use a matriz de covariância quando calcular as componentes principais. Use a matriz de correlação quando a magnitude dos dados entre as bandas se diferenciarem fortemente e a normalização for precisa”* (RSI, 2004, p.676, tradução nossa).

As poucas discussões geralmente feitas sobre a temática em questão podem transmitir a idéia de que cabe apenas decidir entre o uso das matrizes S e R para a geração de novas imagens, enfoque este incompleto, o qual pode conduzir a procedimentos equivocados.

De acordo com Landim (2006, p.67), quando duas variáveis não são diretamente comparáveis, deve-se executar a padronização delas, isto é, as mesmas devem possuir média 0 e variância unitária. Em outras palavras, considerando a aplicação da ACP no processamento de imagens multiespectrais, não se deve aplicar os autovetores da matriz R (que é a padronização da matriz S e que possui variância unitária e média 0) sobre as imagens não padronizadas preliminarmente, pois as novas geradas não apresentarão os resultados previstos por tal técnica. Esse foi o provável motivo da falta de sucesso do uso da ACP a partir da matriz R na presente aplicação, pois foram usados autovetores baseados em dados padronizados sobre imagens não padronizadas.

O enfoque incompleto dado frequentemente à discussão dessa temática, em um campo que não é o da estatística, mostra-se mais evidente considerando que a ACP, a partir da matriz R , requer dados (imagens) padronizados para funcionar efetivamente, informação geralmente ausente nos manuais de sensoriamento remoto. Outra questão a ser considerada é que, para dados padronizados, “a matriz de variâncias-covariâncias e a de coeficientes de correlação tornam-se idênticas” (LANDIM, op. cit.). Portanto, para imagens padronizadas, não há diferença prática entre as CPs produzidas a partir das duas matrizes, pois ambas são equivalentes, e, conseqüentemente, as imagens geradas. No caso das não padronizadas, não se deve aplicar a matriz R , pois a ACP, embora promova mudanças na distribuição da variância, não o faz conforme os objetivos da técnica. Dessa forma, o melhor enfoque deveria ser entre o uso de imagens com distribuição de valores padronizada e não padronizada.

As tabelas 13 e 14 mostram como a ACP, aplicada a partir da matriz R , não obteve sucesso em produzir imagens não correlacionadas e como a mesma técnica, aplicada a partir da matriz S , foi bem sucedida.

Tabela 13- Matriz de correlação das CPs geradas a partir da matriz de correlação dos índices espectrais.

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
CP1	1,000000	-	-	-	-	-
CP2	-0,850398	1,000000	-	-	-	-
CP3	-0,229997	-0,059125	1,000000	-	-	-
CP4	-0,928475	0,867408	0,085924	1,000000	-	-
CP5	-0,770356	0,709626	0,310660	0,615115	1,000000	-
CP6	0,933887	-0,613321	-0,414831	-0,805811	-0,679305	1,000000

Tabela 14- Matriz de correlação das CPs geradas a partir da matriz de variância-covariância dos índices espectrais.

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
CP1	1,000000	-	-	-	-	-
CP2	-0,000000	1,000000	-	-	-	-
CP3	0,000000	-0,000000	1,000000	-	-	-
CP4	0,000000	-0,000000	-0,000000	1,000000	-	-
CP5	-0,000000	-0,000000	-0,000000	0,000000	1,000000	-
CP6	0,000000	-0,000000	-0,000000	-0,000000	-0,000000	1,000000

Barbetta (2008, p.255) apontou que os coeficientes de correlação não devem depender das unidades de medidas dos dados; por isso, eles devem ser padronizados, como apontado pela equação 18:

$$x' = \frac{x - \mu}{S_x} \quad (\text{equação 18})$$

Onde:

x' é um valor padronizado.

x é um valor da variável X.

μ é a média dos dados da variável X.

S_x é o desvio padrão dos dados de X.

Os valores padronizados de dada variável, portanto, nada mais são do que os resultados das razões entre os desvios da média dos dados dessa variável e o desvio padrão da própria variável. Com base nos dados padronizados, a correlação (r) entre duas variáveis x' e y' pode ser dada pela aplicação da equação 19.

$$r = \frac{\sum(x'.y')}{n - 1} \quad (\text{equação 19})$$

Onde:

$\sum(x'.y')$ é a soma dos produtos dos pares de valores padronizados.

n é o tamanho da amostra (poderia ser da população, retirando-se da fórmula o -1).

É possível perceber claramente pela equação 19 que o coeficiente de correlação nada mais é do que a covariância entre os dados padronizados das variáveis.

A figura 19 ilustra a representação da distribuição de dados em dois espaços bidimensionais (com duas variáveis). Enquanto em um espaço (x e y) os dados entre duas variáveis não são padronizados; no outro (x' e y'), os mesmos estão padronizados. Ou seja: os dados são quantificados de forma relativa em termos do quanto se afastam da média em unidade de desvio padrão.

Figura 19. Diferenças na distribuição dos dados entre duas variáveis (Fonte: Barbetta, 2008, p.256).

Para resolver o problema de índices com distribuição dos valores não padronizada, foram executadas as padronizações daqueles com os quais se trabalhou, antes da avaliação dos resultados da ACP. As Tabelas 15 e 16 mostram as matrizes S e R obtidas.

Tabela 15- matriz de variâncias-covariâncias das imagens padronizadas.

	1/2	3/1	3/2	3/4	3/5	3/8
1/2	0,987762	0,668143	0,834725	0,646792	0,701680	0,722446
3/1	0,668143	0,987093	0,946651	0,683263	0,831807	0,798023
3/2	0,834725	0,946651	0,987513	0,750620	0,864911	0,849028
3/4	0,646792	0,683263	0,750620	0,987648	0,897439	0,899643
3/5	0,701680	0,831807	0,864911	0,897439	0,987021	0,922309
3/8	0,722446	0,798023	0,849028	0,899643	0,922309	0,986954

Tabela 16- matriz de correlação das imagens padronizadas

	1/2	3/1	3/2	3/4	3/5	3/8
1/2	1,000000	0,676650	0,845174	0,654843	0,710640	0,731696
3/1	0,676650	1,000000	0,958826	0,692002	0,842715	0,808515
3/2	0,845174	0,958826	1,000000	0,760060	0,876066	0,860008
3/4	0,654843	0,692002	0,760060	1,000000	0,908951	0,911215
3/5	0,710640	0,842715	0,876066	0,908951	1,000000	0,934468
3/8	0,731696	0,808515	0,860008	0,911215	0,934468	1,000000

Observando-se a tabela 15, é possível notar facilmente que as variâncias dos índices com base em critérios de arredondamento é 1, enquanto as covariâncias também são, na prática, as mesmas que os coeficientes de correlação mostrados na tabela 16. Analisando-a é possível ainda perceber que seus dados são, na prática, os mesmos da tabela 7, que é a matriz R calculada a partir das imagens não padronizadas. Verifica-se, portanto, que as matrizes R das imagens não padronizadas e padronizadas são equivalentes, bem como a matriz S das imagens padronizadas. Consequentemente, os autovetores gerados tanto a partir da matriz R quanto da matriz S das imagens padronizadas produziram imagens idênticas.

A tabela 17 mostra os autovalores obtidos para as CPs geradas a partir da matriz R e aplicada sobre os índices padronizados. Isso finalmente, permitiu a obtenção de imagens não correlacionadas entre si e com distribuição decrescente de variância, ao contrário do que ocorreu anteriormente.

Tabela 17- Autovalores das CPs geradas a partir da matriz de correlação e dos índices padronizados.

CPs	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
Autovalores	5,069479	0,463164	0,337557	0,068436	0,056579	0,004785
Autov. %	84,49%	7,72%	5,63%	1,14%	0,94%	0,08%

5.1.3 Análise das componentes principais geradas a partir da Matriz S e das composições coloridas formadas

Uma vez geradas as CPs, a próxima etapa consistiu em escolher três delas para formarem as composições coloridas falsa cor. Para tanto, além das próprias CPs, a matriz de transformação (transposta da matriz de autovetores) também foi consultada (tabela 18), (A matriz de transformação é apresentada de forma que as linhas informem sobre cada componente principal e as colunas sobre o peso relativo de cada índice na formação de cada CP).

Tabela 18- Matriz de transformação gerada a partir da matriz de variância-covariância.

	1/2	3/1	3/2	3/4	3/5	3/8
CP1	0,089069	0,120013	0,345541	0,221584	0,497322	0,749557
CP2	0,190595	0,302758	0,778868	-0,218255	0,126040	-0,449282
CP3	0,156991	0,051936	0,258101	-0,268375	-0,790262	0,457713
CP4	0,450377	-0,243604	0,153021	0,794420	-0,239570	-0,160950
CP5	0,719137	-0,457860	-0,143097	-0,443925	0,234037	0,029773
CP6	0,459452	0,788833	-0,404299	0,055389	-0,010149	-0,004160

Observando-se a matriz de transformação gerada a partir da matriz S, percebe-se que na CP1 os pesos dominantes em sua formação são respectivamente dos índices 3/8 e 3/5 (exatamente os que possuem maior variância entre o conjunto de índices espectrais, sendo, portanto, algo previsível). Uma vez que tal CP não possui contribuição exclusiva de um único índice, embora possua domínio, não é possível afirmar que equivale ao 3/8, contendo dados diferentes desse último devido a contribuições efetivas dos demais índices para sua formação. A variância total retida por essa CP foi de 93,24% do total disponível no sistema.

A CP2, com 3,61% da variância total do conjunto de índices possui o peso de contribuição mais expressivo em sua formação do índice 3/2, informando predominantemente sobre as clorofilas. A CP3, com 2,08% da variância total do sistema, pode informar

dominantemente sobre os compostos bioquímicos que formam a matéria seca, contrastando claramente com a baixa contribuição dos índices ligados aos pigmentos. A CP4, com 0,66% da variância, possui no índice 3/4, o qual informa sobre água foliar, a principal fonte de peso para sua formação. A CP5, com 0,40% da variância total, possui peso dominante do índice 1/2 o qual informa dominantemente sobre as clorofilas. A CP6, com apenas 0,02% da variância total do sistema, é dominada pelo peso do índice 3/1, que informa sobre as clorofilas e carotenoides.

Além da análise dos autovetores, é possível utilizar outros instrumentos para análise dos *scores* (imagens) gerados em relação às variáveis originais. Com base em Varella (2009) e Jensen (2002), é possível mencionar outra forma de verificar os pesos ou *loadings* de participação das variáveis originais nas componentes principais aplicando-se a equação 20.

$$w_n = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\text{Var}(X_n)}} \quad (\text{equação 20})$$

Onde:

w_n é o peso da variável X_n na formação da CP y .

a_{ij} é um coeficiente do autovetor y .

$\sqrt{\text{Var}(X_n)}$ é o desvio padrão da variável relacionada ao coeficiente do autovetor y .

Duas observações podem ser feitas a partir da análise da fórmula anterior. A primeira é que o peso de contribuição de uma variável na formação de determinada CP passa a ser interpretada de forma relativa, pois não se considera apenas o valor absoluto do coeficiente do autovetor referente a tal variável, mas, também, a magnitude da variância dessa variável. A segunda é que a aplicação dessa fórmula sobre os coeficientes gerados a partir da matriz R resultará nos próprios coeficientes dos autovetores, o que não ocorre

para o caso dos coeficientes dos autovetores gerados a partir da matriz S, os quais serão relativizados.

Uma vez obtidos os pesos relativos de cada variável na formação de dada CP, de acordo com Varella (2009), é possível obter a correlação entre determinada CP e certa variável original pela aplicação da equação 21, a qual também informa sobre a influência dessa variável sobre a CP gerada.

$$Corr(X_j, Y_i) = \sqrt{\lambda_1} \frac{a_{ij}}{\sqrt{Var(X_n)}} \quad (\text{equação 21})$$

Onde:

$Corr(X_j, Y_i)$ é a correlação entre uma variável X e uma CP Y.

$\sqrt{\lambda_1}$ é a raiz quadrada do autovalor correspondente aos coeficientes do autovetor ao qual está relacionado.

A fórmula apontada pela equação 21 foi aplicada sobre os dados dos autovetores e autovalores resultando nas correlações apresentadas na tabela 19 que são os *factor loadings*:

Tabela 19- Coeficientes de correlação entre as CPs e os índices espectrais.

	1/2	3/1	3/2	3/4	3/5	3/8
CP1	0,764085	0,860631	0,908609	0,920963	0,970685	0,988921
CP2	0,321524	0,426945	0,402743	-0,178384	0,048377	-0,116564
CP3	0,200962	0,055575	0,101272	-0,166444	-0,230163	0,090110
CP4	0,326196	-0,147489	0,033972	0,278767	-0,039478	-0,017928
CP5	0,403850	-0,214939	-0,024632	-0,120783	0,029903	0,002571
CP6	0,053948	0,077427	-0,014551	0,003151	-0,000271	-0,000075

Percebe-se que considerar a correlação entre as CPs e os índices espectrais, para identificar a influência de uma variável original sobre a nova variável gerada, pode levar a indicações divergentes das obtidas com a análise exclusiva da matriz de transformação dos autovetores gerados a partir da matriz S . Daí a ambiguidade mencionada durante a revisão bibliográfica. No caso da CP1, por exemplo, na qual os pesos de contribuição dos índices que informam sobre a matéria seca são dominantes, ao se atentar para os coeficientes de correlação (ou fatores de carregamento), percebe-se que essa CP também é altamente correlacionada com todos os índices. Isso permite concluir que a mesma representa a informação comum de todos eles, não obstante ao grande domínio do peso de um índice, o qual, por possuir maior variância, acaba mascarando a importância dos demais.

Nas outras CPs, dominam amplamente as correlações apenas fracas com os índices espectrais. Algo esperado, já que representam apenas uma pequena parcela da variância original.

O fato de um índice apresentar peso maior na formação de uma CP, gerada a partir da matriz S , portanto, não significa necessariamente que ambos serão os mais correlacionados. Um exemplo é o índice 3/2 que possui maior peso na formação da CP2; entretanto, o mais correlacionado com a mesma é o 3/1, portanto, o mais influente (desconsiderando os efeitos das diferentes variâncias). Por isso, ressalta-se, novamente, que surge uma certa ambiguidade para a interpretação da origem das informações das CPs geradas a partir da matriz S . Considerando, entretanto, que as novas imagens são produzidas a partir dos autovetores, cujas influências das diferentes magnitudes das variâncias dos índices espectrais se fazem presentes, os mesmos são usados aqui como critério para interpretação da origem das informações das CPs obtidas com a matriz S .

Após feitas as composições coloridas, tanto com as imagens (*scores*) geradas a partir da matriz S quanto com aquelas produzidas a partir das padronizadas e com o uso da matriz R, foi aplicado o filtro de convolução passa baixa com máscara de 11 x 11.

Depois de tal aplicação prosseguiu-se para a etapa seguinte: recuperação da informação textural através da imagem de albedo. Para isso, foram feitas duas experiências. Na primeira, foi aplicada a ACP a partir da matriz S nas bandas do VIS e SWIR das imagens originais; contudo, o resultado foi uma CP1 com tonalidades baixas de níveis de cinza, mesmo com a aplicação de realce linear (fig. 20).

Figura 20. Carta-imagem com informações sobre o albedo (CP1 sobre as bandas originais do VIS e IR refletido a partir da matriz de variância-covariância na forma de carta-imagem).

O albedo com dados concentrados em valores mais baixos de níveis de cinza prejudica a visualização das comunidades vegetais realçadas, bem como impede a percepção de maiores detalhes da cena. Para resolver o problema, foi feito um realce adicional na imagem de albedo.

O procedimento adicional de realce consistiu na aplicação da técnica de realce gaussiano a qual, como lembrou Richards e Jia (2006, p.99), promove alterações no histograma, de forma que o mesmo passa a concentrar os níveis de cinza em valores intermediários. Assim, se um histograma concentra seus valores originalmente em baixos níveis de cinza, o realce gaussiano acaba aumentando o brilho, ao deslocar os valores para regiões mais intermediárias. A imagem resultante da aplicação do realce gaussiano pode ser vista na figura 21.

Figura 21. Carta-Imagem com informações sobre o albedo (CP1 gerada a partir da matriz de variância-covariância com realce gaussiano adicional).

Outra alternativa considerada foi adotar apenas a imagem da banda 3, na região do NIR, como fonte de informação textural sobre a vegetação. Sobre ela também foi aplicado o realce linear. A reflectância nessa região está associada basicamente à área foliar dos dosséis e, tratando-se de espaço com domínio da vegetação, seria de se esperar um brilho

mais elevado devido ao *red edge*, resultando em imagem com tonalidades mais claras e com certo grau de informações texturais (fig. 22).

Figura 22. Carta-imagem com informações sobre o albedo (banda 3 com realce linear).

As figuras (carta-imagens) 23 e 24 mostram a composição RGB: 643 com as duas distintas fontes de albedo utilizadas a fim de mostrar os impactos gerados pelo uso das

diferentes fontes de albedo e, nos apêndices D e E, é possível verificar e comparar as ilustrações de todas as composições formadas com essas duas fontes²⁰.

Figura 23. Carta-imagem mostrando a composição RGB 643 com albedo baseado na CP1 gerada a partir da matriz de variância-covariância.

²⁰ A resolução espacial foi reduzida por se tratarem de apêndices de ilustração.

Figura 24. Carta-imagem mostrando a composição RGB 643 com albedo baseado na banda 3.

5.1.4 Análise das componentes principais geradas a partir da matriz R e das composições formadas

Após a padronização dos índices espectrais, de forma que passassem a possuir média 0 e variância unitária, foi aplicada a ACP a partir da matriz R, embora pudesse ser usada também a matriz S sem diferença significativa. A tabela 20 mostra os coeficientes de cada autovetor obtido.

Tabela 20- Matriz de transformação gerada a partir da matriz de correlação das imagens padronizadas.

	1/2	3/1	3/2	3/4	3/5	3/8
CP1	0,370083	0,402131	0,427079	0,397668	0,425920	0,423538
CP2	0,564553	0,273210	0,349593	-0,566490	-0,280410	-0,291350
CP3	0,682853	-0,648422	-0,200202	0,249215	-0,080480	0,067792
CP4	0,030807	0,082285	0,114838	0,499279	0,150464	-0,840940
CP5	-0,065712	0,178226	0,154311	0,453482	-0,842960	0,154518
CP6	-0,269746	-0,551961	0,786326	-0,062590	0,016295	0,009244

Quanto maior for o coeficiente de um autovetor gerado a partir da matriz R, maior será a correlação da CP com o índice espectral ao qual se refere o coeficiente. Nesse sentido, há pleno ajuste entre as informações fornecidas pela matriz dos autovetores e os índices de correlação presentes na matriz de *factor loadings*, ao contrário do que ocorre com o uso da matriz S. Logo, a interpretação dos dados obtidos com a matriz R são mais nítidos.

Cabe enfatizar, também, que os autovetores da matriz R são determinados com base na correlação, de forma que a CP de maior ordem representará a informação comum a todos os índices, enquanto as demais CPs mostrarão dados mais independentes, com o domínio de um ou poucos índices espectrais, os quais carrearão a informação com eles correlacionadas nos demais índices espectrais (PACHECO; ALMEIDA, artigo em

preparação). Assim, são sobre os índices de maior peso, na formação de uma CP, que as novas imagens mais informam.

A tabela 21 mostra os coeficientes de correlação entre os índices espectrais e as CPs formadas.

Tabela 21- Correlação entre os índices espectrais e as CPs (*Factor Loadings*).

	1/2	3/1	3/2	3/4	3/5	3/8
CP1	0,833260	0,905418	0,961590	0,895369	0,958980	0,953617
CP2	0,384213	0,185936	0,237920	-0,385532	-0,190836	-0,198282
CP3	0,396736	-0,376731	-0,116317	0,144793	-0,046759	0,039387
CP4	0,008059	0,021526	0,030042	0,130613	0,039362	-0,219992
CP5	-0,015630	0,042393	0,036705	0,107867	-0,200509	0,036754
CP6	-0,018659	-0,038181	0,054393	-0,004330	0,001127	0,000639

A CP1 que reteve 84,49% da variância foi a que apresentou a maior correlação com todos os índices espectrais ao mesmo tempo, representando a informação comum em todos eles. Na CP2, com 7,72% da variância, houve o domínio de contribuição do índice que informa sobre a água foliar (3/4) (o qual é também o mais correlacionado com essa CP), e importante participação do índice que informa sobre clorofilas (1/2). A CP3, com 5,63% da variância se correlacionou predominantemente com o índice que informa sobre clorofilas (1/2), o qual possui maior peso em sua formação com importante participação em sentido inverso de outro que também informa sobre clorofilas e carotenoides (3/1). Na constituição das CPs 4 (1,14% da variância) e 5 (0,94% da variância), houve contribuição mais efetiva dos índices que informam sobre matéria seca, respectivamente o 3/8 (ênfase na lignina) e o 3/5 (ênfase no amido). Por fim, na CP6, que ficou com apenas 0,08% da variância, ocorreu o domínio do índice que informa sobre as clorofilas (3/2).

Com relação às imagens de albedo introduzidas nas composições formadas com essas CPs, têm-se que foram experimentadas também as duas fontes de informações

apresentadas anteriormente (feitas a partir da CP1; porém, desta vez, gerada a partir da matriz R, bem como a partir da banda 3 das cenas originais). Nas figuras 25 e 26, é apresentada a composição 643 com as duas distintas fontes de albedo, enquanto nos apêndices F e G é possível verificar a ilustração de todas as composições formadas com essas mesmas fontes.

Figura 25. Carta imagem-mostrando a composição RGB 643 com imagem de albedo baseada na CP1 gerada a partir da matriz de correlação.

Figura 26. Carta-imagem mostrando a composição RGB 643 com imagem de albedo baseada na banda 3 das imagens originais.

5.2 Imagens com dados baseados em valores de reflectância de superfície

5.2.1 Análise dos dados estatísticos básicos

Os procedimentos de realce foram também aplicados sobre as imagens com dados dos *pixels* baseados em níveis de reflectância de superfície. Foi possível perceber resultados notavelmente diferentes em relação aos dados estatísticos dos índices com os valores dos *pixels* baseados em níveis de cinza, como pode ser conferido nas tabelas 22 e 23. Os índices gerados são mostrados no apêndice H.

Tabela 22- Matriz de Variância-Covariância

Índices	1/2	3/1	3/2	3/4	3/5	3/8
1/2	0,036302	-0,191430	0,074026	-0,002993	0,007097	0,015049
3/1	-0,191430	7,827015	3,286752	0,640418	0,881350	1,054767
3/2	0,074026	3,286752	2,908743	0,464087	0,719021	0,889191
3/4	-0,002993	0,640418	0,464087	0,424577	0,190452	0,232865
3/5	0,007097	0,881350	0,719021	0,190452	0,316316	0,323476
3/8	0,015049	1,054767	0,889191	0,232865	0,323476	0,493371

Tabela 23- Matriz de Correlação

Índices	1/2	3/1	3/2	3/4	3/5	3/8
1/2	1,000000	-0,359128	0,227808	-0,024107	0,066229	0,112449
3/1	-0,359128	1,000000	0,688837	0,351307	0,560132	0,536749
3/2	0,227808	0,688837	1,000000	0,417607	0,749599	0,742259
3/4	-0,024107	0,351307	0,417607	1,000000	0,519693	0,508791
3/5	0,066229	0,560132	0,749599	0,519693	1,000000	0,818833
3/8	0,112449	0,536749	0,742259	0,508791	0,818833	1,000000

É necessário ressaltar que, com o uso dos valores de reflectância de superfície, as variâncias dos índices espectrais ganham maior relação física com a vegetação, à medida que as diferenças em suas magnitudes se relacionam com as variações dos índices de

reflectância de cada *pixel* das imagens originais. Esses, por sua vez, ocorrem devido a interações diversas entre as plantas e a REM, ainda mais com a eliminação ou forte redução das interferências de variáveis externas, na atmosfera ou diferentes quantidades de irradiância solar nas diversas porções do espectro.

Observando-se as variâncias dos índices espectrais, percebe-se que o 3/1 possui maior magnitude e informa sobre os pigmentos. É possível perceber ainda a forte redução do tamanho das variâncias dos índices 3/5 e 3/8, os quais informam sobre a matéria seca e são maiores para aqueles baseados em valores de níveis de cinza. Tais fatos influenciam grandemente a ACP aplicada a partir da matriz S, tornando-a distinta das CPs geradas pelas imagens com valores dos *pixels* em níveis de cinza.

Outra forte diferença dos índices baseados em valores de reflectância é a existência de covariâncias inversas, algo que não se presenciou quando se trabalhou com valores baseados em níveis de cinza. Ao se analisar a matriz R, percebe-se índices com correlação fraca, embora ocorram médias e fortes também. Tal resultado indica que a alta correlação entre os índices referentes às imagens com valores de *pixels* em níveis de cinza pode ser devido, em grande parte, às distorções geradas com a aplicação da razão de bandas sobre imagens com esses valores, e não tanto como evidência de todos os índices estarem informando sobre a vegetação. Como já fora esclarecido, comparam-se bandas diretamente não comparáveis, ao se trabalhar com níveis de cinza, provocando distorções nos resultados finais do processo de razão de bandas.

Tais resultados também apontam que, ao se trabalhar com índices orientados ao realce de compostos distintos da cobertura vegetal, podem ser esperados valores de correlações não muito fortes, já que eles se relacionam com tais compostos em diferentes quantidades. Dessa forma, os índices menos correlacionados informam sobre compostos diferenciados e de maneira mais independente, embora não totalmente.

De toda forma, através das tabelas 24 e 25, é possível verificar as distintas distribuições dos autovalores entre as CPs geradas a partir das matrizes S e R, que equivalem à distribuição das variâncias. Já nos apêndices I e J, é possível verificar as características visuais das CPs geradas.

Tabela 24- Autovalores gerados a partir da matriz de variância-covariância.

CPs	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
Autovalores	9,881359	1,462829	0,389381	0,189667	0,067742	0,015347
Auto. %	82,30%	12,18%	3,24%	1,58%	0,56%	0,13%

Tabela 25- Autovalores gerados a partir da matriz de correlação.

CPs	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
Autovalores	3,396945	1,242736	0,699874	0,379194	0,180802	0,100450
Auto. %	56,65%	20,71%	11,65%	6,32%	3,01%	1,67%

5.2.2 Análise das componentes principais geradas a partir da matriz S e das composições coloridas formadas

Na tabela 26, é possível verificar a matriz de transformação dos autovetores gerada a partir da matriz S. Percebe-se que a CP1 que reteve 82,3% da variância tendenciou informar mais sobre as clorofilas e carotenóides, ao dominar em sua constituição o índice 3/1. A CP2, com 12,18% da variância, tendeu a informar predominantemente sobre as clorofilas (com domínio do índice 3/2). A CP3, por sua vez, com 3,24% da variância teve como tendência informar mais sobre a água foliar (com domínio do índice 3/4). A CP4, com variância de 1,58%, tendeu a informar mais sobre a matéria seca, com ênfase na lignina (domínio do índice 3/8), enquanto a CP5 com 0,56% da variância enfatizou o

amido (domínio do índice 3/5). Por fim, a CP6, com apenas 0,13% da variância, teve como tendência informar predominantemente sobre as clorofilas (com domínio do índice 1/2).

Tabela 26- Matriz dos autovetores

	1/2	3/1	3/2	3/4	3/5	3/8
CP1	-0,013271	0,869915	0,446780	0,086869	0,120410	0,146337
CP2	-0,109495	0,488571	-0,773514	-0,148077	-0,215827	-0,287189
CP3	-0,061642	0,002026	-0,354016	0,819767	0,263649	0,359638
CP4	0,038528	-0,011317	0,251719	0,543750	-0,396152	-0,694568
CP5	0,059042	0,009797	0,024860	0,052062	-0,841958	0,533100
CP6	0,989477	0,065715	-0,112943	0,011569	0,059822	-0,012178

A tabela 27 mostra a correlação entre os índices espectrais e as CPs geradas.

Tabela 27- Correlação entre os índices e as componentes principais (*factor loadings*).

	1/2	3/1	3/2	3/4	3/5	3/8
CP1	-0,218951	0,977433	0,823473	0,419078	0,672993	0,654901
CP2	-0,695066	0,211216	-0,548545	-0,274857	-0,464133	-0,494513
CP3	-0,201883	0,000452	-0,129526	0,785054	0,292518	0,319497
CP4	0,088066	-0,001762	0,064278	0,363427	-0,306759	-0,430650
CP5	0,080654	0,000911	0,003794	0,020796	-0,389636	0,197538
CP6	0,643357	0,002910	-0,008204	0,002200	0,013177	-0,002148

Após montadas as composições coloridas falsa cor, foi aplicado o filtro de convolução passa baixa com máscara de 11x11. Em seguida, foi introduzida a imagem de albedo e novamente se testou as duas fontes alternativas de informação textural, como feito anteriormente. As figuras 27 e 28 ilustram, através de cartas-imagens, os resultados alcançados para a composição 356, com o uso de tais fontes de dados sobre o albedo, enquanto os apêndices L e M mostram as demais composições formadas.

Figura 27. Carta-imagem mostrando a composição RGB 356 com imagem de albedo baseada na CP1 gerada a partir da matriz de variância-covariância.

Figura 28. Carta-imagem mostrando a composição RGB 356 com imagem de albedo baseada na banda 3 das imagens originais.

5.2.3 Análise das componentes principais geradas a partir da matriz R e das composições formadas.

A tabela 28 mostra a matriz de transformação com os autovetores gerados a partir da matriz R, enquanto a tabela 29 mostra a correlação entre os índices espectrais e as CPs. Nelas, verifica-se que a CP1, com 56,65% da variância, possuiu contribuição para sua

formação de forma balanceada, informando mais sobre o padrão espectral comum a quase todos os índices com os quais é bastante correlacionada. A CP2, com 20,71% da variância, informou predominantemente sobre as clorofilas (com domínio do índice 1/2). A CP3, com 11,65% da variância, informou mais sobre a água foliar (com domínio do índice 3/4). A CP4, com 6,32% da variância, mostrou um grande equilíbrio de contribuição para sua formação de todos os índices, mas com domínio daqueles que informam sobre a matéria seca com ênfase na lignina (ligeiro domínio do índice 3/8). Já a CP5, com 3,01% da variância, informou de forma bem mais independente sobre a matéria seca com ênfase também na lignina (ligeiro domínio do índice 3/8). Finalmente, a CP6 tendeu a informar mais sobre as clorofilas, com apenas 1,67% da variância (e com domínio do índice 3/2).

Tabela 28- Matriz de transformação gerada a partir da matriz de correlação.

	1/2	3/1	3/2	3/4	3/5	3/8
CP1	0,017134	0,410298	0,483470	0,352433	0,488993	0,484041
CP2	-0,873647	0,436439	-0,155974	0,025416	-0,077054	-0,123896
CP3	-0,085576	-0,343567	-0,330367	0,874870	-0,003397	-0,009334
CP4	0,283017	0,447771	0,356861	0,331079	-0,482560	-0,499575
CP5	0,007424	0,068671	-0,061800	0,009162	-0,702147	0,705914
CP6	-0,385966	-0,563847	0,708250	0,007086	-0,170477	-0,048744

Tabela 29- Correlação entre os índices e as componentes principais (*Factor loadings*).

	1/2	3/1	3/2	3/4	3/5	3/8
CP1	0,031579	0,756212	0,891074	0,649562	0,901253	0,892126
CP2	-0,973925	0,486534	-0,173877	0,028333	-0,085898	-0,138117
CP3	-0,071592	-0,287423	-0,276380	0,731903	-0,002842	-0,007809
CP4	0,174278	0,275732	0,219750	0,203874	-0,297154	-0,307632
CP5	0,003157	0,029199	-0,026278	0,003896	-0,298559	0,300160
CP6	-0,122327	-0,178705	0,224472	0,002246	-0,054031	-0,015449

Após a seleção das CPs, foram montadas as composições coloridas falsa cor e, posteriormente, foi aplicado uma vez mais, sobre elas, o filtro de convolução passa baixa

com máscara de 11x11. Em seguida, foi introduzida a imagem de albedo e novamente se testou as duas fontes alternativas do mesmo. As figuras 29 e 30 ilustram, através de cartas-imagens, os resultados alcançados para a composição 356 com as duas distintas fontes de albedo, enquanto os apêndices N e O mostram as demais composições formadas.

Figura 29. Carta-imagem mostrando a composição RGB 356 com imagem de albedo baseada na CPI gerada a partir da matriz de correlação.

Figura 30. Carta-imagem mostrando a composição RGB 356 com imagem de albedo baseada na banda 3 das imagens originais.

5.3 Identificação das unidades florestais

Considerando que a finalidade do realce das imagens é possibilitar a obtenção de informações sobre o quadro geobotânico dos diversos ambientes da planície costeira e que o PECE foi escolhido como área teste, surgiu a necessidade fundamental de se questionar sobre a eficácia do método, considerando as várias alternativas testadas.

Como previsto pelos procedimentos metodológicos desta pesquisa, uma vez que as composições coloridas foram elaboradas, as coordenadas das áreas para as quais existiam dados florísticos e de caracterização geobotânica, produzidas por Sztutman (2000), foram plotadas como pontos em composições selecionadas como representantes de cada grupo de composições formadas a partir de cada variante do método sistêmico (uso da matriz S e R através de imagens com valores padronizados, valores de reflectância e níveis de cinza). Tal plotagem foi feita para servir como parâmetro de avaliação dos resultados alcançados.

É importante mencionar que, ao longo desta pesquisa, foram feitos ainda caminhamentos em campo para verificação complementar das características dos ecótopos. Durante esses, foram coletados pontos de controle por meio de GPS os quais possibilitaram confirmar as coordenadas apresentadas por Sztutman (2000) e as fortes alterações nas características de cada um dos três ecótopos. Tais alterações puderam ser facilmente e empiricamente constatadas em uma inspeção das características fisionômicas das comunidades vegetais e das condições hidrológicas dos solos.

Após serem analisadas as imagens com os dados plotados, constatou-se que, em termos visuais, algumas foram mais eficazes no realce das distintas unidades florestais em relação a outras. De toda forma, o método permitiu separar de maneira clara as unidades

florestais caracterizadas por Sztutman (2000), através do uso de todas as técnicas adotadas, como mostram as figuras 31, 32, 33 e 34.

Figura 31. Composição 123 gerada a partir da matriz S e de índices baseados em níveis de cinza

Tal composição (fig. 31) indica a existência de três distintas feições espectrais, perfeitamente correlacionadas no espaço com as unidades florestais de fato existentes. Isso indica que, embora os índices espectrais a partir dos níveis de cinzas possam conter distorções, ainda assim, é possível utilizá-los no método sistêmico, apesar dos riscos provenientes da presença de dados espúrios em relação às propriedades físicas das plantas.

O uso de composição gerada a partir da ACP, baseada na matriz R, e dos dados dos índices padronizados, baseados em imagens com valores em níveis de cinza, também

permitiu apontar a existência de três feições espectrais perfeitamente relacionadas com as três distintas unidades geobotânicas do PECE (figura 32). Observa-se, entretanto, as claras diferenças nas características das feições espectrais dessa composição em relação às feições da composição baseada na matriz S.

Figura 32. Composição 123 formada a partir dos dados padronizados e da matriz R dos índices baseados em níveis de cinza.

As composições formadas a partir de imagens com valores de *pixels* em níveis de reflectância têm como vantagem possuírem menor grau de risco de realce de dados espúrios. A figura 33 mostra que as feições espectrais geradas a partir da composição 123, formada a partir de dados de reflectância de superfície e baseada na matriz S, também apontaram a existência das três distintas unidades geobotânicas do PECE.

Figura 33. Composição 123 gerada a partir da matriz S com dados baseados em valores de reflectância de superfície.

A figura 34 mostra a composição 123, gerada a partir de dados de índices padronizados e da matriz R, com valores baseados em índices de reflectância de superfície. Novamente, constata-se que as três unidades geobotânicas coincidem com distintas feições espectrais da composição.

Figura 34. Composição 123 formada a partir dos dados padronizados e da matriz R dos índices baseados em valores de reflectância.

Dessa forma, é possível constatar que, a partir das quatro alternativas testadas para o uso do método sistêmico, foi possível detectar feições espectrais correlacionadas com as três unidades geobotânicas para as quais haviam dados disponíveis, embora as características espectrais das composições fossem notavelmente diferentes entre si.

De acordo com Campbell (2007, *passim*) dificilmente ocorre uma perfeita correlação entre as classes de informação (feições do terreno) e as classes espectrais, já que as últimas registram variações devido a vários motivos. Entretanto, para as composições mostradas houve boa correlação.

A composição colorida 356, gerada a partir da matriz S e com dados baseados em valores de reflectância de superfície, foi escolhida para aplicação do classificador de

máxima verossimilhança, com a finalidade de mapear as feições espectrais para geração de um esboço de mapa de unidades geobotânicas do PECE (figura 35).

Figura 35. Esboço do mapa das unidades geobotânicas do PECE.

A classificação foi feita com base na hipótese de que comunidades vegetais diferentes apresentariam feições espectrais igualmente distintas e no fato da existência de

dados a respeito de três unidades geobotânicas que foram correspondentes com classes espectrais também distintas, mostrando que, no pior dos cenários, haveria correspondência parcial entre as feições espectrais da composição utilizada e as distintas unidades geobotânicas do PECE.

Considerando que não há dados de campo sobre outras áreas do parque, o esboço gerado não é tido como concluído, mas como um mapa de probabilidades de ocorrências de unidades geobotânicas do PECE, o qual necessita de levantamentos de campo adicionais para a caracterização florística e fisionômica de tais unidades, bem como para a caracterização dos ecótopos das respectivas comunidades florestais, confirmando ou não as informações nele apontadas.

Capítulo 6 - Conclusão

A presente pesquisa possibilitou esclarecer inúmeras questões relacionadas ao uso do sensoriamento remoto multiespectral na prática da geobotânica e na ligação desta com a geografia.

Em um primeiro momento foi possível verificar que a geobotânica não se constitui em um campo novo de estudo, embora essa denominação tenha caído em desuso, não sendo tão utilizada atualmente pelos pesquisadores envolvidos com o estudo da relação planta-meio. Muitas pesquisas geobotânicas, na realidade, têm recebido outras denominações (como fitogeografia, por exemplo).

Ficou claro, ainda, que o avanço tecnológico permite a elaboração de novas formas de aquisição de informações sobre as comunidades vegetais, as quais, por sua vez, podem servir como indicadores das características dos distintos ambientes, potencializando o uso do sensoriamento remoto como instrumento auxiliar para o levantamento de recursos naturais na superfície, no solo e mesmo no subsolo terrestre.

Os procedimentos metodológicos voltados ao processamento de dados de imagens multiespectrais adotados nesta pesquisa são relativamente novos (embora as técnicas utilizadas não sejam). Uma de suas características mais inovadoras é a busca da maior utilização dos recursos espectrais dos sensores, através do uso de bandas geralmente pouco utilizadas nas pesquisas sobre a vegetação, como ocorre com as bandas do SWIR, geralmente preteridas pelo intenso uso do VIS e NIR.

Em todo esse contexto, o problema central colocado na presente pesquisa foi se os procedimentos metodológicos utilizados seriam capazes de permitir a identificação de

comunidades vegetais distintas e que estão relacionadas a condições também diferenciadas do meio físico (principalmente dos solos e substratos) em área de planície costeira coberta pela Floresta Atlântica. Em outros termos, buscou-se saber se as feições espectrais obtidas a partir dos procedimentos metodológicos adotados se correlacionariam com as feições de informações do terreno para o qual se dispunha de dados que permitiriam a avaliação dos resultados. Em teoria, era de se esperar resultados positivos com a aplicação do método; porém, o presente trabalho indicou em termos experimentais seus bons resultados em áreas de planícies costeiras cobertas pela Floresta Atlântica, cujo contexto ambiental permite apontar forte dependência entre as comunidades vegetais e as características do meio físico.

Durante esta pesquisa foram levantadas questões relacionadas ao método sistêmico não abordadas anteriormente, como as diferenças entre o uso das matrizes S (com dados das imagens com distribuição não padronizada) e R (com distribuição dos dados das imagens padronizada) para aplicação da ACP. Verificou-se que ambas podem ser usadas para o realce de feições espectrais, apesar de as imagens formadas não serem exatamente as mesmas e ocorram algumas mudanças na forma de interpretar os autovetores. Observou-se ainda a existência de certa lacuna na literatura consultada sobre a aplicação da ACP, a partir da matriz de correlação no processamento de imagens de sensoriamento remoto multiespectral, uma vez que isso requer a padronização prévia dos dados das imagens, o que torna as matrizes S e R equivalentes. Portanto, é útil focar a questão na aplicação da ACP a partir de imagens com distribuição dos dados de forma não padronizada e imagens com distribuição dos dados de forma padronizada, evitando eventuais equívocos para os iniciantes e menos experientes em processamento de imagens, já que é possível aplicar os autovetores gerados a partir da matriz de correlação sobre dados não padronizados, o que não é o correto para os objetivos da ACP.

Ainda no âmbito do desenvolvimento do método sistêmico, analisou-se também as diferenças entre o uso de imagens com valores de *pixels* em níveis de cinza e em valores de reflectância com correção atmosférica. Percebeu-se resultados estatísticos consideravelmente diferentes.

Embora em termos de dados estatísticos os resultados tenham sido bastante distintos; na prática, as imagens geradas a partir dos dois tipos de dados foram capazes de realçar as comunidades vegetais diferenciadas. Entretanto, em teoria, seria aconselhável usar as imagens com valores dos *pixels* em níveis de reflectância, pois os dados e as imagens tendem a ser mais confiáveis.

A presente pesquisa mostrou também que há situações nas quais alguns procedimentos adicionais de realce podem ser requeridos, como ocorreu no caso da necessidade de aplicação do realce gaussiano sobre a CP1, para que esta pudesse ser usada adequadamente como fonte de informação sobre a arquitetura dos dosséis das comunidades vegetais, já que, originalmente, caracterizou-se por baixo brilho.

Considerando o sucesso dos procedimentos metodológicos em realçar as três distintas comunidades vegetais do PECE, para as quais havia dados de caracterização disponíveis na literatura científica, procedeu-se a aplicação de classificação digital supervisionada, a partir do classificador de máxima verossimilhança, sem limites de probabilidades preestabelecidos, obtendo-se com isso um mapa hipotético das unidades geobotânicas do PECE. Apesar de os procedimentos metodológicos terem sido capazes de realçar três comunidades vegetais, seria bastante desejável a realização de novos levantamentos de campo para identificação de outras apontadas como existentes. O mapa gerado pode servir como contribuição, portanto, para novos levantamentos florísticos, pedológicos e mesmo geológicos, auxiliando na determinação da localização das novas áreas amostrais prioritárias. Nesse contexto, cabe então mencionar a importância dos

levantamentos de campo, isso porque o método sistêmico não os substitui, mas pode servir como um eficiente instrumento de orientação para os mesmos.

A origem das distintas comunidades florestais presentes no parque está relacionada com a seleção das espécies (por parte das características ambientais de cada compartimento ou ecótopo nele presentes), pela competição entre elas, bem como pela história natural de desenvolvimento da área, que se localiza em zona de grande dinamismo hidrológico, inclusive com influência histórica das variações no nível do mar.

Como resultado da existência de manchas de cobertura vegetal bem definidas no PECE, a técnica de razão de bandas permitiu realçar as distintas composições bioquímicas de tais comunidades, a partir do uso dos registros das interações entre a radiação eletromagnética e tais compostos, representados pelas imagens originais utilizadas. Já a análise de componentes principais possuiu, como principal função, na prática, a produção de imagens não correlacionadas, tendo permitido a otimização do realce de contraste ao serem formadas as composições coloridas falsa cor, com o benefício da técnica ter permitido relativo controle sobre a origem dos dados que compuseram cada nova imagem gerada, ou os *scores* dos componentes principais. O uso do filtro de convolução passa-baixa, por sua vez, permitiu reduzir os ruídos e dados isolados presentes nos *scores* dos componentes principais. De forma adicional às características bioquímicas das comunidades vegetais realçadas pela razão de bandas, o uso da informação textural, originada a partir da arquitetura dos dosséis dessas comunidades e presentes na imagem de albedo, forneceu informações de natureza morfológica das plantas, portanto, relacionadas às diferentes fisionomias das comunidades vegetais.

Conclui-se, assim, que as técnicas utilizadas no método sistêmico, em todas as variações testadas, são alternativas viáveis para a aplicação da geobotânica por sensoriamento remoto multiespectral em áreas cobertas por Floresta Atlântica da planície

costeira, contribuindo, portanto, com o desenvolvimento desse ramo científico, da ecologia da paisagem, da própria geografia e com o planejamento do uso e ocupação de áreas costeiras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB´SABER, A. N. Os **domínios de Natureza do Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.159p.

ALMEIDA, T. I. R. **Geobotânica por sensoriamento remoto em florestas tropicais e a abordagem sistêmica: uma ferramenta auxiliar no mapeamento geológico regional e na prospecção mineral**. Instituto de Geociências. 2005. 158 f. Tese (Livre Docência em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

_____; JULIANI, C; MANTOVANI, W; PÉREZ-AGUILAR, A. Comunidades florestais como indicadores geobotânicos: o caso da mineralização aurífera do Grupo Serra do Itaberapa, Guarulhos, São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, v.37(1), p.1-13. 2007b.

_____; PERROTA, M. M; SOUZA FILHO, C. R; SANTOS, M. G. M. Geobotânica por sensoriamento remoto no mapeamento geológico de região recoberta por floresta amazônica de terra firme: uma avaliação metodológica na região do Vale do Guaporé (RO). in: Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 21-26 Abril 2007a, Florianópolis. **Anais...** INPE, 2007. p.1951-1958. Disponível em: < <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/10.30.22.15/doc/1951-1958.pdf>>.

_____; SOUZA FILHO; ROSSETO, R. ASTER and Landsat ETM+ images applied to sugarcane yield forecast. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, p. 4057-4069, 2006.

_____; SOUZA FILHO, C. R. Principal component analysis applied to feature-oriented band ratios of hyperspectral data: a tool for vegetation studies. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n.22, p. 5005-5023. 20 November, 2004.

ANTUNES, M. A. H; TAVARES JÚNIOR, J. B.. Calibração do sensor CCD_CBERS II com dados do ASTER. In: Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 16-21 Abril 2005, Goiânia. **Anais...** INPE, 2005. p.775-781. Disponível em: < <http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.22.09.38/doc/775.pdf>>.

ARAÚJO, F. S. de; MARTINS, F. R; SHEPHERD, G. J. Variações estruturais e florísticas do carrasco no planalto da Ibiapada, Estado do Ceará. **Rev. Brasil. Biol.**, 59(4), p.663-678. 1999.

ARAÚJO I. L. **Introdução à filosofia da ciência**. 3. ed. Curitiba: UFPR, 2003. 233 p.

AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. Tradução de Maria Juraci Zani dos Santos. 12 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. 332p. Título original: Introduction of climatology for the tropics.

BARBETTA, P. A. **Estatística aplicada às ciências sociais**. 7.ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2008. 315 p.

BARET, F. Espectros de pigmentos e compostos bioquímicos foliares: planilhas com dados de reflectância. Informação escrita enviada por Frédéric Baret, INRA Avignon, França, 1999.

BARRET, E. C; CURTIS, L. F. Introduction to Environmental Remote Sensing, 3. ed. London: Chapman & Hall, 1992. 426 p.

BIANCHINI, E.; POPOLO, R. S.; DIAS, M. C.; PIMENTA, J. A. Diversidade e Estrutura de Espécies Arbóreas em Área Alagável do Município de Londrina, Sul do Brasil. **Acta bot. bras.** 17(3), 405-419. 2003.

BOBEK, H; SCHMITHÜSEN, J. **A paisagem e o sistema lógico da geografia**. In: CORRÊA, R. L; ROSENDAHL, (ORG.), Z. Paisagem, tempo e cultura. 2 ed. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2004. p. 75-83.

BOESCH, H; CAROL, H. Princípios do conceito de paisagem. Boletim Geográfico, vol. 27, n.202, p.27-29, jan-fev. 1968.

BRAUN-BLANQUET, J. Fitossociologia: **bases para el studio de las comunidades vegetales**. Traduzido por Jorge Lalucat Jo. Madrid: H. Blume Ediciones. 1979. p.820.

BROOKS, R. R. **Biological methods of prospecting for minerals**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1983. 322 p.

_____. **Geobotany and biogeochemistry in mineral exploration**. New York: Harper & Row, 1972. 290p.

CCRS. **Fundamentals of remote sensing: a Canada centre for remote sensing tutorial**. Disponível em: <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/index_e.php> Acesso em: 02 Dez. 2008.

CHRISTOFOLETTI, A. Geografia física. **Boletim de Geografia Teorética**, Rio Claro, v. 11, n.21-22, p. 5-18. 1981

CONTI, J. B.; FURLAN, S. A.; **Geoecologia: o clima, os solos e a biota**. in ROSS, J. L.S.; Geografia do Brasil. 4 ed. São Paulo: EDUSP. 2001. p.67-207.

CORREA, S. M. B. B. **Probabilidade e estatística**. 2 ed. Belo Horizonte: PUC Minas Virtual, 2003. 116p.

CORRÊA, R. L; ROSENDHAL, Z. (ORG.). **Apresentando leituras sobre paisagem, tempo e cultura**. In: CORRÊA, R. L; ROSENDAHL, Z. Paisagem, tempo e cultura. 2 ed. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2004. p. 7-11.

COUTINHO, L. M. O Conceito de bioma. **Acta Bot. Bras.** São Paulo, v.20, nº1, p.13-23, Jan./Mar. 2006.

_____. **Botânica**. São Paulo: Ed. Cultrix, 1970. 307 p.

CURRAN, P. J. Remote sensing of foliar chemistry. **Remote Sensing of Environment**. v.30, p.271-278. 1989.

DAJOZ, R. **Ecologia geral**. 4. ed. Petropolis: Vozes, 1983. 472 p.

DAVIS, J. C. **Statistics and data analysis in geology**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1986. 646 p.

DORNELES, L. P. P.; WAECHTER, J. L. Fitossociologia do Componente Arbóreo na Floresta Turfosa do Parque Nacional da Lagoa do Peixe, Rio Grande do Sul, Brasil. **Acta bot. bras.** 18(4): p.815-824. 2004.

EASTMAN, J. R. **IDRISI Andes guide to gis and image processing**. Worcester: Clark University, 2006. 327 p.

ELVIDGE, C. Visible and infrared reflectance characteristics of dry plant materials. **International Journal of Remote Sensing**. v.11. p.1175-1795. 1990.

ERNST. W. G; VAN DE VEN, C. M; LYON, R.J.P. Relationships among vegetation, climatic zonation, soil, and bedrock in the central White-Inyo Range, eastern California: a ground-based and remote-sensing study. **Geological Society of America Bulletin**, p.1583-1597. December 2003.

FERREIRA, D. F. **Estatística Básica**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 1996. 139p.

FLORINSK, I. V. Combined analysis of digital terrain models and remotely sensed data in landscape investigations. **Progress in Physical Geography**. v.22,1. p.33-60. 1998.

FOTH, H. D. **Fundamentals of soil science**. 8 ed. New York: John Wiley & Sons, 1990. 381p.

FRANCO, E. **As formações vegetais do globo terrestre: biocenologia**. v.2 Aracaju: Universidade Federal de Sergipe, 1993.

GUERRA, A. T; GUERRA, A. J. T. **Novo Dicionário Geológico-Geomorfológico**. 3 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. 652p.

HAGGETT, P; CHORLEY, J. **Modelos, paradigmas e a nova geografia**. In: _____; _____ (coord). *Modelos integrados em geografia*. Tradução de Arnaldo Viriato de Medeiros. Rio de Janeiro: LTC / EDUSP, 1974. 222p.

IEZZI, G.; HAZZAN, S. **Fundamentos de Matemática Elementar**. v.4. São Paulo: Atual Ed. 1977. 228p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Mapa **geomorfológico do Estado de São Paulo**. v1. São Paulo: Divisão de Minas e Geologia Aplicada/ Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 1981.

JACKSON, R. D. Remote sensing of biotic and abiotic plant stress. **Ann. Rev. Phytopathol.** 24, p.265-287. 1986.

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment: an earth resource perspective**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000. 544 p.

_____. **Introductory digital image processing : a remote sensing perspective**. 2 ed. Upper Saddle River, N.J : Prentice Hall, 1996. 316p.

JOLLIFE, I. T. **Principal Component Analysis**. 2. ed. New York: Springer, 2002. 487 p.

JPL. **ASTER user handbook: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer**. Disponível em: <http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03_data/04_Documents/aster_user_guide_v2.pdf> Acesso em 02 Dez. 2008.

KLINK, H. J. Geoecologia e regionalização natural. **Biogeografia. IGEOG/USP**. São Paulo, v. 17, p.1-32. 1981

KOKALY, R. F; CLARK, R. N. Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression. **Remote Sensing of Environment**. v.67, p.267-287. 1999.

KRUCKEBERG, A. R. **Geology and plant life: the effects of landforms and rock types on plants**. Seattle: University of Washington Press. 2004. 362 p.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos multivariados**. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/>>. Acesso em 5 nov. 2008.

LEINZ, V; AMARAL, S. E. **Geologia Geral**. 13 ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1998. 399p.

LESER, H. **Landscape ecology**. In EHLERS, E. (Org.). 40 years after: German Geography developments, trends and prospects. Bonn: Geographische Institute der Universität Bonn, 1992. p.99-126.

LILLESAND, T. M; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. 3 ed. New York: John Wiley & Sons, 1994. 750 p.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: Ed. UNIDERP, 2006. 908 p.

LUCHIARI, A; KAWAKUBO, F. S; MORATO, R. G. **Aplicações do sensoriamento remoto na geografia**. In: VENTURI, L. A. B. (org). *Praticando geografia: técnicas de campo e laboratório*. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. p.33-54.

LUIZ, A. J. B. et al. Reflectância a partir do número digital de imagens ETM+. In: Anais XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 05-10 Abril 2003, Belo Horizonte. **Anais...** INPE, 2003. p.2071-2078. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/10.10.19.00/doc/15_015.pdf>.

MATHER, P. M. **Computer processing of remotely sensed images : an introduction**. 3 ed. Chichester, West Sussex, England; Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2004 p.324.

MC DONALD, M. S. **Photobiology of higher plants**. Chichester: West Sussex, England; Hoboken, NJ: John Wiley. 2003. 354 p.

METZGER, J. P. O que é ecologia de paisagens?. **Biota Neotropica**, Campinas, v.1, p.1-9, Dez. 2001.

MILMAN, A. S. **Mathematical Principles of Remote Sensing: making Inferences from Noisy Data**. Chelsea, MI: Sleeping Bear Press, 1999. 406 p.

MORAES, A. C. R. de. **Geografia, pequena história crítica**. São Paulo: Hucitec, 1993. 138 p.

MOREIRA, A. M. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 2 ed. Viçosa, UFV, 2004, 307p.

MORIN, E. **O método 1: a natureza da natureza**. Trad. Ilana Heineberg. 2. ed. Porto Alegre: Sulina, 2003, 480 p.

MUELLER-DOMBOIS, D; ELLENBERG, H.. **Aims and methods of vegetation ecology**.. New York, John Wiley & Sons, 1974. 547 p.

NASA. **ASTER: advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer**. Disponível em: <<http://asterweb.jpl.nasa.gov/instrument.asp>> acesso em: 25/08/2007.

_____. **The Landsat program**. Disponível em: <<http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/landsat7.html>> acesso em: 29/09/2007.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2 ed. Rio de Janeiro: Secretaria de Planejamento da República, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Diretoria de Geociências, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 421p. 1989.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1989. 308p.

ODUM, E. P. **Ecologia**. Tradução: Christopher J. Tribe. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Koogan S. A. 1988. 434p.

OOSTING, Henry J. **Ecologia Vegetal**. Tradução de José G. Vicente. Madrid: Aguilar, 1951. 435p.

PEREIRA, J. L. G.; BATISTA, G. T.; ROBERTS, D. Reflectância de Coberturas Vegetais na Amazônia. In: Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14-19 Abril 1996, Salvador. **Anais...** INPE, 1996. p.551-556. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/sid.inpe.br/deise/1999/01.29.11.41/doc/T262.pdf>>.

PERROTA, M. M. Pré-processamento de imagens do sensor ASTER programa ENVI. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/sensor_aster.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2008.

RICHARDS, J. A; XIUPING, J. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. 4 ed. Berlin: Springer, 2006. 439p.

RIZZINI, C. T. **Tratado de fitogeografia do Brasil**, 2 Ed. Âmbito Cultural Edições. Rio de Janeiro, 747p.1997.

RODRIGUES, C. A Teoria Geossistêmica e sua Contribuição aos Estudos Geográficos e Ambientais. **Revista do Departamento de Geografia/FFLCH/USP**, São Paulo, n.14, p.69-77, 2001.

ROLIM, G. S; SENTELHAS, P. C. Balanço **Hídrico Normal por Thornthwaite & Mather (1955)** – Pariquera-Açu. No ar desde 1998. Disponível em: <<http://www.lce.esalq.usp.br/bhbrasil/Saopaulo/>>. Acesso em: 29 out. 2008.

ROSS, J. L. S. A Morfogênese da Bacia do Ribeira do Iguape e os Sistemas Ambientais. **GEOUSP- Espaço e Tempo**, São Paulo, n°12, p. 2002.

_____. **Geomorfologia e Geografia Aplicadas à Gestão Territorial: Teoria e Metodologia para o Planejamento Ambiental**. 2001. 322 f. Tese (Livre Docência em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

_____; MOROZ, I. C. **Relatório do Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo: escala 1:500.000**. v1 São Paulo: Departamento de Geografia-FFLCH-USP/IPT/FAPESP, 1997. 64 p.

RSI. **ENVI user's guide**. Acesso direto: leitura efetuada por equipamentos periféricos ligados ao computador. 2004.

SABINS, F. **Remote sensing: principles and interpretation**. New York: W.H. Freeman & Co, 1986. 449 p.

SAKAI, E; LEPSCH, I.F; AMARAL, Á. Z. **Levantamento pedológico de reconhecimento semidetalhado da região do Rio Ribeira do Iguape no Estado de São Paulo**, escala 1:100.000. 1983.

SANTOS, M. **Por uma geografia nova: da crítica da geografia a uma geografia crítica**. 6 ed. São Paulo: EDUSP, 2004. 285p.

_____. **A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção**. São Paulo: EDUSP, 2002. 384 p.

SANTOS, R. J. **Um curso de geometria analítica e álgebra linear**. Belo Horizonte: Imprensa Universitária da UFMG, p.694. 2007.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote sensing: models and methods for image processing**. 2 ed. San Diego: Academic Press, 1997. 522 p.

SMITH, L. I. A tutorial on principal components analysis. 2002. Disponível em: <http://www.cs.otago.ac.nz/cosc453/student_tutorials/principal_components.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2008.

STODDART, D. R. **Organismo e Eco-sistema como modelos geográficos**. In: CHORLEY; R. J; HAGGETT, P. (Coord.); Modelos integrados em geografia. Tradução de Arnaldo Viriato de Medeiros. Rio de Janeiro: LTC / EDUSP, 1974. 222 p.

STRASBURGER, E.; NOLL F.; SCHENCK, H.; SCHIMPER, A. F. W. **Tratado de botânica**. 5. ed. Barcelona: Editorial Marin, 1963. 651 p.

SUGUIO, K. Tópicos de geociências para o desenvolvimento sustentável: as regiões litorâneas. **Geologia USP**. Série Didática, São Paulo, v.2, n.1, p.1-40, 2003.

_____. **Geologia do quaternário e mudanças ambientais: (passado + presente = futuro?)**. São Paulo: Paulo's Comunicação e Artes Gráficas. 1999. 366 p.

_____; Martin L. **Mapa Geológico do Litoral Paulista: Iguape**. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, Secretaria de Obras e do Meio Ambiente, Departamento de Águas e Energia Elétrica, 1978. 1 mapa, color., 93 x 59 cm. Escala: 1:100.000.

_____; et al. **Paleoníveis do mar e paleolinhas de costa**. In: SOUZA, C.R.G.; SUGUIO, K.; OLIVEIRA, A. M. S.; OLIVEIRA, P. E. Quaternário do Brasil. Ribeirão Preto: Holos Editora. 2005. p.114-129.

SUMNER, G. N. **Mathematics for Physical Geographers**. London: Edward Arnold, 1978. 236 p.

SZTUTMAN, M; RODRIGUES, R. R. O Mosaico Vegetacional numa Área de Floresta Contínua da Planície Litorânea, Parque Estadual da Campina do Encantado, Pariquera-Açu. SP. Revista **Brasileira de Botânica**, v. 25, n.2, p.161-176, jun. 2002.

SZTUTMAN, M. **O Mosaico Vegetacional da Planície Litorânea de Cananéia/Iguape (SP) e suas Relações com o Ambiente: Um Estudo de Caso no Parque Estadual da Campina do Encantado, Pariquera-Açu.** 2000. 128 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

_____. Caracterização da vegetação do Parque Estadual Campina do Encantado e da Estação Ecológica do Chuás, no baixo curso do rio Ribeira de Iguape. Relatório disponibilizado na sede do Parque Estadual Campina do Encantado datado como ano 2000.

TABARELLI, M; MANTOVANI, W. Riqueza de espécies arbóreas na floresta atlântica de encosta no estado de São Paulo (Brasil). **Revista Brasileira de Botânica.** v.22, n.2, p.217-223, 1999.

TESSLER, M. G.; GOYA, S. C. Processos Costeiros Condicionantes do Litoral Brasileiro. **Revista do Departamento de Geografia.** FFLCH/USP, São Paulo, n.17, p.11-23. 2005.

TIVY, J. **Biogeography: a study of plants in the ecosphere.** 2 ed. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1973. 394p. 1973.

TRICART, J. **Ecodinâmica.** Rio de Janeiro: IBGE-SUPREN, 1977. 91 p.

TROPPMAIR, H. *Ecologia da Paisagem: Uma Retrospectiva.* in: Fórum de Debates Ecologia da Paisagem e Planejamento Ambiental, 1. 2000, Rio Claro. **Anais... Rio Claro: Sociedade de Ecologia do Brasil,** 2000.

USTIN, S. L.; SMITH, M. O.; JACQUEMOUD, S.; VERSTRAETE, M.; GOVAERTS, Y. **Geobotany: vegetation mapping for earth sciences.** In: RENCZ, A. N.(Ed.). Remote Sensing for the Earth Sciences. 3. ed. New York: Wiley, p. 189-248. 1999.

VARELLA, C. A. A. **Análise multivariada aplicada as ciências agrárias: análise de componentes principais.** Disponível em: <<http://www.ufrrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/multivariada%20aplicada%20as%20ciencias%20agrarias/Aulas/analise%20de%20componentes%20principais.doc>> Acesso em: 04 Fev. 2009.

VICENTE, L. E; SOUZA FILHO, C. R; PEREZ FILHO, A. O uso do infravermelho de ondas curtas (SWIR) no mapeamento de fitofisionomias em ambiente tropical por meio de classificação hiperspectral de dados do sensor ASTER. In: Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 21-26 Abril 2007, Florianópolis. **Anais... INPE,** 2007. p.1915-1922, Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.18.28/doc/1915-1922.pdf>>.

VILLAR, E. H. **Geobotánica.** Barcelona: Editorial Labor, 1929. 339 p.

WALTER, H. **Vegetação e zonas climáticas: tratado de ecologia global.** São Paulo: E.P.U. 1986. 325p.

WATTS, David. **Principles of Biogeography.** New York: McGraw-Hill, 1971. 402p.

WEAVER, J. E.; CLEMENTS, F. E. **Plant Ecology**. 2 Ed. New York. McGrae-Hill Book Company, inc., 1938 p.601.

WILKIE, D. S; FINN, J. T. **Remote Sensing Imagery for Natural Resources Monitoring: a guide for first-time users**. New York: Columbia University Press, 1996. 295 p.

ZUNINO, M; ZULLINI, A. **Biogeografía: la dimensión espacial de la evolución**. Tradução de Marcela Pimentel. México, D.F. Fondo de Cultura Econômica, 2003. 359p. Título original: Biogeografia: la dimensione spaziale dell'evoluzione.

Apêndice A – Índices Espectrais (formados a partir de imagens com dados em valores de níveis de cinza)

Apêndice B – Componentes Principais (geradas através da matriz de variância-covariância)

Apêndice C – Componentes Principais (geradas a partir da matriz de correlação)

Apêndice D – Composições Coloridas

Composições formadas com as CPs geradas a partir da matriz de variância-covariância dos índices espectrais e com a CP1 formada a partir da matriz de variância-covariância das imagens originais como imagem de albedo.

Apêndice E - Composições Coloridas

Composições formadas com CPs geradas a partir da matriz de variância-covariância dos índices espectrais e com a banda 3 das imagens originais como imagem de albedo.

Apêndice F– Composições Coloridas

Composições formadas com CPs geradas a partir da matriz de correlação dos índices espectrais e com a CP1 formada a partir da matriz de correlação das imagens originais como imagem de albedo.

Apêndice G – Composições Coloridas

Composições formadas com CPs geradas a partir da matriz de correlação dos índices espectrais e com a banda 3 das imagens originais como imagem de albedo.

Apêndice H – Índices espectrais (formados a partir de imagens com dados em valores de reflectâncias)

Apêndice I- Componentes Principais gerados a partir da matriz de variâncias-covariância dos índices espectrais

Apêndice J- Componentes Principais gerados a partir da matriz de correlação dos índices espectrais

Apêndice L- Composições Coloridas

Composições formadas com CPs geradas a partir da matriz de variância-covariância dos índices espectrais e com a CP1 gerada a partir da matriz de variância-covariância das bandas originais como imagem de albedo.

Apêndice M – Composições Coloridas

Composições formadas com CPs geradas a partir da matriz de variância-covariância dos índices espectrais e com a banda 3 das imagens originais como imagem de albedo.

Apêndice N – Composições Coloridas

Composições formadas com CPs geradas a partir da matriz de correlação dos índices espectrais e com a CP1 formada a partir da matriz de correlação das imagens originais como imagem de albedo.

Apêndice O – Composições Coloridas

Composições formadas com CPs geradas a partir da matriz de correlação dos índices espectrais e com a banda 3 das imagens originais como imagem de albedo.

Anexo A: Coordenadas das áreas com dados florísticos e do meio físico

Coordenadas das áreas com levantamentos florísticos e geoecológicos de acordo com Sztutman (2000).

Floresta Alta do Litoral (Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas – ou Floresta sobre morrote)

Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3	Bloco 4
218271	218271	218381	218424
7271297	7271280	7271254	7271237

Floresta de Restinga Paludosa com Turfeira Periodicamente Inundada (turfeira delgada)

Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3
219375	217220	217364
7272035	7271892	7271771

Floresta de Restinga Paludosa com Turfeira Livre de Inundações (turfeira espessa)

Bloco 1	Bloco 2
218535	218775
7272230	7272240