MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-7893-TDI/742

DADOS RADIOMÉTRICOS (0,400 A 0,900 ㎜) NA AVALIAÇÃO DE EFEITOS DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA EM FOLHAS DE ESPÉCIES DA MATA ATLÂNTICA EM CUBATÃO (SP)

Rita Marcia da Silva Pinto

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. Flávio Jorge Ponzoni e pela Dra. Ursula Maria Lanfer Marquez, aprovada em 06 de abril de 2000.

INPE
São José dos Campos
2000

528.711 : 504.064

PINTO, R. M. S.

Dados radiométricos (0,400 a 0, 900μm) na avaliação de efeitos da poluição atmosférica em folhas de espécies da Mata Atlântica em Cubatão (SP) / R. M. S. Pinto – São José dos Campos: INPE, 2000.

146p. – (INPE-7893-TDI/742).

1.Folha. 2.Estresse de planta. 3.Reflectância espectral. 4.Poluição atmosférica. 5.Radiometria. I. Título.

Aprovado pela Banca Examinadora em cumprimento a requisito exigido para a obtenção do Título de **Mestre** em **Sensoriamento Remoto.**

Dr. Flávio Jorge Ponzoni	**Orientador/Presidente**
Dr. Antonio Roberto Formaggio	**Membro da Banca**
Dr. Mauro Antonio Homem Antunes	**Membro da Banca**
Dr. Sérgio Luis Pompéia	**Membro da Banca Convidado**

Candidato (a) : Rita Marcia da Silva Pinto

São José dos Campos, 06 de abril de 2000.

“*Na natureza não existe prêmios nem castigos há apenas consequências*”
Ingerssoll

A meus pais
e à Dra. Lycia Maria Moreira-Nordemann

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Flávio Jorge Ponzoni e à Dra. Ursula M. Lanfer Marquez, que com segurança me conduziram na elaboração deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo apoio financeiro.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pelo apoio técnico e à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela bolsa de estudos concedida.

Aos funcionários da biblioteca do INPE pela atenção, paciência e competência durante a realização das pesquisas bibliográficas.

Aos colegas do SPD, pelo apoio, carinho e pelos momentos de descontração durante as horas difíceis, e em especial ao Cláudio Correa e ao Marcelo H. P. C. Chaves.

Aos meus amigos Emanuel Giarolla e Clóvis M. do Espírito Santo pelo incentivo e ajuda nos momentos em que precisei.

Aos motoristas do INPE, pela dedicação com que participaram dos trabalhos de campo.

À minha amiga Rita de Cássia Frizzo, pelo apoio no trabalho de laboratório.

À Dra. Corina de Freitas, pelo incentivo e sugestões nas análises estatísticas e principalmente por nunca ter deixado de acreditar na minha capacidade.

Ao Dr. Maurício Alves Moreira, pela sugestões que muito contribuíram para a elaboração do texto deste trabalho.

À Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental, pelo apoio no desenvolvimento do trabalho de campo em especial à Kátia Diniz, Márcio R. Lopes e Rodrigo C. Fialho.

Aos colegas dos laboratórios de Análise de Alimentos e Análises Químicas, da Universidade de São Paulo.

Ao Laboratório Associado de Sensores e Materiais do INPE na pessoa do senhor Huberto Closs.

E, em especial, ao Alexandre S. Dias, pelo amor, companheirismo e incentivo em todos os momentos difíceis e à minha grande amiga Ana Carolina P. Rezende pelas sugestões e críticas.

A todas as pessoas aqui não citadas, mas que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho, meu muito obrigada.

RESUMO

Dentre as aplicações das técnicas de sensoriamento remoto no estudo da vegetação, destaca-se a necessidade de identificar alterações no processo de interação da radiação eletromagnética com a vegetação, ocasionadas por fatores bióticos ou ambientais. A região próxima ao município de Cubatão (SP) tem abrigado inúmeras indústrias que são fontes de poluentes lançados à atmosfera, que por sua vez tem afetado o desenvolvimento da vegetação. Esse trabalho tem como objetivo avaliar a possibilidade de utilizar dados radiométricos espectrais na identificação de vegetação afetada por poluentes atmosféricos na região de Cubatão-SP. Na primeira etapa do trabalho, foram coletadas folhas de cinco espécies consideradas tolerantes e cinco consideradas sensíveis a poluentes atmosféricos. Estas espécies encontram-se em três áreas, sendo duas afetadas por diferentes poluentes atmosféricos e uma controle. Essas folhas foram medidas radiometricamente, com SPECTRON SE 590 acoplado a uma esfera integradora (0,400 a 1,100 μm), originando Fatores de Reflectância Direcional Hemisférico (FRDH) que foram comparados estatisticamente, procurando identificar diferenças significativas entre estes FRDHs provenientes de folhas, de mesma espécie, que se desenvolvem nas três diferentes áreas. Na Segunda etapa foram realizadas análises químicas sobre estas folhas e os dados resultantes foram igualmente comparados estatisticamente entre si (entre as três áreas) e foram ainda correlacionados com aqueles provenientes das medidas radiometricas (FRDH). Na terceira etapa, modelos de regressão linear simples foram estabelecidos, tomando como variável dependente as concentrações químicas, e como variável independente os valores de FRDH. Não foi possível comprovar a influência dos poluentes atmosféricos sobre os valores de FRDH e nem tampouco sobre as concentrações de clorofila, carbono, hidrogênio e nitrogênio. As concentrações químicas foram significativamente semelhantes para as três áreas de estudo. O mesmo foi verificado sobre as diferenças dos valores de FRDH e entre as espécies sensíveis e tolerantes. As condições ambientais das três áreas parecem ter exercido maior influência sobre a dinâmica dos valores de FRDH e sobre as concentrações químicas. Através dos modelos estabelecidos é possível estimar as concentrações químicas de alguns elementos a partir de medidas de FRDH especificamente para algumas espécies que se desenvolvem em Cubatão-SP.

RADIOMETRIC DATA (0.400 TO 0.900 mm) IN AN ATMOSPHERIC POLLUTION EFFECTS EVALUATION CONSIDERING LEAVES OF SOME MATA ATLÂNTICA WOODY SPECIES (CUBATÃO SP)

ABSTRACT

The identification of changes in the interaction of electromagnetic radiation and the vegetation due biotic or environmental causes is the main application of remote sensing technology. The region near to Cubatão (SP) has sheltered countless industries that are pollutant. Those sources have affected the surrounding vegetation. The objective of this work is to evaluate the use of spectral radiometric data in the identification of affected vegetation by atmospheric pollutants in the region of Cubatão-SP. In the first step, leaves from 10 different woody species (5 resistant and 5 sensitive to air pollutants) were collected from three different areas. One of these areas was considered as the control area and two others were influencied by several kinds and amounts of air pollutants. That leaves were radiometricaly characterized using an integrating sphere attached on a SPECTRON SE 590 radiometer (400 nm to 1100 nm). Radiometric measures were converted in Hemispherical Directional Reflectance Factors (HDRF), which were statistically compared trying to find significant differences between HDRF values from the three areas, for each specie. In the second step, chemical analysis were performed using the same leaves mentioned above and the contents of chlorophyll, carbon, hydrogen and nitrogen were determined. Statistical analysis were carried out over the chemical data in order to find significant differences between these amounts from the three areas. The correlations between HDRF and chemical contents data were also calculated. In the third step, linear regression models were determined for the relations where the *r* values were greater than 50%, considering the chemical data as the dependent variable and the HDRF as the independent one. The statistical analysis showed no significant influence of atmospheric pollutants on the HDRF values and on the chlorophyll and carbon, hydrogen and nitrogen leaf contents. The chemical concentrations from the three study areas were statistically similar at the α=0,05 level of significance. The same results were obtained for the HDRF values. Environmental conditions at the three areas seem to be the most influent factor in the HDRF values and chemical content dynamics. It is possible to estimate the chemical contents of some elements for specific species from Cubatão region using HDRF measurements and regression models.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....21

1.1 Hipótese..... 23
1.2 Objetivos 23
1.2.1 Objetivo Geral..... 23
1.2.2 Objetivos Específicos..... 23

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... 25

2.1 O problema da liberação de poluentes na atmosfera..... 25
2.2 Comportamento dos poluentes e efeito nas plantas 27
2.3 Estresse..... 33
2.4 Propriedades espectrais de folhas 38

CAPÍTULO 3 MATERIAL E MÉTODOS..... 47

3.1 Área de estudo 47
3.1.1 Condições meteorológicas da região..... 51
3.1.1.1 Circulação atmosférica 51
3.1.1.2 Solos 52
3.1.1.3 Temperatura..... 52
3.1.1.4 Precipitação..... 52
3.1.1.5 Aspectos da vegetação primitiva..... 53
3.2 Identificação das espécies de plantas 53
3.3 Coleta de dados radiométricos..... 55
3.4 Análises químicas 58

3.4.1 Determinação do teor de clorofila e de feofitina 58
3.4.2 Análise de composição elementar de carbono, hidrogênio e nitrogênio (CHN) .. 59
3.4.3 Determinação de umidade 59
3.5 Organização dos dados espectrais..... 60
3.6 Organização dos vetores de FRDH médios visando associá-los aos respectivos valores de concentração química 61
3.7 Análise estatística dos valores de FRDH e das concentrações químicas 63
3.8 Estudo de correlação entre os valores de FRDH e concentração química 64
3.9 Definição dos modelos de regressão linear simples 64
3.9.1 Validação dos modelos..... 66
3.10 Análises estatísticas sobre os valores de FRDH valendo-se de máxima resolução espectral..... 66

CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 69

4.1 Coleta de folhas em campo e definição do número de amostras por análise química 69
4.2 Dados radiométricos 70
4.3 Análise estatística dos valores de FRDHs e das concentrações químicas..... 76
4.4 Modelos de regressão linear simples e suas validações 95
4.5 Análise de Variância e Teste de Tukey considerando a resolução espectral plena 99

CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....103

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....105

APÊNDICE A ANÁLISES DE VARIÂNCIA (ANOVAS) PARA FRDH E CONCENTRAÇÕES QUÍMICAS.....111

APÊNDICE B MODELOS DE REGRESSÃO LINEAR SIMPLES (GRÁFICOS) 125

APÊNDICE C IGUALDADE DE VARIÂNCIA ENTRE AS CONCENTRAÇÕES QUÍMICAS ESTIMADAS PELO MODELO E MEDIDAS EM LABORATÓRIO 135

APÊNDICE D RESULTADOS DAS ANOVAS REFRENTES À VALIDAÇÃO DOS MODELOS 139

APÊNDICE E RESULTADOS DOS TESTES NÃO-PARAMÉTRICOS DE WILCOXON PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS 145

LISTA DE FIGURAS

Pág.

2.1 Interação entre as moléculas dos poluentes gasosos com a folha. 28

2.2 Alguns exemplos de injúrias ocasionadas pela ação de poluentes atmosféricos em diferentes espécies vegetais. 36

2.3 Curva de reflectância típica (ρ) de uma folha verde 38

2.4 Espectro de absorção para clorofila *a*, clorofila b e β-caroteno 39

3.1 Localização das três áreas de estudo. 48

3.2 Localização dos bosques. 50

3.3 Fluxograma geral das atividades desenvolvidas 56

3.4 Obtenção dos valores de FRDH médio de cada uma das bandas espectrais do TM/Landsat. 61

3.5 Fluxograma dos testes estatísticos 63

4.1 Distribuição das amostras coletadas em campo. 70

4.2 Curvas de FRDHs médios obtidos a partir das amostras coletadas em campo. 71

4.3 Curvas de FRDHs médios, na região do visível, obtidos a partir de todas as amostras coletadas em campo. 73

LISTA DE TABELAS

Pág.

2.1 Alterações provocadas nas plantas por deficiências e excessos de alguns minerais 34

3.1 Relação das espécies que foram consideradas..... 54

3.2 Disposição dos dados em planilha eletrônica visando associar os valores de FRDH nas bandas 1, 2, 3 e 4, com as concentrações químicas 62

4.1 Resultados referentes ao teste de igualdade de variância para os valores de FRDH nas bandas 1, 2, 3 e 4 76

4.2 Resultados referentes ao teste de igualdade de variância para clorofila e CHN 77

4.3 Diferença de média, obtida através do teste Kruskal-Wallis, para os valores de FRDH nas bandas 1, 2, 3 e 4 79

4.4 Diferença de média, obtida através do teste Kruskal-Wallis para as concentrações de clorofila e CHN 80

4.5 Resultados do Teste de Tukey para os valores de FRDH, nas bandas 1, 2, 3 e 4..... 81

4.6 Resultados do Teste de Tukey para as concentrações químicas de clorofila e CHN 84

4.7 Valores dos Coeficientes de Correlação (*r*) determinados entre os valores de FRDH e as concentrações químicas de clorofila e CHN. 87

4.8 Modelos de regressão linear simples identificando a relação banda espectral, concentração química e o valor de R^2 96

4.9 Diferenças de médias do Fator de Reflectância em ordem decrescente, obtidas através da aplicação do Teste de Tukey para os comprimentos de onda de 0,402 a 0,801 μm na espécie PS. 101

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Dentre os temas que vêm sendo pesquisados sobre a utilização das técnicas de sensoriamento remoto no estudo dos recursos naturais, destaca-se aquele referente à identificação de vegetação afetada por fatores ambientais.

Algumas pesquisas realizadas têm indicado que os dados orbitais não são apropriados para este tipo de estudo, devido ao fato de as resoluções espaciais, espectrais e temporais não permitirem o registro de possíveis alterações na radiância refletida pela vegetação (Ponzoni e Gonçalves, 1997). Quanto às fotografias aéreas, segundo Disperati (1991), têm sido utilizadas principalmente para a avaliação de danos florestais causados por ataques de insetos em estágios bastante avançados de deterioração dos dosséis.

Em países desenvolvidos, ou em desenvolvimento, tem-se verificado uma crescente preocupação em evitar a degradação do meio ambiente e em fazer um controle da poluição atmosférica. Tal fato pode ser explicado devido às evidências de que o desenvolvimento industrial e as atividades humanas, em larga escala, contribuem de modo decisivo para modificar as condições naturais do meio em que vivemos. No Brasil, vários estudos, que serão citados mais adiante neste trabalho, estão sendo realizados em áreas onde foram constatadas concentrações elevadas de poluentes, com o intuito de auxiliar na diminuição dos processos de degradação ambiental.

Uma das regiões do País que mais sofreu com a deposição de poluentes foi a região de Cubatão-SP. Na década de 80, a Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental (CETESB) iniciou uma série de pesquisas visando identificar as principais formas de ação dos poluentes sobre as espécies vegetais da região, a fim de fornecer subsídios às ações de controle ambiental das fontes emissoras, aos projetos de recuperação de áreas degradadas por poluição e à seleção de espécies bioindicadoras de poluentes atmosféricos.

A região destaca-se pela importância de seu parque industrial, onde é significativa a produção de aço, fertilizantes, cloro, derivados de petróleo e diversos produtos

químicos.

A implantação de um centro industrial na região obedeceu a razões econômicas do final da década de 40, em conseqüência do acelerado desenvolvimento das indústrias na região metropolitana de São Paulo. Contribuiu para a escolha deste local a infra-estrutura já existente e representada pelas vias de comunicação entre o planalto e a baixada e, principalmente, a ligação com o Porto Marítimo de Santos-SP.

Devido à ocupação industrial desordenada e despreocupada com o controle da emissão de poluentes, foi dado início ao processo de deterioração na qualidade do meio ambiente. Uma das conseqüências observadas devido à ação dos poluentes atmosféricos na região é a deposição destes no sistema solo-planta da Serra do Mar que ocasionam graves conseqüências ambientais, sociais e econômicas.

Entre os poluentes atmosféricos encontrados na região destacam-se: fluoretos gasosos e amônia (emitidos principalmente pelas indústrias de fertilizantes), óxidos de enxofre e de nitrogênio (emitidos principalmente por indústrias químicas e pela queima de combustíveis), hidrocarbonetos (produzidos por indústrias petroquímicas) e materiais particulados. Dentre os poluentes secundários são encontrados principalmente o ozônio e o peróxido de acetonitrila, formados fotoquimicamente nas camadas superiores da atmosfera em condições meteorológicas específicas, através da reação de hidrocarbonetos e principalmente dióxido de nitrogênio (Diniz et al., 1996).

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a possibilidade da utilização de dados radiométricos na identificação de vegetação afetada pela ação de poluentes atmosféricos na região de Cubatão-SP. Essa avaliação permitiu adquirir conhecimento sobre o potencial e as limitações do uso de dados provenientes de técnicas de sensoriamento remoto como uma alternativa ao estudo de áreas impactadas por poluentes atmosféricos.

1.1 Hipótese

O presente trabalho baseou-se na hipótese de que plantas que se desenvolvem em regiões onde existem concentrações elevadas de poluentes atmosféricos apresentam alterações na reflectância espectral e nas concentrações de clorofila, carbono, hidrogênio e nitrogênio das suas folhas, em relação àquelas plantas que se desenvolvem em áreas com baixa concentração de poluentes atmosféricos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a possibilidade de utilizar dados radiométricos (espectrais) na identificação de vegetação afetada por poluentes atmosféricos na região de Cubatão-SP.

1.2.2 Objetivos Específicos

- coletar dados radiométricos em folhas de espécies sensíveis e tolerantes a poluentes atmosféricos em três diferentes áreas localizadas no município de Cubatão-SP, sendo uma considerada como controle e duas outras sujeitas a diferentes fontes de poluentes atmosféricos;
- verificar se são significativamente diferentes os valores da reflectância espectral das folhas destas espécies entre as diferentes áreas estudadas, considerando a amplitude espectral compreendida entre 0,400 a 0,900 μm;
- correlacionar os valores de reflectância espectral com concentrações de clorofila e demais constituintes químicos presentes nas folhas caracterizadas espectralmente;
- desenvolvimento de modelos de regressão linear, com a finalidade de estimar as concentrações químicas (variável dependente) mencionadas mediante a realização de medidas radiométricas (variável independente) em folhas;
- e, finalmente, a validação desses modelos e avaliação de seus resultados.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O Problema da Liberação de Poluentes na Atmosfera

O intenso desenvolvimento das atividades humanas em geral e, em particular as de caráter industrial, trouxe como conseqüência a alteração do meio ambiente. Viu-se necessário efetuar trabalhos relativos à detecção e ao controle da poluição e das modificações ambientais, causadas devido as interferências de caráter antrópico.

A poluição se propaga no meio ambiente em geral, contaminando todo o ecossistema pois grande parte do material disperso na atmosfera é precipitado, alterando dessa forma, solos, rios, lagos, vegetação etc. A chuva poluída também provoca o mesmo efeito, além de lixiviar os dejetos superficiais que serão depositados nos rios, lagos, aqüíferos subterrâneos e no oceano. Portanto, os fenômenos da natureza são cíclicos; ou seja, quando contaminada uma parte do ecossistema, existirá o perigo de contaminar grande parte, senão todo o ecossistema (Moreira-Nordemann, 1987).

Uma das cidades do Brasil que mais sofreu com o desenvolvimento desordenado e sem maiores preocupações com a emissão de poluentes no meio ambiente, foi a cidade de Cubatão-SP. Segundo dados obtidos pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), em Cubatão existem 21 indústrias, sendo que 11 são indústrias químicas e petroquímicas, 7 de fertilizantes, 1 de minerais não metálicos, 1 fábrica de papel e papelão e 1 de cimento, totalizando 260 fontes de emissões, que agridem o meio ambiente com lançamentos contínuos de gases fitotóxicos (Mendonça e Paulics, 1996).

Segundo pesquisas realizadas por Pradella et al. (1996), a região de Cubatão é afetada principalmente pela emissão dos seguintes poluentes: dióxido de enxofre, monóxido de carbono, dióxido de nitrogênio, fluoretos, gás sulfídrico, amônia e material particulado. Uma das conseqüências dessas emissões tem sido o desequilíbrio morfodinâmico das escarpas, ocorrido devido à forte degradação na cobertura vegetal da Serra do Mar, que acarretou mudanças no ciclo hidrológico, afetando principalmente o escoamento, a infiltração da água no solo e a resistência mecânica das raízes (Prandini et al. 1976), citado por Mendonça e Paulics (1996). Como conseqüência desses fatores descritos

acima, foi constatado por pesquisadores da CETESB que houve um considerável aumento em número e em intensidade dos escorregamentos nas áreas degradadas na região em questão (Mendonça e Paulics, 1996).

Existem vários trabalhos realizados com o intuito de recuperar a cobertura vegetal da Serra do Mar e evitar os processos de degradação. Dentre eles pode-se citar o de Mendonça e Paulics (1996), que utilizaram um modelo para a recuperação da Mata Atlântica em Cubatão, baseado na sucessão secundária da floresta existente na região. O trabalho foi estruturado em duas etapas: a primeira envolveu a semeadura aérea de espécies pioneiras e tolerantes a poluentes atmosféricos, beneficiando desta forma áreas que estavam desprovidas de vegetação arbórea; a segunda etapa visou acelerar a biodiversidade do ecossistema, através da implantação de 20 bosques contendo espécies secundárias.

Outro trabalho de grande interesse foi a avaliação feita por Diniz et al. (1997) referente aos efeitos de poluentes atmosféricos sobre a vegetação em áreas críticas do Estado de São Paulo. A estratégia utilizada pelos autores foi a de incrementar a diversidade florística das matas secundárias da região, através da implementação de bosques contendo espécies típicas de estágios avançados de sucessão que foram eliminadas pela poluição. Os resultados obtidos indicaram que as mudas que foram plantadas nas áreas mais poluídas apresentaram rebrota, indicando morte da parte aérea da planta, que deve ter ocorrido provavelmente, segundo os autores, pela ação de poluentes atmosféricos. A taxa de crescimento das mudas foi maior em algumas áreas poluídas e menor na área considerada controle, onde acredita-se ser mínima a interferência de poluentes atmosféricos. Os autores acreditam que isso pode ter ocorrido devido ao domínio (incluindo altura média) do dossel das espécies pioneiras e das tolerantes nas áreas poluídas, que protegem fisicamente as mudas introduzidas nos bosques, evitando que estas mudas tenham um contato maior com os poluentes. Foi observado também que as mudas plantadas na primeira linha de cada bosque sofreram mais com a poluição, fato este associado a ventos carregados de poluentes neste perfil.

Valeriano e Ponzoni (1989) realizaram uma avaliação do impacto ambiental na Mata Atlântica em Cubatão utilizando a técnica de fotointerpretação como metodologia de

trabalho. Foram utilizadas fotografias aéreas infravermelhas coloridas para mapear a cobertura vegetal e o uso do solo, cobrindo tanto áreas degradadas como as mais preservadas. Os resultados obtidos nesta avaliação, mesmo que de forma genérica por causa dos poucos parâmetros fisionômicos coletados numa amostragem relativamente pequena, indicaram que o impacto da poluição atmosférica sobre a estrutura florestal se dá através da redução da sua biomassa. Esta redução não se dá de forma generalizada, mas de forma seletiva, afetando preferencialmente as árvores de maior porte da floresta. Considerando que a Mata Atlântica recupera lentamente a capacidade de estabilizar as encostas, prevê-se um longo período em que o risco de acidente natural, devido a escorregamentos será uma grande ameaça à região nos períodos de chuva.

Durante os anos de 1988 a 1993, Tommervik et al. (1998) estudaram os efeitos da poluição atmosférica nos ecossistemas terrestres de duas regiões, sendo uma localizada em Varanger, na Noruega e a outra em Nikel-Pechenga, na Rússia. Essas áreas são muito afetadas pela deposição de SO_2, e através de dados de imagens do Landsat-MSS e de trabalhos de campo, os autores constataram que as áreas de intenso impacto de poluentes atmosféricos aumentaram de 400 Km^2 em 1973 para mais de 5000 Km^2 em 1988. Este estudo também mostrou que a vegetação de liquens, encontrada nestas áreas, diminuiu com o aumento de emissões de SO_2 ocorrido durante os anos abordados nesta pesquisa. Os autores concluíram que os níveis deste poluente estão sendo excessivos para esse tipo de vegetação que é muito sensível a poluentes atmosféricos. Finalmente concluíram que o uso do sensoriamento remoto, utilizado para originar mapas de mudanças na cobertura de vegetação, surgiu para identificar os impactos da poluição atmosférica com sucesso, com uma exatidão de classificação de aproximadamente 80%.

2.2 Comportamento dos Poluentes e Efeito nas Plantas

Neste sub-item serão descritos o mecanismo de absorção estomática e os sintomas provocados por alguns poluentes atmosféricos encontrados em algumas espécies de plantas que se desenvolvem na região de Cubatão.

Estudos sobre poluição atmosférica, de um modo geral, começaram a ser realizados no Brasil na década de 70 (Danelon, 1988). Houve, a partir de então, uma maior

preocupação no meio científico em procurar entender o comportamento dos poluentes e a sua influência sobre o meio ambiente.

Segundo Silva Filho (1988), durante os processos de absorção de CO_2 e de liberação de vapor de água, na presença de luz, outros gases presentes próximo à folha serão também absorvidos pelos estômatos. Uma vez dentro das folhas, esses gases serão difundidos nos espaços intercelulares e absorvidos pelas superfícies do parênquima paliçádico e/ou lacunoso, como ilustra a Figura 2.1.

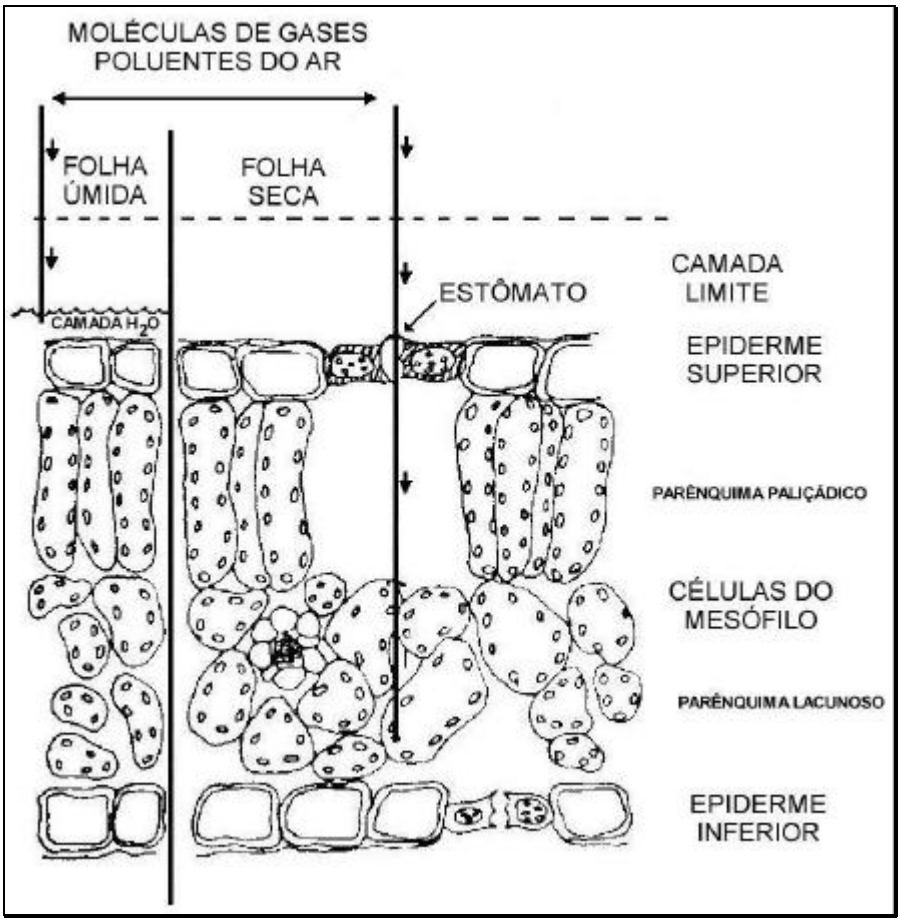


Fig. 2.1 - Interação entre as moléculas dos poluentes gasosos com a folha.
FONTE: Silva Filho (1988, p. 15).

Na presença de água sobre a superfície da folha, os gases podem ser dissolvidos pela camada úmida sobre a própria folha. Já quando a folha está seca, os gases são absorvidos através dos estômatos e, finalmente, podem reagir na superfície ou no

interior das células do mesófilo (Silva Filho, 1988).

A quantidade de poluentes atmosféricos transferidos para o interior da folha é controlada por uma série de resistências, sendo estas as seguintes: 1) atmosférica, sendo alguns dos fatores controladores a velocidade de vento, tamanho e geometria da folha, difusividade e viscosidade do gás; 2) estomática, que é regulada pela abertura dos estômatos, sendo influenciada pelo déficit hídrico, concentração de CO_2, estado nutricional da planta e intensidade luminosa e também pelo déficit de pressão de vapor na atmosfera; 3) mesofílica, regulada pela solubilidade do gás na água, difusão líquida do gás e metabolismo das folhas (Silva Filho, 1988).

Pompéia (1997) apresentou uma breve revisão sobre os efeitos de materiais particulados, fluoretos gasosos, dióxido de enxofre, gases nitrogenados, ozônio e outros poluentes oxidantes sobre a vegetação. Para particulados, os efeitos podem ser de natureza física ou química. No primeiro caso, destacam-se o recobrimento da superfície foliar resultando na redução da incidência da energia solar sobre as células do mesófilo, maior absorção superficial da radiação eletromagnética (REM) e conseqüente aquecimento da folha, seguida da obstrução dos estômatos alterando as trocas gasosas. De qualquer forma, é esperada uma redução na produtividade líquida das folhas e no crescimento vegetal. Os efeitos químicos são decorrentes do grau de reatividade das partículas e de sua interação com os componentes da epiderme foliar. Os tipos de injúrias nas folhas incluem a corrosão da cutícula, plasmólise celular por desbalanço osmótico e ruptura da cutícula por formação de cristais, devido à reação entre seus componentes e solutos contidos na chuva contaminada. Na epiderme, as alterações químicas acarretam, numa primeira etapa do processo, o aumento da transpiração foliar, seguido de morte das células. Em ambas as situações, o autor ressalta que há redução da fotossíntese líquida e redução no crescimento da planta. Segundo Silva Filho (1988), os resíduos de material particulado formam um verdadeiro filme impermeável sobre a superfície da folha, prejudicando dessa forma todos os processos que envolvem as trocas gasosas.

Pompéia (1997) constatou ainda que os fluoretos gasosos em Cubatão-SP são provenientes das indústrias produtoras de fertilizantes fosfatados localizados no Vale do

Rio Mogi. A absorção de fluoretos pelas plantas ocorre predominantemente por via foliar, onde os ânions em sua forma gasosa, penetram pelos estômatos. Dissolvidos na água, estes ânions são transportados pela corrente transpiratória ficando acumulados nas margens e ápice das folhas, provocando lesões características.

Outro poluente que causa alterações nas plantas é o dióxido de enxofre, que devido a sua alta solubilidade em água, grande quantidade é absorvida pelas superfícies úmidas externas da folha, fato este favorecido pelas condições meteorológicas da região de Cubatão (Silva Filho, 1988). Pompéia (1997) constatou que os efeitos do dióxido de enxofre nas plantas está diretamente relacionado à sua absorção pelas folhas e pela sua acumulação em nível celular. Este gás penetra pelos estômatos e atinge o mesófilo, onde é dissolvido na água originando íons sulfito que são assimilados pelas células. O enxofre acumula-se nos vacúolos na forma de sulfatos, constituindo uma reserva inorgânica do nutriente. À medida que o metabolismo celular requer este nutriente, ocorre sua redução e sua incorporação em moléculas orgânicas essenciais, sobretudo em aminoácidos sulfurados e em diversas enzimas. Sua ação altera a permeabilidade das membranas celulares, interfere na fotossíntese reduzindo a fixação de CO_2, acarretando um aumento da respiração e da transpiração e, conseqüentemente, refletindo na queda da produtividade das plantas.

Os gases nitrogenados também são produzidos pelas indústrias de fertilizantes e se apresentam sob forma de dióxido de nitrogênio e amônia. O nitrogênio é um nutriente essencial para a vegetação. Em ecossistemas tropicais úmidos, constitui um dos elementos limitantes no desenvolvimento das plantas devido à acentuada lixiviação de nitrato dos solos provocada pelas chuvas. Quando em concentrações baixas, os efeitos destes gases sobre a vegetação podem ser até benéficos. Eles penetram pelas folhas através dos estômatos (na fase gasosa) e quando dissolvidos em água, os íons amônio e/ou nitrato podem ser absorvidos diretamente pela epiderme através da cutícula. Uma vez no mesófilo, os íons na fase aquosa, penetram nas moléculas onde a amônia é oxidada a nitrato, sendo este acumulado no vacúolo. A medida que se torna necessário, o nitrato é reduzido e incorporado em aminoácidos e em outros metabólitos, sendo utilizados na síntese de proteínas, ácidos nucleicos e outros compostos essenciais. Os

sais nitrogenados, em altas concentrações, podem levar à plasmólise celular e à morte dos tecidos foliares decorrentes do desbalanço osmótico. Pompéia (1997) salienta ainda que a redução do crescimento e da síntese protéica em uma planta sob estresse pode também provocar o acúmulo de amônia em nível celular, uma vez que não há nas plantas mecanismos de inibição retroativa de absorção de nitrogênio. A amônia em excesso é tóxica às células, e algumas plantas possuem mecanismos de desintoxicação pela síntese de aminoácidos, que por não serem incorporados em processos anabólicos, acabam acumulando-se nas folhas.

Através de reações fotoquímicas, principalmente com a participação do dióxido de nitrogênio e hidrocarbonetos, são produzidos poluentes oxidantes como o ozônio (O_3) e o nitrato de peroxiacetil (PAN), sendo esses dois altamente fitotóxicos (Silva Filho, 1988).

Os poluentes oxidantes penetram pelos estômatos e reagem com as membranas das células do mesófilo, principalmente naquelas existentes no parênquima paliçádico. Com as reações de oxidação de componentes das membranas, ocorrem alterações na permeabilidade que podem levar à desidratação e à morte das células, produzindo injúrias características desses poluentes, que são pontos esbranquiçados ou prateados sob a epiderme (Pompéia, 1997). Quanto ao PAN, este causa nas folhas um colapso na camada das células do mesófilo, principalmente junto aos estômatos (Silva Filho, 1988).

Para obter informações da intensidade das causas dos prejuízos da vegetação na região de Cubatão, Klumpp et al. (1993) utilizaram plantas bioindicadoras de poluentes atmosféricos que foram expostas a diferentes distâncias das fontes poluidoras e diferentes altitudes acima do nível do mar. Os efeitos induzidos pela poluição do ar foram avaliados através de sintomas de injúrias visíveis e através de análises químicas das folhas. Os resultados obtidos neste estudo permitiram comprovar que o alto grau de injúria coincidiu com concentrações fortemente elevadas de fluoreto na folha, resultado este confirmado pelas análises químicas.

Através de análises bioquímicas, Diniz et al. (1996) avaliaram a composição de aminoácidos livres em plantas consideradas sensíveis e tolerantes a poluentes atmosféricos na região de Cubatão, a fim de verificar a fitotoxicidade dos níveis de

poluição. Foi observado que a correlação existente entre as alterações metabólicas sofridas pelos vegetais e os poluentes atmosféricos podem ajudar a selecionar plantas que sejam bioindicadores de poluentes.

Os aminoácidos e outros compostos nitrogenados solúveis exercem papéis essenciais no metabolismo da planta. Por serem os principais produtos da assimilação do nitrogênio e precursores de proteínas e ácidos nucleicos, há interesse na investigação da influência do estresse ambiental sobre o seu metabolismo. Numerosos estudos indicam que plantas sujeitas a estresse ambiental apresentam acúmulo de aminoácidos livres (Diniz et al., 1996).

Um sintoma comum entre as condições de estresse é a redução da taxa de crescimento do vegetal. Como não há inibição retroativa da absorção de nitrogênio, a falta de processos anabólicos (síntese protéica e crescimento) leva a um acúmulo de amônia. Sabe-se que alguns vegetais são capazes de se destoxificarem de amônia por meio de síntese de aminoácidos, embora não sejam conhecidas as diferenças de metabolização entre os vegetais sensíveis e tolerantes (Diniz et al., 1996).

Singh et al. (1991) avaliaram o nível de susceptibilidade das plantas a poluentes atmosféricos, envolvendo quatro parâmetros: ácido ascórbico, clorofila total, conteúdo relativo de água e pH da folha. Estes parâmetros foram determinados e analisados conjuntamente através da elaboração de um Índice de Tolerância a Poluentes Atmosféricos (ITPA) das plantas. Os valores de ITPA foram estimados para 69 plantas na região industrial de Varanasi, na Índia. Toda essa região é contaminada por dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio e ozônio. As plantas que apresentaram um alto ITPA foram consideradas tolerantes a poluentes atmosféricos. Com base nos ITPAs, diferentes grupos de plantas foram caracterizados como sensíveis, intermediários, moderadamente tolerantes e tolerantes. O nível de susceptibilidade das plantas a poluentes atmosféricos, conforme indicado através de seus valores de ITPAs, apresentou uma boa correlação quando comparados com as reações de plantas em experimentos feitos em laboratório e no campo. A determinação do ITPA propiciou um método seguro para análises de plantas sensíveis e/ou tolerantes sob condições de campo onde o ar foi contaminado por uma variedade de poluentes.

2.3 Estresse

O termo estresse tem sido usado em trabalhos específicos como perturbações em condições normais em vários níveis, incluindo o meio ambiente e a planta, desde o nível celular até o subcelular. Por exemplo, a seca causa estresse hídrico ou déficit de água, influenciando desta forma o desenvolvimento da planta (Raper Jr e Kramer, 1987). Outro fator que pode ocasionar estresse é a deficiência ou excesso de minerais, que segundo Malavolta et al. (1989), podem ocasionar alterações nas plantas, sendo algumas delas citadas na Tabela 2.1.

TABELA 2.1 - ALTERAÇÕES PROVOCADAS NAS PLANTAS POR DEFICIÊNCIAS E EXCESSOS DE ALGUNS MINERAIS

NITROGÊNIO	
Sintomas de Deficiência	**Visíveis** -Folhas amareladas, inicialmente as mais velhas - Senescência precoce - Folhas menores devido ao menor número de células **Químicos** - Baixo teor de clorofila - Produção de outros pigmentos **Crescimento** - Em geral diminui, com possível aumento no comprimento das raízes **Citológicos** - Pequenos núcleos - Cloroplastos pequenos **Metabólicos** - Redução na síntese de proteínas - Alto conteúdo de açúcares e alta pressão osmótica
Sintomas de Excesso	- Em geral não identificados. Pode haver redução na frutificação
FÓSFORO	
Sintomas de Deficiência	**Visíveis** - Cor amarelada das folhas, a princípio das mais velhas, pouco brilho, cor verde azulada ou manchas pardas - Número reduzido de frutos e sementes - Atraso no florescimento - Ângulos foliares mais estreitos **Químicos** - Aumento de pigmentos vermelhos ou roxos em algumas espécies - Aumento no conteúdo de carbohidratos - Aumento na relação P orgânico/ P inorgânico **Anatômicos** - Restrição na diferenciação dos caules
Sintomas de Excesso	- Não reconhecidos diretamente
POTÁSSIO	
Sintomas de Deficiência	**Visíveis** - Clorose e necrose das margens e pontas das folhas, inicialmente das mais velhas - Menor tamanho de fruto - Deficiência induzida de ferro **Anatômicos** - Diferenciação prejudicada dos tecidos condutores **Químicos** - Menor teor de açúcar e amido em órgão de reserva
Sintomas de Excesso	- Deficiência induzida de magnésio
ENXOFRE	
Sintomas de Deficiência	**Visíveis** - Clorose, primeiro nas folhas mais novas - Folhas pequenas - Enrolamento das margens das folhas - Necrose e desfolhamento - Redução no florescimento **Citológico** - Meiose anormal, talvez pela falta de proteínas específicas **Químicos** - Aumento no teor de carboidratos - Diminuição nos açúcares redutores - Redução na síntese de proteína
Sintomas de Excesso	- Clorose internerval em algumas espécies

Adaptada de Malavolta et al. (1989, p. 89-50)

É importante ressaltar que existem outros minerais cuja deficiência ou excesso, podem alterar o estado morfológico e fisiológico das plantas, sendo esses os seguintes: cálcio,

magnésio, boro, cloro, cobre, ferro, manganês, molibdênio, zinco e alumínio (Malavolta et al., 1989).

Pode-se notar, portanto, que os vegetais sofrem muito com as condições desfavoráveis do meio ambiente, sendo afetados por diferentes tipos de estresses.

Em condições naturais, as plantas estão constantemente expostas a algum tipo de estresse. Por exemplo, mudanças na temperatura do ar podem tornar uma cultura estressada por alguns minutos, enquanto outros fatores podem estressar a planta por dias ou semanas (no caso de água no solo), ou até mesmo meses, quando o estresse é causado por alguns nutrientes (Moreira, 1997).

Segundo Hopkins (1995), os fatores externos que mais comumente provocam estresse nos vegetais podem ser de natureza:

- térmica;
- hídrica (inundação/anoxia; seca/baixo potencial de água);
- salina;
- radiativa;
- química (pesticidas, metais pesados, poluentes do ar);
- biótica (patogênicos, competição).

Assim, estresses em plantas podem ser agrupados em três categorias: 1) solo (conteúdo de água, erosão, estrutura, pH, deficiências de minerais e salinidade); 2) atmosférico (luz, temperatura do ar, umidade, vento, concentração de poluentes no ar); e 3) biótico (inclui competições com ervas daninhas e outras espécies da mesma cultura, insetos, nematóides e vários organismos patogênicos). É difícil estimar a importância de cada tipo de estresse de maneira individual, porque cada um pode ocorrer de maneira mais ou menos casual e a sua ocorrência é geralmente influenciada por interações com outros tipos de estresse (Raper Jr. e Kramer, 1987).

A Figura 2.2 ilustra alguns tipos de injúrias causadas pela ação de poluentes em diferentes espécies de plantas.

A

B

C

D

Fig. 2.2 - Alguns exemplos de injúrias ocasionadas pela ação de poluentes atmosféricos em diferentes espécies vegetais (A – Folhas de rosa injuriadas por dióxido de enxofre; B – Bordas de folhas injuriadas por fluoreto; C – Folhas de ameixa injuriadas por fluoreto; D – Folha injuriada por oxidantes atmosféricos).
(continua)

E

F

G

Fig. 2.2 – Conclusão (E – Folha de tabaco exposta ao ozônio; F – Folhas de feijão preto expostas ao PAN; G – Folha de feijão preto exposta ao ozônio).
FONTE: Hindawi (1970, p. 11-14-16-21-21).

Nem sempre as injúrias podem ser visíveis, sendo às vezes pouco perceptíveis, manifestando-se somente em nível do metabolismo celular (Pompéia, 1997). A injúria visível é estimada, segundo Perazza e Cipriano (1985) a partir da área foliar notadamente alterada, sendo geralmente expressa como a porcentagem da área foliar afetada por necrose ou clorose. Já a injúria pouco perceptível envolve, de um modo geral, alterações bioquímicas ou fisiológicas que conseqüentemente diminuem a produtividade da planta sem que os sintomas sejam perceptíveis. A identificação desse tipo de injúria é quase que impossível de ser detectada em campo (Perazza e Cipriano, 1985).

2.4 Propriedades Espectrais de Folhas

As folhas, quando sadias, apresentam uma curva espectral característica conforme ilustra a Figura 2.3. No entanto, fatores como idade, deficiência de nutrientes e doenças de um modo geral, podem afetar suas propriedades espectrais. Um dos principais sintomas fisiológicos facilmente visíveis é o amarelecimento das folhas; porém, este não pode ser considerado como sendo o único e o primeiro a ser detectável (Ponzoni e Gonçalves, 1997).

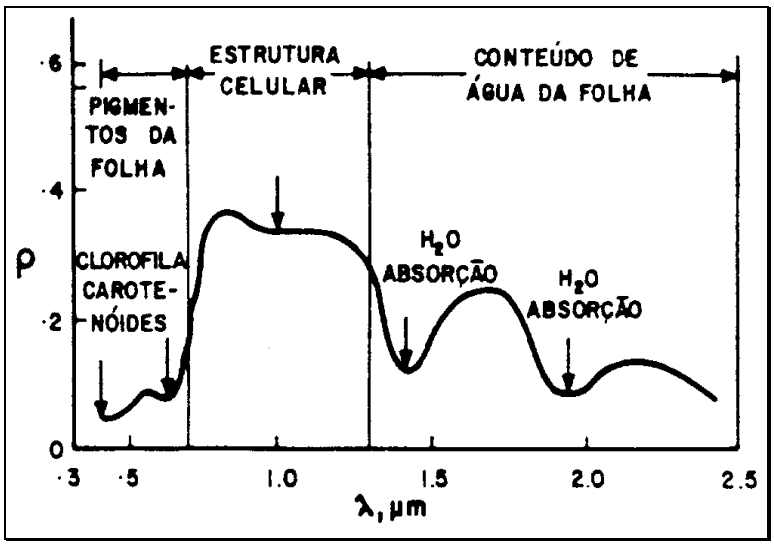


Fig. 2.3 - Curva de reflectância (ρ) típica de uma folha verde
FONTE: Novo (1989, p. 191).

O processo de interação da radiação eletromagnética (REM) com os diferentes tipos de alvos, segundo Ponzoni e Disperati (1995), pode ser caracterizado mediante três diferentes fenômenos: reflexão, absorção e transmissão. Atualmente, tem-se explorado mais o fenômeno de reflexão, uma vez que a abordagem dominante inclui a coleta de dados radiométricos através de sensores situados em nível orbital, que registram a porção de REM refletida pelos objetos presentes na superfície terrestre.

Observando a Figura 2.3, pode-se verificar que a região espectral em questão está compreendida entre 0,400 a 2,500 μm, e pode ser dividida em três regiões (Kumar,

1974):

- **região do visível (0,400 a 0,700 mm)**: nesta região, os pigmentos existentes nas folhas dominam a reflectância espectral. Estes pigmentos, geralmente encontrados no mesófilo, são: clorofila *"a"* e *"b"* (65%), xantofilas (29%) e carotenos (6%). Os valores percentuais destes pigmentos apresentados nas folhas podem variar de espécie para espécie. Devido às características dos pigmentos, a absorção da radiação é maior nos comprimentos de onda em torno de 0,480 μm para clorofila *"b"* e 0,680 μm para clorofila *"a"*, sendo, menos intensamente absorvida entre 0,540 a 0,620 μm conforme pode ser observado na Figura 2.4.

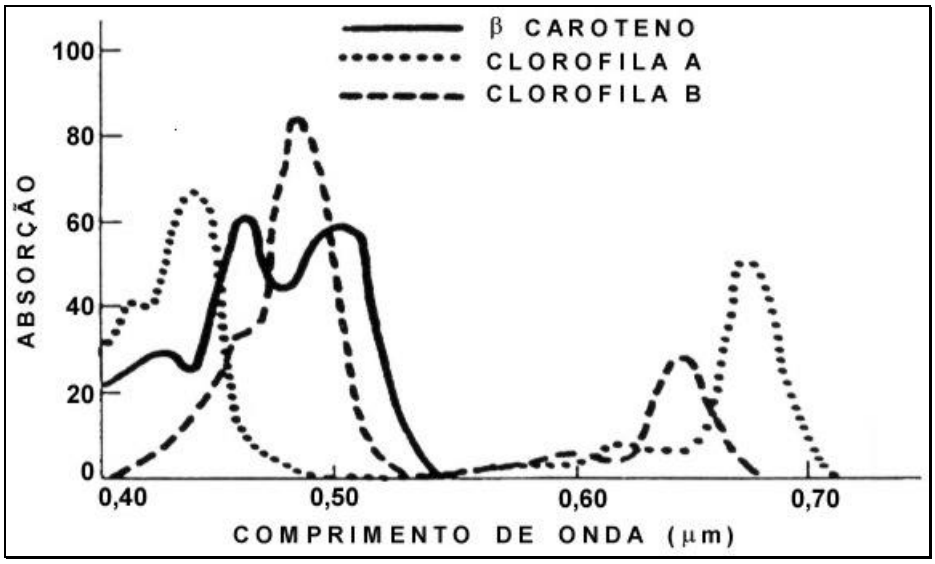


Fig. 2.4 - Espectro de absorção para clorofila *a*, clorofila b e β-caroteno
FONTE: Adaptada de Moreira (1997, p.162).

Nota-se que todos os pigmentos predominantes na folha absorvem a radiação na região do espectro eletromagnético próximo a 0,445 μm que é a região do azul, e somente as clorofilas absorvem na região do vermelho (0,645 μm). Em outras palavras, as clorofilas "a" e "b" absorvem a REM tanto na região do azul quanto na região do vermelho. Alterações nas concentrações destas clorofilas na folha podem alterar esta absorção e, conseqüentemente, modificar a forma da curva de

reflectância (Kumar, 1974);

- **região do infravermelho próximo (0,700 a 1,300 mm)**: nesta região existe uma absorção pequena de REM e considerável espalhamento interno na folha. A absorção da água presente no interior da folha é geralmente baixa e a reflectância espectral é quase constante. Gates (1965) mencionou que a reflectância espectral de folhas nessa região do espectro eletromagnético é o resultado da interação da energia incidente com a estrutura do mesófilo. Fatores externos à folha, como baixa disponibilidade de água, por exemplo, podem causar alterações na relação água/ar no mesófilo, podendo alterar a reflectância de uma folha nesta região. A reflectância nesta região é fortemente afetada pela estrutura anatômica da folha, dependente do número de camadas celulares, do tamanho das células e da relativa espessura do mesófilo esponjoso. As folhas de dicotiledôneas por exemplo, apresentam uma maior reflectância do que as de monocotiledôneas porque estas são desprovidas de mesófilo esponjoso;
- **região do infravermelho médio (1,300 a 2,600 mm)**: a absorção devida à água presente no interior da folha é o fator predominante na reflectância espectral nessa região. Considerando a água, a folha apresenta, na região em torno de 2,0 μm, uma reflectância geralmente baixa, sendo menor do que 10% para uma ângulo de incidência, em relação a horizontal, de 65° e menor do que 5% para um ângulo de incidência de 20°, devido a forte absorção da água. A água absorve predominantemente na região correspondente aos comprimentos de onda de 1,3 a 2,5 μm, principalmente nas faixas de absorção próximas a 1,4; 1,9 e 2,7 μm. Já os picos de reflectância, nesta mesma região, ocorrem entre as regiões de absorção da água, entre 1,6 e 2,2 μm (Assunção et al., 1989).

Danson et al. (1992) realizaram estudos onde demonstraram a relação entre a reflectância espectral, o conteúdo de água da folha e a estrutura foliar. Várias folhas foram medidas, e os resultados obtidos levaram os autores a concluir que a primeira derivada da reflectância espectral, correspondente ao declive da extremidade dos comprimentos de onda longo, podem estar altamente correlacionados com o conteúdo de água da folha e insensíveis para as diferenças da estrutura foliar.

Gausman (1969) realizou um experimento com folhas de algodão no qual durante todo o crescimento, por um período de três semanas, foi controlada a umidade da planta. Foram usados, para o desenvolvimento deste trabalho, tratamentos com níveis de baixo, médio e alta salinidade. Nos primeiros dias foi observado que a reflectância aumentou e a transmitância decresceu para as folhas maduras. Depois de um período de 12 dias verificou-se um decréscimo da reflectância e um acréscimo da transmitância. Foi observado também que neste mesmo período, a espessura da folha aumentou e o número de espaços intercelulares dobrou.

Foi observado também por Guyot (1990) que as propriedades espectrais das folhas mudam significativamente durante os estágios juvenil e de senescência, e que também as folhas de plantas anuais ou de árvores decíduas possuem propriedades ópticas praticamente constantes. Segundo o autor, o desaparecimento da clorofila e a sua substituição por pigmentos marrons, resultante da degradação da clorofila produzem aumento da reflectância no verde e no vermelho. No infravermelho próximo, a reflectância somente aumenta quando a folha seca e quando ocorrem mudanças na sua estrutura interna. No infravermelho médio o aumento da reflectância está relacionado ao secamento da folha, mas verificou-se que o decréscimo do conteúdo de água começa relativamente tarde, quando a folha já está amarela.

Um outro fator que já foi mencionado e que também pode afetar as propriedades espectrais da folha são as doenças, que podem causar a modificação do conteúdo de pigmentos levando à necrose, modificando desta maneira a estrutura anatômica da folha. Com a diminuição da quantidade de clorofila nas folhas pode ocorrer necrose e, conseqüentemente, a reflectância pode ser afetada na região do visível. Nas regiões do infravermelho próximo e médio, a reflectância só será afetada se ocorrerem necroses extremas, associadas com a perda de água e com modificações da anatomia da folha (Guyot et al., 1989).

Carter (1993) procurou através de respostas espectrais de folhas, determinar o estresse em plantas ocasionados por agentes estressantes de origem biológica (competição de plantas, doenças causadas por mofo e infecção por fungos) e físico-químicas (exposição a herbicidas, ação de ozônio e aumento de salinidade em solos arenosos). Os resultados

deste estudo permitiram concluir que a reflectância na região do visível, particularmente na região do verde (0,491-0,575 μm), próximo a 0,550 μm e do vermelho (0,647-0,760 μm), próximo a 0,710 μm, aumentou consideravelmente em função da ação destes agentes, indiferente do tipo de agente estressante ou da espécie. Foi observado então que a região do visível foi mais apropriada para determinar estresse em planta, uma vez que as alterações da reflectância no região do infravermelho somente foram detectáveis quando o estresse foi ocasionado por severa desidratação na folha.

Com relação às deficiências de minerais, estas afetam principalmente o conteúdo de clorofila e, possivelmente, a estrutura anatômica da folha, dependendo do grau de sua intensidade. Neste caso, a deficiência de nitrogênio, por exemplo, causa um aumento da reflectância no visível, devido à diminuição da quantidade de clorofila, uma vez que este elemento é parte estrutural da molécula de clorofila; e nas regiões do infravermelho próximo e médio, causa a diminuição da reflectância devido à redução do número de camadas celulares (Guyot, 1990).

Pelas discussões apresentadas, pode-se considerar que plantas afetadas por algum desses fatores mencionados apresentem alterações na reflectância espectral.

Knapp e Carter (1998) observaram que as propriedades ópticas da folha podem ainda ser influenciadas pelo ambiente em que estas se desenvolvem. Os autores destacaram a iluminação como o principal fator ambiental observado em seus estudos. Eles, utilizando um espectrorradiômetro Spectron SE 590 acoplado a uma esfera integradora LICOR 1800, mediram a reflectância e a transmitância de folhas nos comprimentos de onda de 0,400-0,850 μm, bem como a espessura e a massa foliar específica destas, com o objetivo de avaliar se as respostas espectrais da folha e a disponibilidade de luz foram consistentes para 20 famílias de espécies estudadas. Foi observado que a espessura das folhas e a massa foliar específica não variaram muito entre as espécies, mas no interior do habitat a variância foi alta, sendo que essas pequenas modificações de espessura foram melhor detectadas na região do infravermelho. Os autores constataram que apesar de haver uma forte tendência das folhas espessas estarem em ambientes abertos, somente a massa foliar específica foi significativamente maior em habitats abertos do que em sombrios, sendo observado também que a distribuição do carbono foi baixa em

espécies que estavam localizadas nas áreas sombreadas devido à baixa massa foliar encontrada nessas áreas. Constataram ainda que a variabilidade dos comprimentos de onda máximo e mínimo foram similares para todos os parâmetros ópticos e não diferiram consistentemente entre os ambientes iluminados. No espectro da região do visível, a variação máxima ocorreu onde a absorção de clorofila foi fraca, próximo a 0,555 e 0,712-0,719 μm, e a variação mínima ocorreu onde a absorção de clorofila foi mais forte, no espectro do azul e também próximo a 0,680 μm. Já para os ambientes sombreados, os autores observaram que as folhas tenderam a espalhar REM mais eficientemente, aumentando a absorção e resultando em uma alta reflectância no infravermelho próximo. Os autores acreditam que talvez o espalhamento interno da luz tenha sido maior nas folhas sombreadas devido à baixa luminosidade, o que causou alterações na anatomia foliar. Segundo DeLucia et al. (1996), as folhas típicas de sombra são mais finas, com redução do número de camadas paliçádicas e com parênquima esponjoso mais desenvolvido do que aquele presente em folhas típicas de Sol.

Folhas que se desenvolvem sobre a influência de maior luminosidade tendem a apresentar grau de xeromorfia maior do que aquelas que se desenvolvem em ambientes sombreados (Esau, 1974). É importante ressaltar que uma das características predominantes de folhas xeromorfas é a elevada relação volume/superfície sendo estas menores e mais compactas (Esau, 1974). Segundo estudos realizados pelo autor, as folhas que se desenvolvem sob a influência da luz solar direta são menores porém mais espessas e apresentam tecido paliçádico fortemente diferenciado, ao contrário daquelas que se desenvolvem sobre a proteção da luz.

Através de medidas radiométricas, foi possível constatar que folhas que apresentaram alto índice de salinidade tiveram uma diminuição da reflectância e um aumento da transmitância quando comparadas com folhas da mesma idade cronológica que não apresentaram esses sintomas. As folhas com alto índice de salinidade apresentaram um arranjo de célula mais compacto o que levou a redução da reflectância na região do infravermelho (Meyers, 1983).

Foi observado também por Gausman (1974) que folhas estressadas com um alto índice

de salinidade usualmente têm baixa reflectância na região do infravermelho próximo e médio, comparadas com folhas não estressadas; isto se tiverem a mesma idade. A reflectância das folhas que apresentam mesófilo poroso é mais alta do que as folhas que apresentam mesófilo compacto. Isso ocorre porque maior quantidade de REM atravessa as paredes celulares hidratadas do que nos espaços de ar. A mudança do índice de refração acarreta maior espalhamento da REM, que conseqüentemente aumenta a reflectância. O autor concluiu que partículas subcelulares no interior das folhas têm uma contribuição muito pequena na reflectância da REM na região do infravermelho, comparada com a influência do binômio célula hidratada e interfaces de ar no mesófilo da folha.

Quanto aos estudos referentes a avaliar deficiências nutricionais em plantas através de técnicas de sensoriamento remoto, estes têm se restringido, principalmente, ao nitrogênio (Ponzoni e Gonçalves, 1997).

Através da utilização de valores de reflectância relacionados às mudanças fisiológicas associadas as concentrações de nitrogênio e ao conteúdo de água em folhas de girassol, Peñuelas et al. (1994) constataram que essas mudanças fisiológicas produziram alterações significativas na reflectância das folhas. As folhas de plantas com estresse hídrico e com estresse de nitrogênio tiveram reflectância mais alta na região do visível e mais baixa na região do infravermelho próximo. Os resultados obtidos sugeriram a necessidade de se usar faixas estreitas do espectro para obter informações significativas sobre a fisiologia das folhas. Contudo, Ponzoni e Gonçalves (1999), que aplicaram testes estatísticos servindo-se de dados disponibilizados em 252 bandas espectrais entre 0,400 μm a 0,900 μm, através de medições radiométricas em folhas realizadas com o radiômetro LICOR 1800, concluíram que os resultados foram exatamente os mesmos se tivessem optado pelo uso de bandas espectrais mais largas, como as do TM/Landsat 5, por exemplo, ou seja, os resultados da aplicação dos testes estatísticos se repetiram ao longo de faixas espectrais amplas, não se justificando a utilização de resolução espectral fina em estudos de caracterização espectral de sintomas de estresse em vegetação realizados sobre folhas isoladas.

Yoder e Pettigrew-Crosby (1995) determinaram as concentrações de nitrogênio e

clorofila, e mediram a reflectância (0,400 – 2,500 μm) de folhas e do dossel dos quais estas faziam parte. As concentrações de nitrogênio e clorofila foram estimadas a partir de medidas de reflectância espectral realizadas em laboratório, sobre amostras de folhas frescas. As medidas de reflectância da folha individual foram feitas com um espectrofotômetro de extensão espectral de 0,400 – 2,500 μm. As medidas espectrais do dossel foram realizadas utilizando-se de um espectrorradiômetro atuando na mesma amplitude espectral. As análises de clorofila foram feitas simultaneamente com a varredura do espectrofotômetro e as concentrações de nitrogênio foram feitas pelo método quantitativo de "dinâmica de combustão", utilizando-se o equipamento Elemental Analyser 2400 CHN – Perkin Elmer. Foi observado pelos autores que as bandas do infravermelho próximo foram mais indicadas para determinar as quantidades de nitrogênio, e que as bandas da região do visível foram mais apropriadas para determinar as quantidades de clorofila.

Wessman et al. (1989) adquiriram, através de um espectrorradiômetro aerotransportado, dados de alta resolução espectral em 20 locais de uma floresta, com o objetivo de avaliar o potencial do sensoriamento remoto na estimativa dos componentes químicos das folhas das árvores que compunham o dossel. Os dados espectrais foram transformados através da aplicação de técnicas derivativas de espectroscopia de laboratório. Neste estudo os autores encontraram fortes correlações entre os dados obtidos através do espectrorradiometro aerotransportado com o conteúdo de lignina total das folhas do dossel em florestas decíduas e coníferas. Os autores concluíram que a técnica empregada pode ser usada para estimar o conteúdo de lignina das folhas do dossel e, a partir disso, estimar a distribuição das taxas anuais de mineralização do nitrogênio.

Ponzoni e Gonçalves (1999) fizeram um estudo com mudas de *Eucalyptus saligna* , as quais serviram para coleta de dados radiométricos para avaliar estresses ocasionados por deficiências nutricionais de nitrogênio, fósforo e potássio. As medidas radiométricas foram obtidas a partir das faces ventrais das folhas. Foram separadas as regiões espectrais do visível e infravermelho próximo, discretizadas em quatro faixas (bandas) espectrais. Os resultados obtidos permitiram concluir que na região do visível os valores

da reflectância espectral em folhas com deficiência de potássio foram significativamente inferiores àqueles apresentados por folhas sadias e com deficiência de nitrogênio e de fósforo. Na região do infravermelho próximo, não foram identificadas diferenças significativas entre os valores de reflectância espectral das folhas independentemente do tratamento, indicando ser esta região imprópria para a caracterização dos sintomas de deficiência dos três elementos considerados.

La Capra et al. (1996) utilizaram imagens espectrais do AVIRIS, das regiões do visível e infravermelho próximo para estimar os teores de elementos químicos em folhas de cultura de arroz, para futuras análises de concentrações de lignina e nitrogênio. Uma equação de regressão linear múltipla foi utilizada para desenvolver equações de calibração para lignina e nitrogênio, com base no espectro de reflectância dos dados do AVIRIS. Os resultados deste estudo levaram os autores a concluírem que as equações de calibração derivadas da regressão linear múltipla podem ser utilizadas para prever a concentração de nitrogênio (r^2=0,74) nas folhas da cultura do arroz e não apresentaram boas correlações para lignina (r^2= 0,44).

CAPÍTULO 3

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

O município de Cubatão está localizado no Estado de São Paulo, entre as latitudes 23^{o} 50’ e 23^{o} 55’ S, e as longitudes 46^{o} 00’ e 46^{o} 30’ W, formando uma área cuja extensão é de aproximadamente 148 Km^{2} (Cubatão, 1999). Situa-se próximo ao litoral sul paulista, entre a cidade de Santos e a encosta da Serra do Mar.

A região, devido à sua posição estratégica, localizando-se entre a cidade de São Paulo e o Porto Marítimo de Santos, possui um dos maiores pólos industriais do Brasil, onde é significativa a produção de aço, fertilizantes, cloro, derivados de petróleo e diversos produtos químicos. Pode-se dizer, portanto, que a estrutura de fontes poluidoras neste local é bastante heterogênea.

A metodologia utilizada neste trabalho para a escolha das áreas de estudo dentro do município de Cubatão foi a mesma utilizada por Pompéia (1997), onde o autor baseou-se em três critérios: 1) representar as principais tipologias de contaminação atmosférica na região; 2) apresentar condições de clima e solo similares; e 3) possuir cobertura vegetal em estágio sucessional de idades equivalentes. Dessa maneira, as áreas escolhidas, dentro do município, como sendo as mais adequadas para o estudo foram as seguintes:

- **Área 1 - Vale do Rio Pilões (VP)**: localiza-se próxima ao núcleo Pilões-Itatins do Parque Estadual da Serra do Mar, ao sudoeste do complexo industrial, onde acredita-se não haver interferência significativa de poluentes atmosféricos, e por tal motivo, foi considerada como área de controle. É uma área protegida, de fácil acesso e com vegetação secundária;
- **Área 2 - Caminho do Mar (CM)**: a vegetação da região é muito danificada ao longo da antiga estrada que liga São Paulo a Santos. Nesta estrada encontram-se as refinarias de petróleo, onde a predominância de poluentes é basicamente constituída por emissões de hidrocarbonetos, óxido de nitrogênio e enxofre;

- **Área 3 - Vale do Rio Mogi (VM)**: localiza-se próxima às indústrias de Vila Parisi. Este vale apresenta uma vegetação claramente danificada pela ação de poluentes. É uma área afetada predominantemente por emissões de fluoretos, amônia e óxidos de nitrogênio, além de fosfato e sulfatos particulados.

A localização dessas três áreas está ilustrada na Figura 3.1.

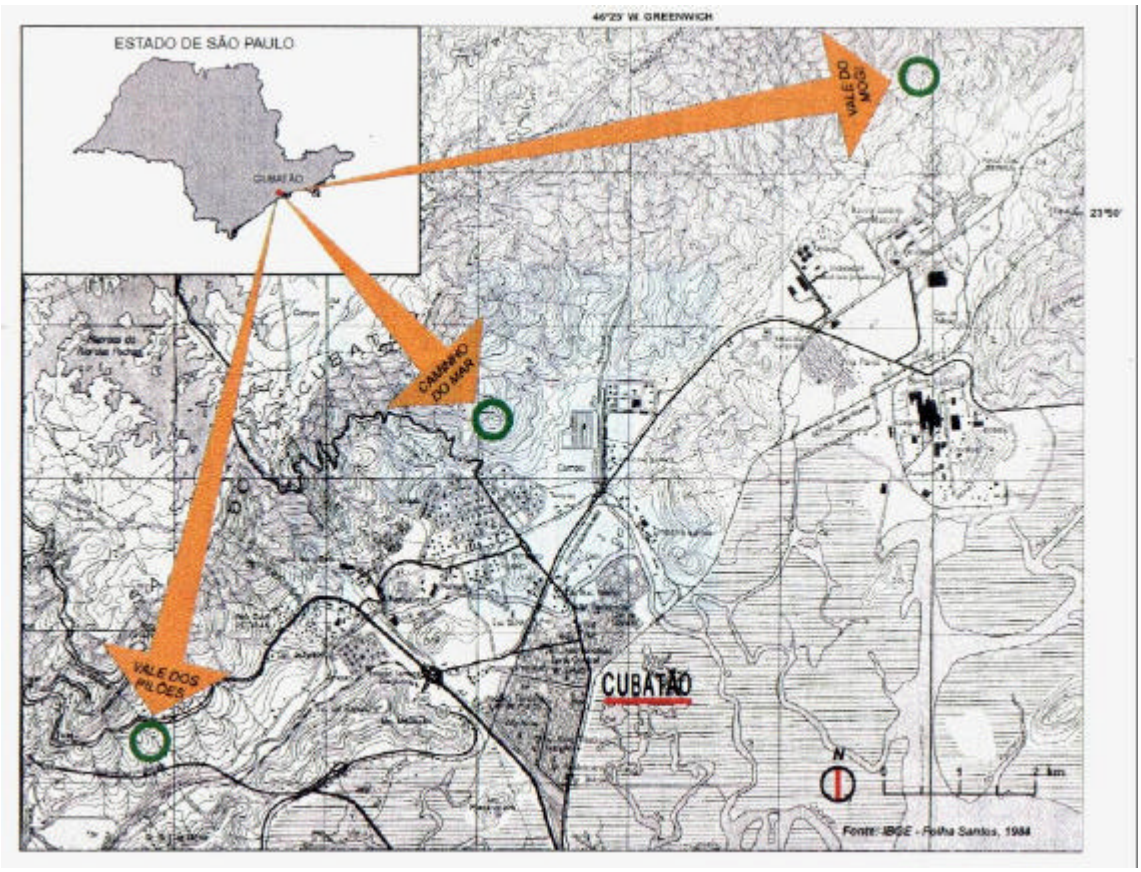


Fig. 3.1 – Localização das três áreas de estudo.
FONTE: Adaptado de Pradella et al. (1999, p. 5)

As áreas conhecidas como Vale do Rio Mogi (latitude 23^{o} 51’ S, longitude 46^{o} 23’ W, e altitude de 175-235m) e Caminho do Mar (latitude 23^{o} 52’ S, longitude 46^{o} 26’ W, e altitude de 65-108m) encontram-se nas encostas da Serra do Mar, com declividade em torno de 50 e 30%, respectivamente. A área do Vale do Rio Pilões (latitude 23^{o} 55’ S, longitude 46^{o} 29’ W, e altitude de 48-50m), é uma região aluvionar e de baixa

declividade (Cetesb, 1991).

As três áreas são cobertas por florestas secundárias com idade de aproximadamente 25 anos (Pompéia, 1997). Com base em levantamentos florísticos e fitossociológicos realizados nestas florestas por técnicos da CETESB, foi elaborada uma lista de espécies arbóreas consideradas tolerantes a poluentes atmosféricos, as quais foram agrupadas em três categorias, de acordo com seu grupo ecológico de sucessão (Pompéia et al., 1992):

- pioneiras;
- tolerantes à sombra ou oportunistas de clareira;
- reprodutoras à sombra.

Em 1993, no interior dessas florestas, foram formados bosques experimentais, em cada uma das áreas de estudo mencionadas anteriormente, onde foram cultivadas somente as espécies de plantas consideradas sensíveis a poluentes. Esses bosques apresentam áreas de 3,0 ha subdivididos em três partes, conforme ilustra a Figura 3.2.

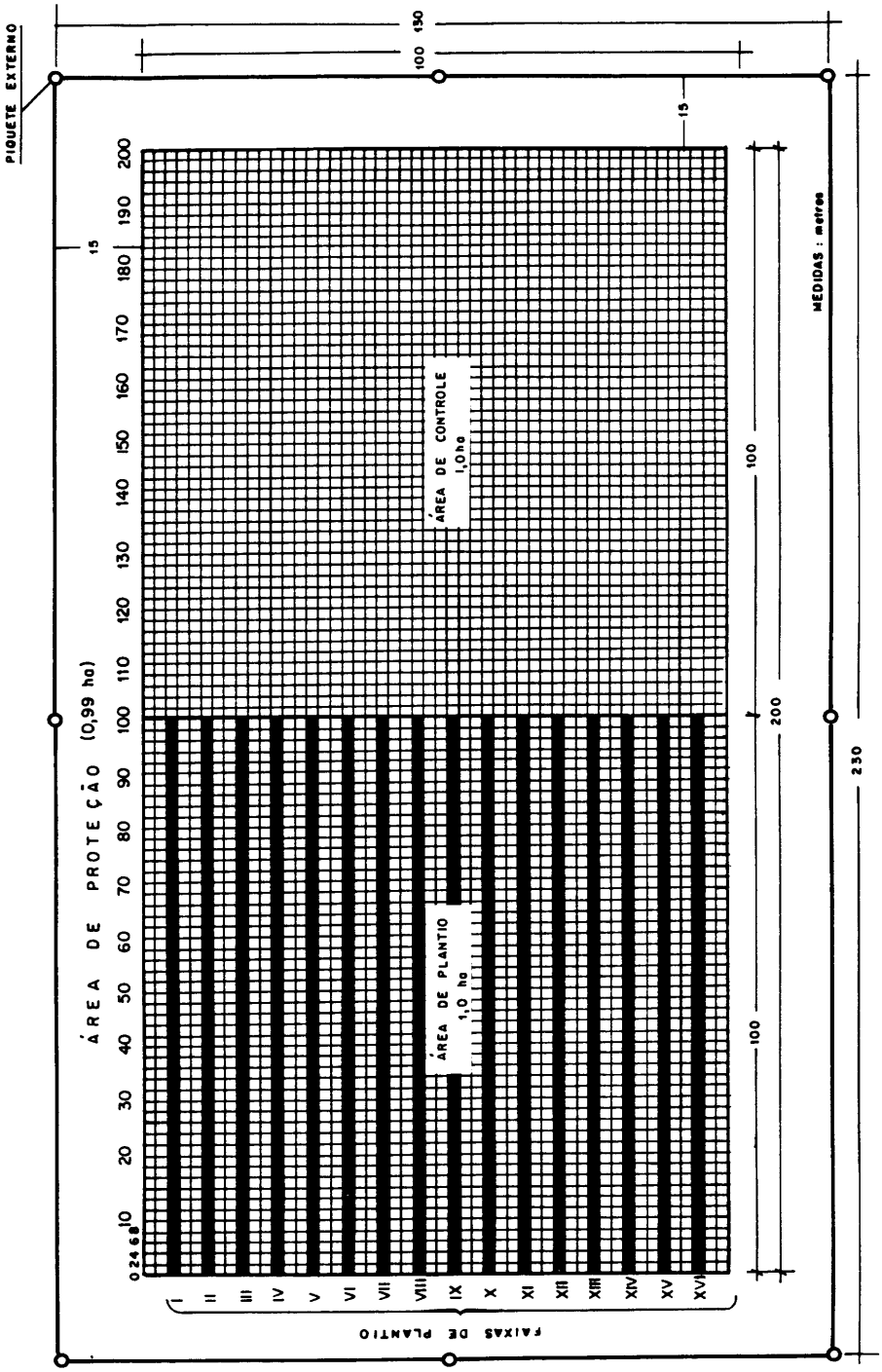


Fig. 3.2 – Localização dos bosques.

FONTE: Medonça e Paulics (1996, p. 7).

Pode-se observar através da Figura 3.2 que cada um dos bosques apresenta:

- **área de plantio** ⇒ com dimensões de 100 x 100 m, retícula dividida em 250 parcelas de 2 x 2 m. Para facilitar a localização das árvores e mudas existentes, as mesmas foram demarcadas com marcos de concreto com código alfanumérico de coordenadas;
- **área de controle** ⇒ possuem as mesmas características da área de plantio, servindo apenas como parâmetro para comparação com esta área;
- **área de proteção** ⇒ totaliza aproximadamente 1,0 ha, constituindo uma faixa externa com largura de 15 m ao longo das áreas de plantio e controle. O objetivo desta faixa é garantir uma proteção às áreas experimentais, evitando possíveis degradações.

Foram feitos ainda levantamentos plani-altimétricos, demarcando em campo as áreas de plantio, de controle e de proteção. As cartas topográficas utilizadas foram confeccionadas na escala de 1:100, onde foram demarcadas todas as mudas utilizadas no experimento.

3.1.1 Condições Meteorológicas da Região

3.1.1.1 Circulação Atmosférica

Para entender os mecanismos de dispersão e de transporte dos poluentes atmosféricos e a sua deposição na floresta de encosta, é importante que se conheça o padrão de circulação atmosférica da região serrana de Cubatão. A região apresenta ventos dominantes (SO, S e SE); as plumas deslocam-se ao encontro do paredão da Serra do Mar, subindo as encostas, causando assim danos à sua cobertura vegetal (Danelon, 1988).

Segundo Pompéia (1997), em condições climáticas normais, durante o final do período noturno e pela manhã, os ventos sopram em direção ao oceano, dispersando os poluentes. Durante o dia, quando ocorrem as mais altas temperaturas, é observada uma inversão das condições atmosféricas que ocasiona uma mudança na direção do vento: este passa a soprar em direção à serra, transportando umidade do oceano e poluentes do

pólo industrial diretamente para as escarpas.

3.1.1.2 Solos

Os solos apresentam características físico-químicas semelhantes nas três áreas de estudo: são solos ácidos, fortemente lixiviados e com baixos teores de macro e micro nutrientes. No entanto, foi encontrada uma diferença significativamente superior de fósforo na região do Vale do Rio Mogi em decorrência da emissão, pelas indústrias de fertilizantes, de partículas contendo fosfato (Martins et al., 1996). Nesta mesma região, segundo Pompéia (1997), existe um acúmulo de enxofre, o que possivelmente se deve à deposição de partículas contendo sulfato.

3.1.1.3 Temperatura

A temperatura da região não apresenta grandes variações ao longo do ano. Os períodos mais quentes, que correspondem aos meses de dezembro a março, apresentam temperatura média mensal de 29 ^{o}C. Os meses de junho a agosto, que são considerados os períodos mais frios do ano, apresentam temperaturas médias mínimas de 16 ^{o}C e 15^{o}C, respectivamente (Silva Filho, 1988).

3.1.1.4 Precipitação

Segundo Silva Filho (1988), as zonas mais chuvosas estão localizadas na borda da escarpa da Serra do Mar, ocorrendo maiores índices na região da cabeceira do Rio das Pedras e Caminho do Mar, que chegam a ter uma pluviometria média anual de 4.000 mm. A zona contígua à cabeceira do Rio Itapanhaú chega a ter o maior índice pluviométrico do Brasil, tendo uma média anual de 4.600 mm.

O alto índice pluviométrico deve-se principalmente ao efeito das feições topográficas do relevo sobre a circulação atmosférica da região. Por ser uma área cercada de montanhas e muito próxima do oceano, os ventos carregados de umidade provenientes do oceano são barrados pelas montanhas costeiras e se elevam. Devido a esta elevação, ocorre um resfriamento do ar e o vapor de água em excesso se precipita sob a forma de chuva ou nevoeiro (Silva Filho, 1988).

3.1.1.5 Aspectos da Vegetação Primitiva

A floresta latifoliada úmida de encosta ou mata tropical atlântica recobre parcialmente as escarpas da Serra do Mar. É um tipo de floresta pluvial tropical de folhas perenes, hidrófila comum em toda fachada atlântica costeira. Caracteriza-se por ter uma vegetação densa, com predomínio de espécies lenhosas de 20 a 30 metros de altura, rica em lianas e epífitas (CETESB, 1991).

As espécies arbóreas existentes na floresta são classificadas basicamente em cinco tipos: 1) sinúsia arbórea apresentando dois ou mais estratos, sendo que os maiores indivíduos podem atingir até 30 metros de altura e forma um dossel contínuo. Ex: palmito-doce (*Euterpe edulis*), cuipeúna (*Tibouchina pulchra*) ; 2) sinúsia arbustiva pouco densa, em virtude da baixa luminosidade. Ex: Palmeiras guaricanga (*Geonoma gamiova*), samambaia-ussu (*Cyathea schanschin*); 3) lianas terrestres ou epifíticas, que são abundantes em todos os níveis, desde o solo até os troncos mais elevados, estendendo suas folhas acima das copas das árvores que as suportam. Ex: cipós diversos, filodendros (*Philodendron* spp); 4) a sinúsia herbácea adapta-se bem a ambientes com baixa luminosidade e à umidade normalmente elevada. Ex: Aráceas (*Anthurium* spp), Pinheirinho (*Lycopodium cernuum*); 5) sinúsia formada por líquens, musgos, hepáticas e algas ocorre sobre os barrancos úmidos, concavidades de rochas e troncos das árvores. Ex: *Lobania*, *Graphis* (CETESB, 1991).

3.2 Identificação das Espécies de Plantas

Uma vez que as parcelas haviam sido determinadas para o atendimento dos objetivos dos trabalhos conduzidos pela CETESB e que havia a possibilidade concreta de sua utilização para atender interesses científicos diversos, decidiu-se pelo aproveitamento da infra-estrutura disponível e do apoio dos profissionais desta empresa na realização deste trabalho. Restava, então, definir quais espécies considerar.

A seleção das espécies plantadas nos bosques baseou-se em três critérios, segundo Mendonça e Paulics (1995):

- ocorrência natural no trecho da Mata Atlântica de encosta existente no Estado de São Paulo, com ênfase para a região de Cubatão;

- pertencer aos estágios mais avançados da sucessão secundária;
- disponibilidade de mudas em viveiros.

Foram selecionadas dez espécies para a realização deste trabalho, seguindo a classificação de Azevedo et al. (1995). Cinco espécies foram indicadas como sensíveis a poluentes atmosféricos, cujas folhas foram coletadas nos bosques experimentais e cujas mudas apresentavam idade de aproximadamente seis anos; e cinco outras espécies consideradas tolerantes, cujas folhas foram retiradas nas proximidades das parcelas. A identificação destas últimas espécies foi feita baseando-se em levantamentos fitosociológicos realizados pela CETESB na região. A Tabela 3.1 apresenta a relação das espécies sensíveis e tolerantes consideradas neste trabalho.

TABELA 3.1 - RELAÇÃO DAS ESPÉCIES QUE FORAM CONSIDERADAS

	Espécie	Família	Hábito	Siglas
SENSÍVEIS	*Zigia cauliflora*	MIMOSACEAE	Árvore mediana	ZC
	Psidium sp	MYRTACEAE	Arbusto ou arvoreta	PS
	Cordia sellowiana	BORAGINACEAE	Árvore	CO
	Campomanesia phae	MYRTACEAE	Arbusto ou arvoreta	CP
	Hymenaea courbaril	CAESALPINIACEAE	Árvore	HC
TOLERANTES	*Costus spirallis*	ZINGIBERACEAE	Erva terrestre	CT
	Tibouchina pulchra	MELASTOMATACEAE	Árvore	TB
	Philodendron imbe	ARACEAE	Liana/epífita	PH
	Cecropia glazioui	CECROPIACEAE	Árvore	CC
	Miconia thaezans	MELASTOMATACEAE	Árvore	MC

Para facilitar a redação deste trabalho, os nomes das espécies serão apresentados em

siglas conforme mostrado na Tabela 3.1.

Outro critério relevante na escolha das espécies foi a disponibilidade de folhas, uma vez que se previa a extração de uma quantidade que garantisse a confiabilidade dos testes estatísticos que foram aplicados, tanto no que se refere às análises químicas quanto à avaliação dos valores dos Fatores de Reflectância Direcional Hemisférica (FRDH).

3.3 Coleta de Dados Radiométricos

Na Figura 3.3, encontra-se o fluxograma geral das principais atividades que foram desenvolvidas durante o decorrer do trabalho, a partir da coleta dos dados radiométricos.

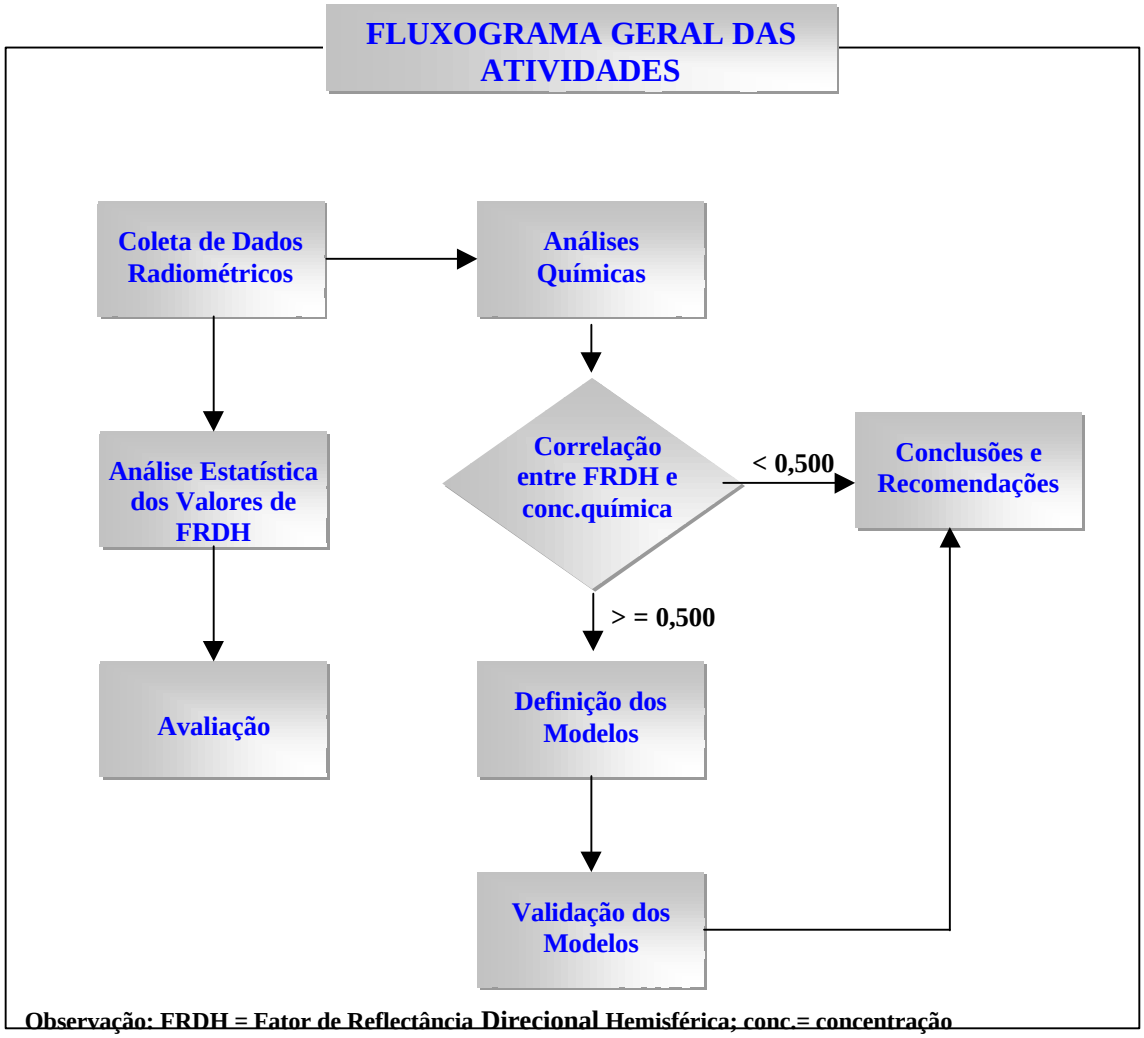


Fig. 3.3 - Fluxograma geral das atividades desenvolvidas

Em cada uma das três áreas, foi coletado o maior número possível de folhas de cada uma das espécies de plantas, para a determinação dos valores de FRDH. As folhas foram coletadas de várias partes das plantas, em vários estágios de desenvolvimento, armazenadas em sacos plásticos mantidos abertos, colocados em geladeira de isopor à temperatura ambiente. Da retirada da folha da planta até a realização das medidas radiométricas, as folhas ficaram nestas condições por um período de 3 a 4 horas, segundo os procedimentos adotados por Daughtry e Biehl (1984) e Sousa et al. (1996).

Em seguida, as amostras foram pesadas em uma balança analítica, marca Sartorius modelo 2406, da seguinte forma: foi retirada, de todas as folhas, a nervura central, justamente por conter pouca clorofila e por tal motivo pudesse interferir na resposta espectral. Foram confeccionados envelopes de papel alumínio contendo 3g de folhas

frescas, quantidade esta necessária para realizar as análises químicas. O número de envelopes para cada espécie foi dependente da quantidade de folhas coletadas em campo.

As medidas radiométricas (de 0,400 a 0,900 μm) foram feitas sobre a face ventral de cada uma das folhas individualmente, mediante a utilização de um radiômetro SPECTRON SE-590, no qual foi acoplado uma esfera integradora LI-COR 1800 e um computador para o armazenamento e processamento dos dados. Somente os dados de 0,400 a 0,900 μm foram utilizados por problemas no equipamento fora desta faixa. No início e no final de cada bateria de medidas radiométricas, foram realizadas medidas de uma placa de referência de sulfato de bário ($BaSO_4$) existente na superfície da esfera, para posterior determinação dos FRDHs.

Os FRDHs foram determinados através da seguinte equação:

$$\textbf{FRDH} = \frac{\text{Radiância espectral hemisférica da folha}_i}{\text{Radiância espectral hemisférica da placa}_i} \quad i = 1, 2, 3.....252$$

onde *i* representa o número de bandas espectrais contidas dentro do intervalo compreendido entre 0,400 e 0,900 μm, sendo a resolução espectral deste equipamento entre os centros das bandas de 0,003 μm.

Foram obtidos valores de FRDH para cada uma das folhas de cada espécie individualmente.

Após as medidas radiométricas, as folhas foram devidamente acondicionadas nos envelopes de papel alumínio, congeladas em nitrogênio líquido e armazenadas em geladeira de isopor com gelo seco, para que fossem posteriormente transportadas ao Laboratório de Análises de Alimentos, do Departamento de Alimentos e Nutrição Experimental da Faculdade de Ciências Farmacêuticas da Universidade de São Paulo, para determinação das concentrações químicas de clorofila, carbono, hidrogênio e nitrogênio. As amostras ficaram nestas condições, até que fossem submetidas às análises químicas, por um período de aproximadamente dois a três dias.

3.4 Análises Químicas

As folhas congeladas foram transportadas para o laboratório mencionado, onde foram liofilizadas, moídas em moinho de facas de laboratório (Polymix A -10, Kinematica) e passadas em tamis de 0,25 mm de abertura.

3.4.1 Determinação do Teor de Clorofila e de Feofitina

A determinação do teor de clorofila foi feita pelo método espectrofotométrico a partir do uso das absortividades específicas em acetona 80% e mudanças nas absortividades em comprimentos de onda adequados. Este método foi descrito por Vernon (1960).

Em uma balança analítica (A&D Company modelo HA–202 M) foram pesados 0,25g de amostra de folhas liofilizadas, sendo esta amostra introduzida em um Erleymeier de 50 ml protegido da luz com papel alumínio, para evitar a fotodegradação da clorofila. Foram adicionados 20 ml de acetona 80% resfriada e a suspensão foi homogeneizada em homogeneizador OMNI TH, por 5 minutos e posteriormente centrifugada durante 20 minutos a 10 ºC a 7.649 x g (Sorvall Instruments, modelo RC 5C), onde g é a aceleração da gravidade.

Em um balão de 10 ml foi diluído 1 ml do sobrenadante da amostra centrifugada, completando o restante com acetona 80%. O balão também foi protegido com papel alumínio até que fosse feita a leitura de absorbância em espectofotômetro Beckman DU 70, na faixa de 0,400 a 0,800 μm , nos seguintes comprimentos de onda: 0,661 μm e 0,648 μm para a leitura de clorofila; 0,653 μm e 0,663 μm para a feofitina. Após a leitura das amostras, foram calculadas as concentrações dos teores de clorofila total e de feofitina a partir das equações citadas abaixo:

$$\text{Clorofila}_{\text{total}} = 6{,}10\ (\text{A } 0{,}661) + 17{,}25\ (\text{A } 0{,}648)$$

$$\text{Feofitina}_{\text{total}} = 77{,}58\ (\text{A } 0{,}653) - 0{,}33\ (\text{A } 0{,}663)$$

onde A 0,661; A 0,648; A 0,653 e A 0,663 são valores de absorbância obtidos em cada um desses comprimentos de onda, para cada uma das amostras analisadas.

A determinação da concentração de feofitina foi realizada somente para verificar se estava havendo degradação da clorofila.

3.4.2 Análise de Composição Elementar de Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio (CHN)

A técnica usada para a determinação do CHN foi baseada no método quantitativo de "dinâmica de combustão", utilizando-se o equipamento Elemental Analyzer 2400 CHN – Perkin Elmer.

No interior do aparelho ocorre uma combustão a 925^{o}C em presença de oxigênio puro. Após a combustão, todo o carbono passa para a forma de CO_2, o hidrogênio para a forma de H_2O e o nitrogênio forma vários óxidos (NO_2, N_2O_2 etc.). Em seguida, todos esses gases passam por um tubo de redução a uma temperatura de 640 ^{o}C, contendo cobre metálico, reduzindo esses óxidos de nitrogênio em N_2. Dessa forma, o produto da combustão final será a porcentagem de CO_2, H_2O e N_2 correspondente à amostra analisada.

3.4.3 Determinação de Umidade

Para a determinação da umidade, primeiramente colocaram-se cápsulas de porcelana (cadinhos), devidamente identificadas em uma estufa (marca Fanem Ltda, modelo 307/4) a uma temperatura de 105°C por uma hora. Retiraram-se os cadinhos da estufa e os mesmos foram resfriados em um dissecador contendo sílica gel (SiO_2) até atingirem a temperatura ambiente (mais ou menos duas horas).

Em uma balança analítica (A&D Company, modelo HA-202M) foi obtida primeiramente a tara de cada um dos cadinhos e posteriormente foi adquirido o peso das amostras. Os cadinhos contendo as amostras foram colocados em uma estufa ventilada (marca Fabbe-Primar) a uma temperatura de 130°C por mais uma hora. Novamente foi adotado o procedimento de se retirar as amostras da estufa e colocá-las em dissecador até atingirem a temperatura ambiente. Finalmente, as amostras foram retiradas do dissecador e os cadinhos novamente pesados para obtenção do peso seco.

O método utilizado para a obtenção da porcentagem de umidade foi o seguinte:

1) primeiramente, calculou-se a quantidade de água (H_2O) contida nas amostras através da equação:

H_2O = tara do cadinho + amostra - peso do cadinho contendo amostra seca;

2) após obtido o resultado para a quantidade de água, foi finalmente calculada a porcentagem de umidade, obtendo-se:

$$\%\text{Umidade} = H_2O * 100 / \text{peso da amostra fresca}$$

3.5 Organização dos Dados Espectrais

Os arquivos contendo os valores de radiância obtidos de cada uma das folhas de cada espécie, correspondentes a cada área de estudo, foram convertidos para FRDH, utilizando-se o programa ESPECTRO, desenvolvido no Laboratório de Radiometria (LARAD) do INPE. Assim tornaram-se disponíveis vetores contendo 252 valores de FRDH para cada uma das folhas medidas radiometricamente. Estes vetores foram transpostos para uma planilha eletrônica (Excel), que permitiu a elaboração de cálculos que incluíram a determinação de vetores médios, calculados a partir dos vetores de FRDH de cada folha. Esses vetores médios foram calculados para cada conjunto de folhas que compuseram um pacote de 3g, passando portanto a representá-lo espectralmente. Posteriormente foram determinadas médias de valores de FRDH em bandas equivalentes ao sensor Thematic Mapper (TM), conforme ilustra a Figura 3.4. Estas foram: banda TM 1, correspondente aos comprimentos de onda de 0,450 a 0,520 μm; banda TM 2, de 0,520 a 0,600 μm; banda TM 3, de 0,630 a 0,690 μm; e banda TM 4, de 0,760 a 0,900 μm.

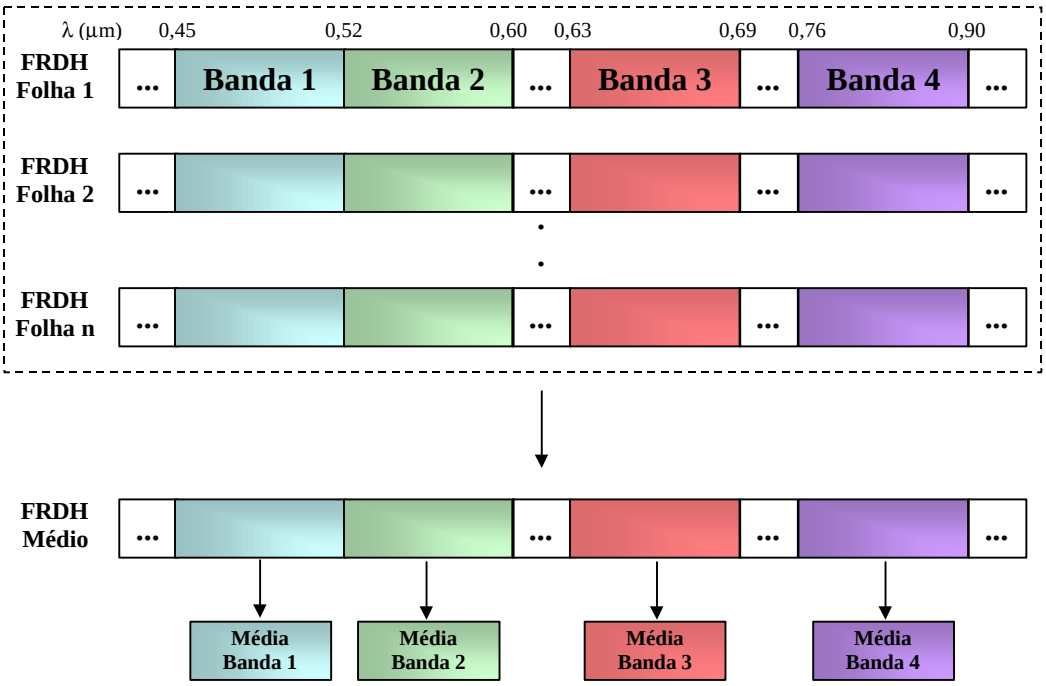


Fig. 3.4 - Obtenção dos valores de FRDH médio de cada uma das bandas espectrais do TM/Landsat.

A adoção de bandas amplas foi baseada nos resultados encontrados por Ponzoni e Gonçalvez (1999), que concluiram ser indiferente utilizar a máxima resolução espectral do radiômetro SPECTRON SE 590 ou utilizar bandas mais amplas nas análises estatísticas. De qualquer forma, optou-se por realizar os testes estatísticos utilizando 140 bandas espectrais do equipamento, correspondente aos comprimentos de onda de 0,400 a 0,800 μm, para uma única espécie com o objetivo de comprovar ou não as conclusões destes autores. Os procedimentos adotados estão descritos no sub-item 3.10.

3.6 Organização dos Vetores de FRDH Médios Visando Associá-los aos Respectivos Valores de Concentração Química

Novas planilhas eletrônicas foram compostas de forma a permitir que os valores de FRDHs médios fossem comparados com os respectivos resultados das concentrações químicas para cada um dos elementos analisados.

Para cada espécie, foram constituídos dois grupos compostos por diferentes números de envelopes: um grupo que foi correlacionado com a concentração de clorofila e outro

grupo que foi correlacionado com as concentrações de carbono, hidrogênio e nitrogênio. Como o número de envelopes foi pequeno para a maioria das espécies em função do número de folhas coletadas, o critério adotado para definir a quantidade de pacotes para cada uma das análises, baseou-se em encaminhar aproximadamente 50% das amostras para as análises de clorofila e os outros 50% para CHN.

Vale ressaltar que cada vetor de FRDH médio foi originado a partir de medidas radiométricas feitas em cada uma das folhas individualmente, e que essas folhas foram devidamente acondicionadas em envelopes de papel alumínio, como já foi descrito. No entanto, para a determinação da concentração de cada um dos elementos químicos, não houve uma análise individual de cada uma das folhas, como foi feito para as medidas radiométricas, e sim todo o conteúdo de cada envelope foi submetido ao processo de análises químicas, para cada uma das amostras de cada espécie e área de estudo, sendo portanto que para cada valor de FRDH, haviam valores respectivos de concentração química de clorofila ou de CHN. A associação foi feita entre os valores de FRDH referentes a cada banda espectral e às concentrações químicas dos elementos específicos para os quais o pacote de folhas foi encaminhado. A Tabela 3.2 ilustra um esquema de como foram dispostos os dados na planilha eletrônica visando a associação mencionada.

TABELA 3.2 - DISPOSIÇÃO DOS DADOS EM PLANILHA ELETRÔNICA VISANDO ASSOCIAR OS VALORES DE FRDH NAS BANDAS 1, 2, 3 E 4, COM AS CONCENTRAÇÕES QUÍMICAS

Espécie x - Área y								
	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Clorofila	C	H	N
Envelope 1					x			
					x			
.					x			
.						x	x	x
.						x	x	x
Envelope n						x	x	x

Foram compostas planilhas como essa apresentada na Tabela 3.2 para cada espécie. Posteriormente seguiu-se à aplicação de testes estatísticos.

3.7 Análise Estatística dos Valores de FRDH e das Concentrações Químicas

A Figura 3.5 ilustra o fluxograma das atividades desenvolvidas na análise estatística dos valores de FRDH e dos valores obtidos para as concentrações químicas.

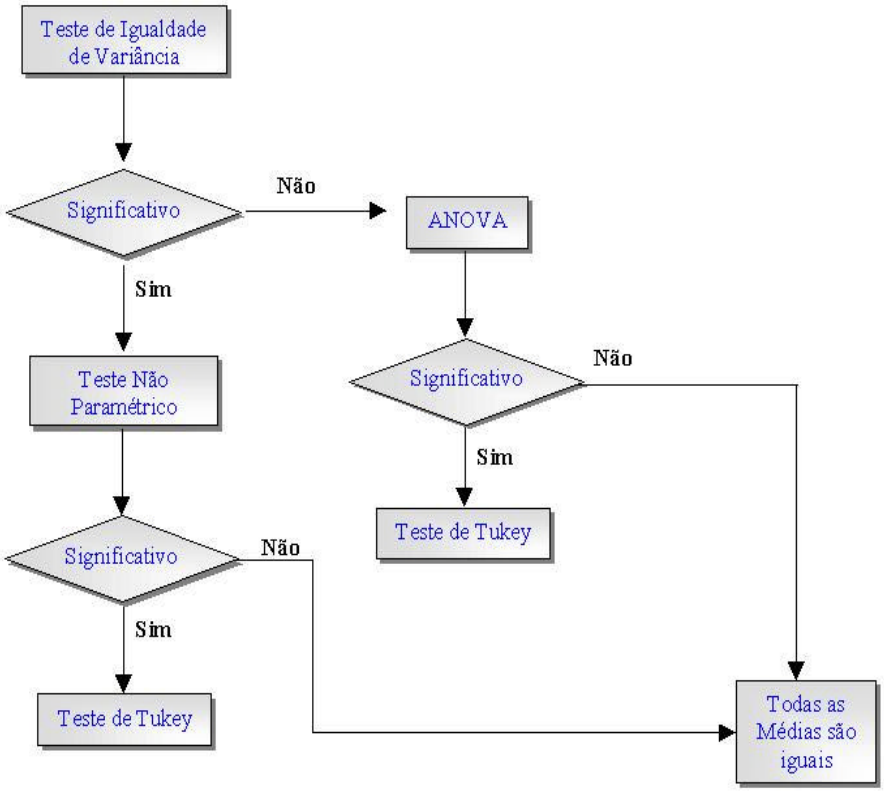


Fig. 3.5 - Fluxograma dos testes estatísticos

A partir dos valores de FRDH médios de cada uma das bandas espectrais, para cada espécie e área de estudo, foi aplicado, conforme pode-se observar na Figura 3.5, um teste de igualdade de variância conhecido como teste de Bartlett (Mirshawaka, 1983), utilizando um nível de significância de 0,05. Quando o resultado não foi significativo, ou seja, quando as variâncias foram iguais, foi aplicado, também utilizando um nível de significância de 0,05, um teste de análise de variância – ANOVA (Gomes, 1978; Zar 1974). O objetivo da aplicação da ANOVA foi identificar a ocorrência de diferenças significativas entre os valores de FRDHs provenientes das diferentes áreas de estudo, mantendo fixo a espécie. Quando o valor de F da ANOVA foi significativo, foi aplicado

o teste de Tukey (Gomes, 1978), utilizando novamente nível de significância de 0,05, com o objetivo de identificar quais valores médios de FRDH (provenientes de cada área) diferiram significativamente entre si.

Quando os dados não apresentaram igualdade de variância, foi aplicado um teste não-paramétrico conhecido como teste de Kruskal-Wallis (Campos, 1983). Neste teste, um resultado não significativo implicou na igualdade de médias. No caso de diferenças significativas entre médias, foi aplicado também o teste de Tukey, sendo que em ambos os testes (de Kruskal-Wallis e de Tukey) foi utilizado nível de significância de 0,05.

O mesmo procedimento de análise estatística empregado para os valores de FRDH, foi aplicado também para os valores das concentrações químicas (clorofila, carbono, hidrogênio e nitrogênio). Neste caso foram procuradas diferenças significativas entre as concentrações de um mesmo elemento entre folhas provenientes de áreas diferentes.

3.8 Estudo de Correlação Entre os Valores de FRDH e Concentração Química

Uma vez conhecida a ocorrência ou não de diferenças significativas entre os valores de FRDH oriundos das três diferentes áreas (para cada espécie) e entre as concentrações químicas de cada um dos elementos mencionados (também para cada espécie), restava conhecer o grau de correlação entre os valores de FRDH e estas mesmas concentrações químicas. As correlações foram determinadas utilizando-se do aplicativo Excel.

Os Coeficientes de Correlação determinados foram avaliados e quando da ocorrência de valores maiores do que 50% foram determinados os modelos de regressão linear simples.

3.9 Definição dos Modelos de Regressão Linear Simples

Através do estudo de correlação foram selecionadas para definir os modelos, somente aquelas correlações que apresentaram valores de Coeficiente de Correlação superiores a 50%. É importante ressaltar que a análise de regressão linear é uma ferramenta estatística que utiliza a relação entre duas ou mais variáveis, desde que uma variável possa ser explicada pela outra (Neter, 1974). Desta maneira, optou-se por somente serem modelados os parâmetros melhor correlacionados, sendo desprezados os demais.

Definidos os parâmetros melhor correlacionados, a próxima etapa foi organizar os arquivos para posterior modelagem. Foram utilizadas então, as mesmas amostras que já haviam sido coletadas na etapa anterior. No estabelecimento dos modelos 50% das amostras foram designadas para serem posteriormente utilizadas em na validação dos mesmos que foram então definidos.

Utilizando-se também do aplicativo Excel, os arquivos foram organizados para cada espécie de forma que os valores de FRDH, juntamente com suas respectivas concentrações químicas de clorofila e CHN para cada área de estudo, ficassem dispostos em uma única planilha. Isto foi feito da mesma forma como foram organizados os dados para a etapa de correlação dos dados de FRDH com suas respectivas concentrações químicas, retirando-se apenas as amostras para a validação dos modelos, que foram organizadas em outra planilha. A seleção destas amostras foi aleatória, através de sorteio.

Em seguida, os modelos foram determinados da seguinte forma: foram consideradas como variáveis independentes os valores de FRDH, sendo estes dispostos no eixo das abscissas; e as variáveis dependentes, as concentrações químicas, ficando estas então dispostas no eixo das ordenadas, sendo obtidas funções do tipo:

$$y = ax+b$$

onde y = concentração química, e x = FRDH.

Adotando essa configuração, procurou-se estimar as concentrações químicas através dos valores de FRDH. Essa disposição de variáveis (dependente = concentrações químicas e independente = valores de FRDH) é aparentemente inconsistente, uma vez que espera-se que as concentrações químicas “expliquem” os valores de FRDH, concordando com os princípios da aplicação das técnicas de sensoriamento remoto, nas quais a reflectância espectral de um objeto é dependente das características físico-químicas dos objetos em estudo. Contudo, a inversão da relação entre estas variáveis justifica-se pela possível aplicação dos modelos estabelecidos, a qual consideraria os valores de FRDH como possíveis estimadores das concentrações químicas de folhas, a partir das quais, poder-se-ia avaliar a ocorrência de vegetação estressada à presença de poluentes

atmosféricos.

3.9.1 Validação dos Modelos

Esta etapa visou avaliar o desempenho dos modelos determinados para estimar as concentrações dos elementos químicos a partir dos valores de FRDH. Para alcançar tais objetivos, foi necessário utilizar novos valores de FRDH, como já foi mencionado, que foram introduzidos nos modelos para estimar as respectivas concentrações químicas, as quais foram comparadas com os respectivos valores das mesmas concentrações químicas que já haviam sido determinados em laboratório. Essa comparação entre os dados estimados pelos modelos e aqueles determinados pelas análises químicas foi feita mediante a aplicação de ANOVAs ou de testes não-paramétricos, segundo os mesmos critérios descritos anteriormente. No caso da validação dos modelos optou-se por aplicar o teste não-paramétrico da prova de Wilcoxon (Siegel, 1975), devido ao fato do número de amostras ser muito pequeno.

A não ocorrência de diferença significativa, entre os valores estimados pelos modelos e os valores reais de concentração química, implicou na aceitação dos modelos.

3.10 Análises Estatísticas Sobre os Valores de FRDH Valendo-se de Máxima Resolução Espectral

Foram aplicados também testes estatísticos (ANOVAs e teste de Tukey a 0,05 de significância) considerando dados de uma única espécie, mas utilizando a resolução espectral fina. Os testes foram então aplicados para cada valor de FRDH médio. Seguiu-se o mesmo procedimento de trabalho adotado na aplicação dos testes estatísticos efetuados sobre os valores médios de FRDH determinados para cada uma das quatro bandas espectrais descritas anteriormente.

A escolha da espécie fundamentou-se nos resultados alcançados na aplicação dos testes estatísticos sobre os FRDHs das bandas, procurando aquelas cujos valores de FRDH apresentaram diferença significativa entre as três áreas.

A amplitude espectral considerada foi compreendida entre 0,400 a 0,800 μm. Não foram inseridas, na aplicação dos testes estatísticos, as faixas espectrais iniciais e as finais,

devido à interferência de ruídos.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando a existência de três abordagens possíveis na análise dos dados, ou seja, a abordagem meramente espectral, na qual se pretende avaliar a possibilidade de caracterizar espectralmente o efeito dos poluentes atmosféricos sobre a vegetação; a abordagem química, na qual pretende-se avaliar a possibilidade de caracterizar quimicamente esse mesmo efeito sobre as espécies consideradas e finalmente a abordagem caracterizada pela correlação entre as duas anteriores, a apresentação dos resultados seguirá essa mesma seqüência de avaliação.

4.1 Coleta de Folhas em Campo e Definição do Número de Amostras por Análise Química

A Figura 4.1 apresenta um diagrama que descreve a quantidade de amostras (envelopes) definida para cada espécie e seus respectivos destinos.

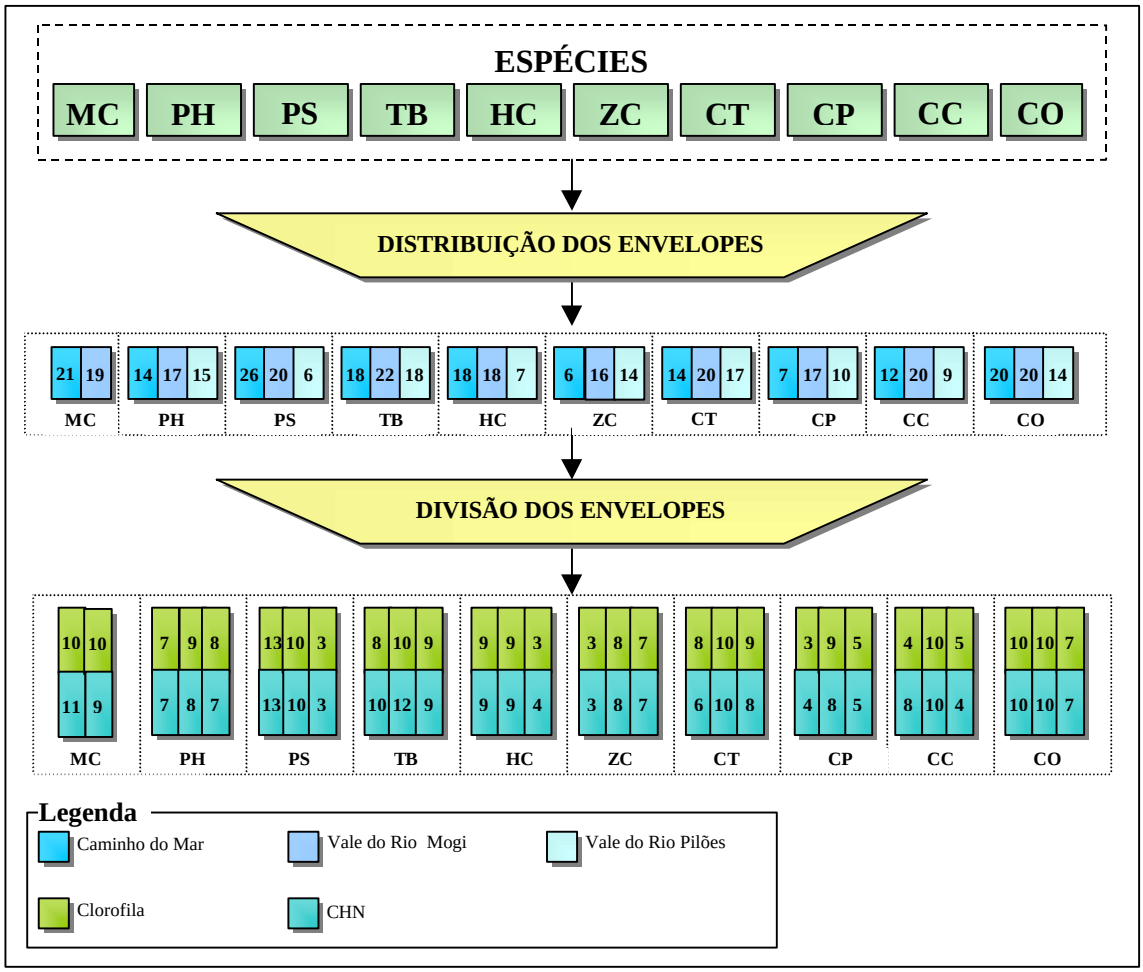


Fig 4.1 – Distribuição das amostras coletadas em campo.

A análise do diagrama apresentado na Figura 4.1, permite observar que em algumas espécies, houve uma certa desigualdade no número de amostras constituídas nas diferentes áreas de estudo. Isso pode ser explicado pela diferença na disponibilidade do número de folhas encontradas nas diferentes áreas. Como conseqüência, houve também um ligeiro desequilíbrio, para estes casos, na definição do número de amostras que foram destinados às análises químicas.

4.2 Dados Radiométricos

Na Figura 4.2 são apresentadas as curvas de FRDH médios, obtidas para cada espécie, de cada uma das áreas de estudo. Estas curvas representam os valores médios de FRDH, determinados a partir de todos os vetores de FRDH de cada uma das amostras

(envelopes), independentemente dos destinos (análises químicas) que lhes foram conferidos.

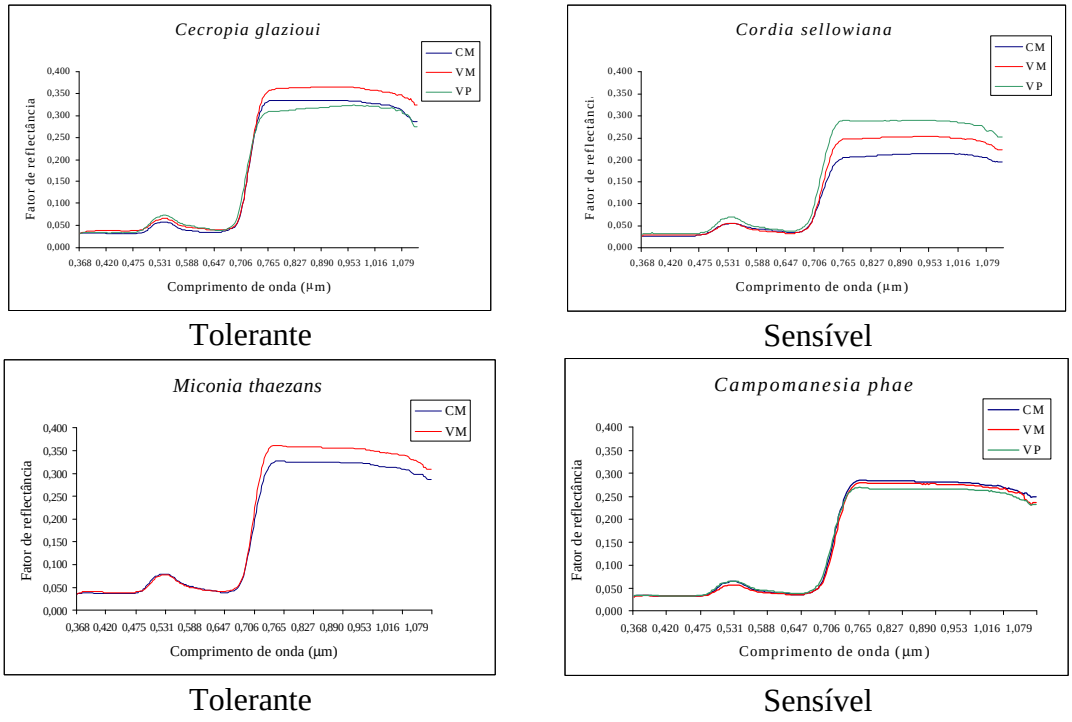


Fig. 4.2 – Curvas de FRDHs médios, obtidos a partir das amostras coletadas em campo, onde CM refere-se a área do Caminho do Mar, VM ao Vale do Rio Mogi e VP ao Vale do Rio Pilões.
(continua)

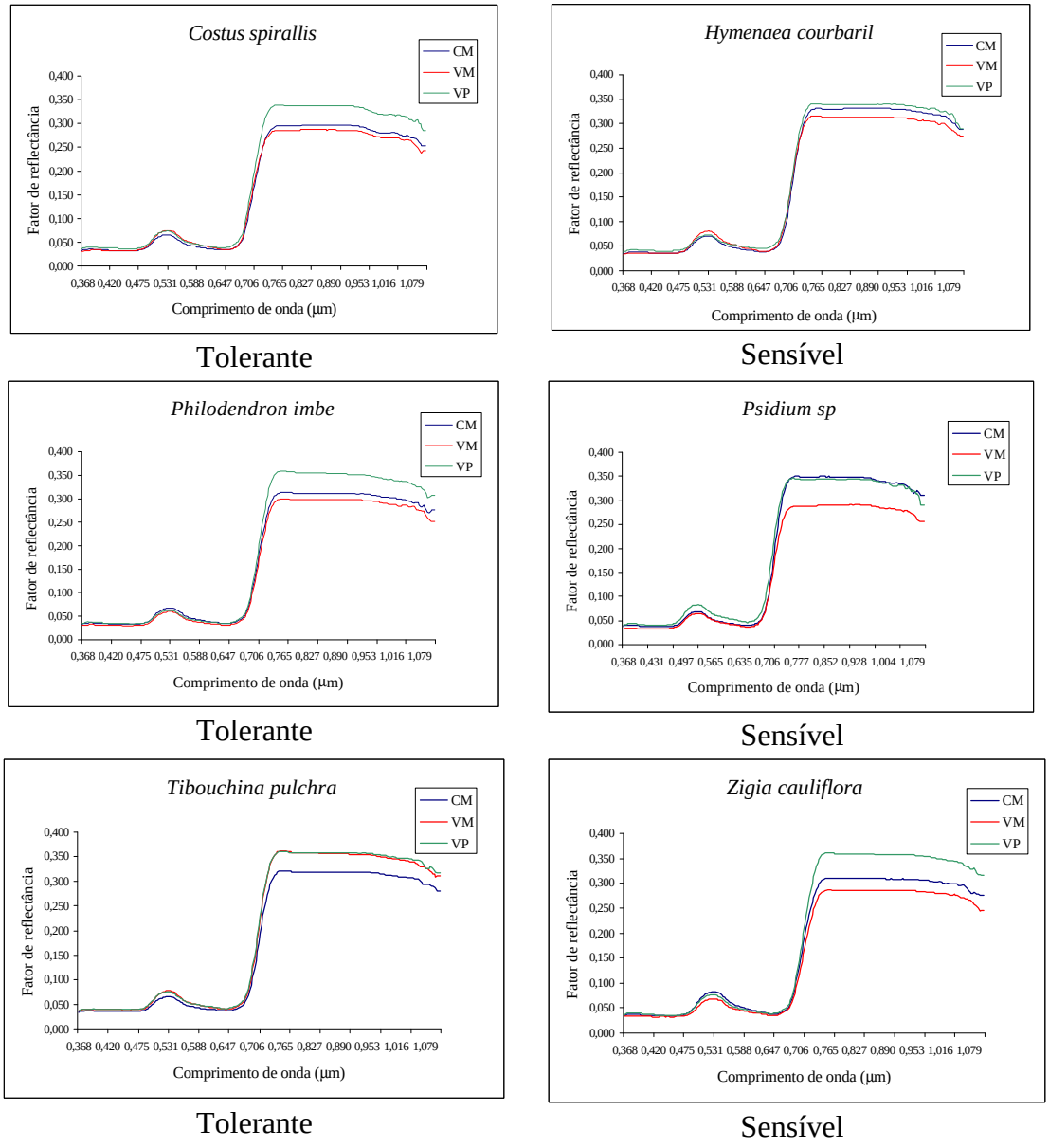


Fig. 4.2 – Conclusão.

Para se fazer uma análise visual das curvas de FRDH contidas na Figura 4.2, é necessário abordar a discussão tomando como base duas regiões distintas do espectro eletromagnético, ou seja, o visível e o infravermelho próximo.

Na região do visível (0,400 a 0,700 µm) nota-se que não houveram variações expressivas nas curvas de FRDH para nenhuma espécie estudada (tolerantes e sensíveis), em função da área de estudo. Contudo, destaca-se uma freqüencia

ligeiramente maior de ocorrência de valores superiores de FRDH para as espécies localizadas no Vale do Rio Pilões (área controle) em comparação com aqueles encontrados nas outras duas áreas. Essas diferenças no FRDH, observadas para as espécies do Vale do Rio Pilões, foram comprovadas estatisticamente pelo teste de Tukey (α=0,05), conforme será discutido mais adiante. Para facilitar a visualização da dinâmica dos valores de FRDH nesta região espectral, foram elaborados gráficos específicos, os quais encontram-se na Figura 4.3.

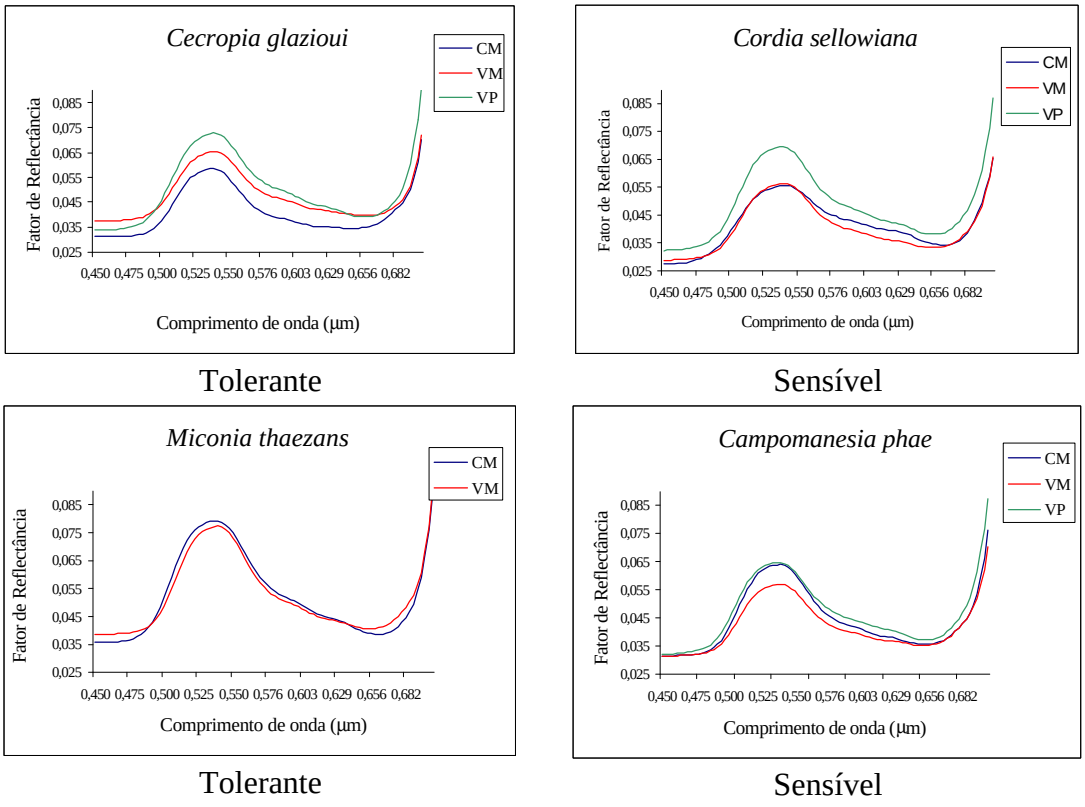
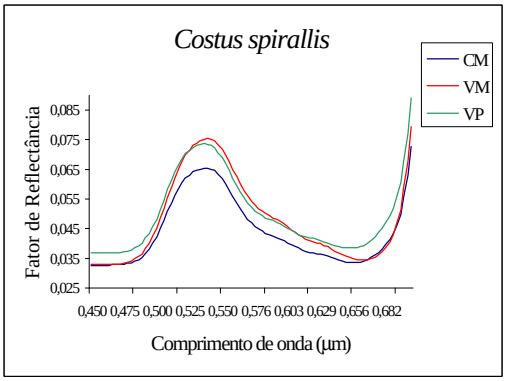
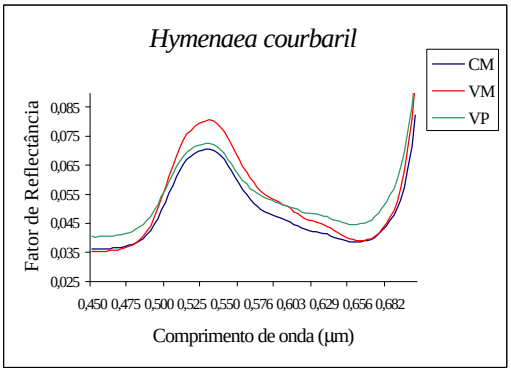


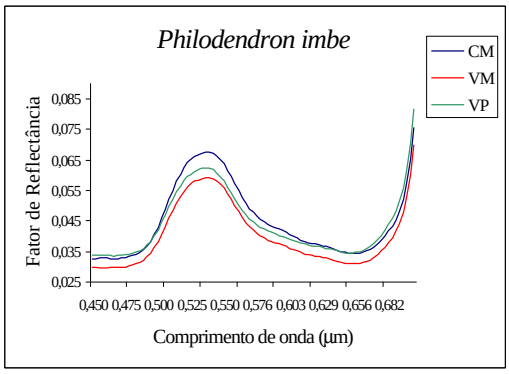
Fig. 4.3 - Curvas de FRDHs médios, na região do visível, obtidos a partir de todas as amostras coletadas em campo, onde CM refere-se a área do Caminho do Mar, VM ao Vale do Rio Mogi e VP ao Vale do Rio Pilões..
(continua)



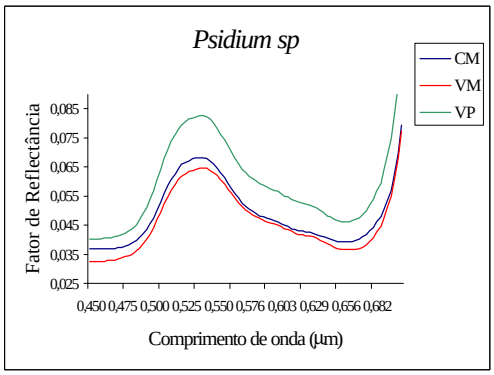
Tolerante



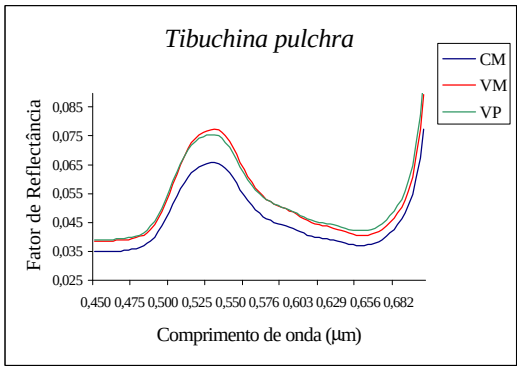
Sensível



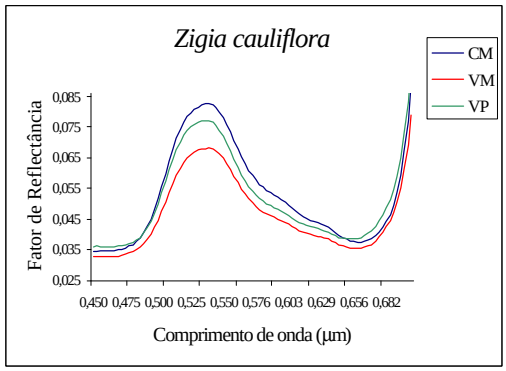
Tolerante



Sensível



Tolerante



Sensível

Fig. 4.3 - Conclusão

A análise destes gráficos permite verificar que de fato não houve uma tendência marcante no posicionamento dos valores de FRDH em função das áreas de coleta das amostras. Contudo, como já mencionado, destaca-se uma ligeira maior freqüência de ocorrência de valores superiores de FRDH provenientes do Vale do Rio Pilões, em comparação com aqueles provenientes das demais áreas (Caminho do Mar e Vale do

Rio Mogi). Isso poderia indicar que as folhas provenientes do Vale do Rio Pilões absorvem menos a radiação eletromagnética (REM) referente à essa região espectral. Vale salientar que o dossel florestal existente nessa área apresenta elementos arbóreos de maior porte do que aqueles que se desenvolvem nas demais áreas, o que conferia um maior sombreamento à parcela na qual se desenvolviam as plantas utilizadas nesse trabalho.

Na região do infravermelho próximo, as curvas distanciaram-se um pouco mais umas das outras, porém os FRDHs provenientes das diferentes áreas apresentaram alternância de posicionamento em cada uma das espécies, ou seja, para a espécie CC, por exemplo, os FRDHs provenientes do Vale do Rio Mogi apresentaram-se superiores aos FRDHs provenientes da região do Caminho do Mar e Vale do Rio Pilões. Contudo, em várias outras espécies, estes valores de FRDHs do Vale do Rio Mogi, apresentaram-se inferiores aos demais. O mesmo tipo de análise pode ser feito para os demais FRDHs provenientes de qualquer uma das três áreas e espécies. Neste nível de observação dos resultados, esse fato pode ser um indicativo de duas possibilidades: o efeito dos poluentes atmosféricos sobre a reflectância espectral das folhas não é significativo, os poluentes não exercem influência alguma, ou ainda, sua influência se manifesta de forma diferenciada, dependendo da espécie, não havendo portanto um padrão de sintoma que possa ser generalizado para todas as espécies.

Vale ressaltar que na análise discutida anteriormente, não foi considerada a distinção entre as espécies sensíveis e tolerantes. Se essa for considerada, então pode-se observar que as curvas de FRDH também não apresentaram qualquer tendência que permitisse a distinção espectral entre os dois grupos, ou seja, os resultados encontrados se repetiriam tanto para espécies sensíveis, quanto para espécies tolerantes.

Estas análises referem-se somente às formas das curvas, não sendo possível concluir sobre possíveis diferenças significativas entre os valores de FRDH. A seguir serão apresentados os resultados das análises estatísticas que tiveram como objetivo identificar essas diferenças.

4.3 Análise Estatística dos Valores de FRDHs e das Concentrações Químicas

Inicialmente aplicou-se um teste de igualdade de variância, conhecido como teste de Bartlett, com o objetivo de identificar os casos em que era possível aplicar o teste de ANOVA, uma vez que estas exigem que as populações tenham igualdade significativa de variâncias.

Nas Tabelas 4.1 e 4.2 estão contidos os resultados do teste de Bartlett para os valores de FRDHs e para as concentrações químicas de clorofila e CHN, respectivamente.

TABELA 4.1 - RESULTADOS REFERENTES AO TESTE DE IGUALDADE DE VARIÂNCIA PARA OS VALORES DE FRDH NAS BANDAS 1, 2, 3 E 4

	BANDA 1				BANDA 2				BANDA 3				BANDA 4			
Espécie	**CM**	**VM**	**VP**	**b**	**CM**	**VM**	**VP**	**b**	**CM**	**VM**	**VP**	**b**	**CM**	**VM**	**VP**	**b**
CC	0.08	0.14	0.04	2.4ns	0.30	0.27	0.29	0.03ns	0.09	0.13	0.03	6.4*	5.99	8.75	2.02	4.6ns
CO	0.04	0.05	0.02	2.8ns	0.07	0.11	0.09	1.10ns	0.03	0.05	0.02	4.2ns	6.82	10.45	1.64	10.4*
CP	0.03	0.02	0.03	0.7ns	0.07	0.06	0.09	0.30ns	0.04	0.01	0.01	2.3ns	0.81	1.10	0.78	0.4ns
CT	0.15	0.06	0.05	4.9ns	0.50	0.40	0.23	2.10ns	0.10	0.04	0.06	2.8ns	6.35	8.64	10.22	0.8ns
HC	0.04	0.02	0.11	6.9*	0.44	0.09	0.13	9.40*	0.02	0.01	0.17	20.1*	1.37	1.90	1.05	0.9ns
MC	0.04	0.02		2.3ns	0.15	0.13		0.10ns	0.03	0.01		9.4*	1.41	0.46		5.4*
PH	0.08	0.05	0.10	2.1ns	0.47	0.19	0.37	56.00*	0.03	0.04	0.08	4.0ns	8.00	6.83	5.77	0.3ns
PS	0.01	0.07	0.03	11.9*	0.05	0.08	0.07	1.10ns	0.01	0.04	0.09	11.1*	0.58	16.42	0.60	53.6*
TB	0.02	0.03	49.5	217*	0.10	0.22	0.14	2.80ns	0.01	0.02	0.01	3.6ns	2.34	0.47	0.33	19.8*
ZC	0.162	0.038	0.07	4.4ns	0.93	0.18	0.24	6.5*	0.06	0.01	0.01	5.8ns	4.50	3.09	2.57	0.6ns

* significativo ($\alpha = 0,05$) pelo teste de Bartlett; ns = não significativo;

OBS: Os valores (variâncias) da Tabela de Caminho do Mar, Vale do Rio Mogi e Vale do Rio Pilões estão na potência de 10^{-4}

TABELA 4.2 - RESULTADOS REFERENTES AO TESTE DE IGUALDADE DE VARIÂNCIA PARA CLOROFILA E CHN

	CLOROFILA				CARBONO				HIDROGÊNIO				NITROGÊNIO			
Esp.	CM	VM	VP	b	CM	VM	VP	b	CM	VM	VP	b	CM	VM	VP	b
CC	18.59	0.50	1.80	1.2ns	0.18	0.88	0.16	5.1ns	0.01	0.04	0.02	4.9ns	0.08	0.07	0.05	0.3ns
CO	0.76	0.52	0.61	10.5*	0.32	0.82	1.38	3.6ns	0.02	0.05	0.04	1.8ns	0.08	0.06	0.02	2.8ns
CP	0.86	0.33	0.16	0.9ns	1.08	0.18	0.51	3.3ns	0.01	0.06	0.02	2.4ns	0.02	0.01	0.003	2.2ns
CT	1.93	0.55	0.65	1.3ns	0.12	0.46	0.61	3.0ns	0.01	0.03	0.08	5.1ns	0.04	0.11	0.08	1.1ns
HC	2.90	0.47	1.04	5.3ns	1.02	0.11	0.09	9.8*	0.03	0.04	0.001	7.2*	0.07	0.04	0.11	0.9ns
MC	0.59	0.20		2.3ns	0.71	0.18		3.5ns	0.01	0.05		3.5ns	0.03	0.01		3.4ns
PH	3.94	1.78	2.28	1.1ns	1.00	1.64	2.00	0.7ns	0.01	0.04	0.06	4.3ns	0.01	0.06	0.36	13.5*
PS	1.62	0.37	0.48	4.8ns	0.24	1.24	0.46	6.1*	0.01	0.08	0.0002	17.9*	0.01	0.004	0.01	1.2ns
TB	0.29	1.04	0.07	12.9*	0.50	0.33	0.22	1.4ns	0.01	0.04	0.02	5.8ns	0.05	0.03	0.02	1.7ns
ZC	0.07	0.58	0.31	2.3ns	0.09	0.48	0.21	1.9ns	0.01	0.08	0.01	5.1ns	0.25	0.06	0.03	4.1ns

* significativo ($\alpha = 0,05$) pelo teste de Bartlett; ns = não significativo; Esp.- Espécie

Pela análise dos dados contidos na Tabela 4.1, observa-se que em cada uma das bandas espetrais houveram algumas espécies que não apresentaram igualdade de variância, sendo estas as seguintes:

- Banda 1 → espécies HC, PS e TB;
- Banda 2 → espécies HC, PH e ZC;
- Banda 3 → espécies CC, HC, MC e PS; e
- Banda 4 → espécies CO, MC, PS e TB.

Já na Tabela 4.2 as espécies que apresentaram resultados significativos foram:

- Clorofila → espécies CO e TB;
- Carbono → espécies HC e PS;
- Hidrogênio → espécies HC e PS; e
- Nitrogênio → espécie PH.

De posse dos resultados contidos nas Tabelas 4.1 e 4.2, adotou-se o seguinte procedimento: para as espécies que não apresentaram igualdade de variância (significativo $\alpha = 0,05$) aplicou-se o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis e para

aquelas que apresentaram igualdade de variância, a análise estatística foi através da aplicação de métodos de comparação múltipla, ou seja, análise de variância e teste de Tukey.

Os resultados da análise de variância são mostrados no Apêndice A. De acordo com os resultados, nota-se que somente a espécie MC não apresentou diferença significativa ($\alpha = 0,05$) para os valores de FRDH na região espectral correspondente à banda 2.

Considerando agora a aplicação da ANOVA sobre os valores das concentrações químicas, pode-se observar também no Apêndice A, que para a concentração de clorofila as espécies que não apresentaram resultados significativos foram CT e CC; para carbono o mesmo ocorreu com a espécie PH; hidrogênio não apresentou diferenças significativas em HC, TB, ZC, CP, CC, CO e finalmente para o nitrogênio, o mesmo aconteceu com HC e CT; resultados estes que indicaram a não existência de diferenças significativas entre essas concentrações químicas das folhas destas espécies provenientes de cada uma das três áreas de estudo.

Para as amostras, onde não houve igualdade de variância aplicou-se o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis, cujos resultados encontram-se nas Tabelas 4.3 e 4.4.

Os testes estatísticos não foram aplicados sobre as concentrações de feofitina porque estas só foram determinadas para verificar se estava havendo degradação da clorofila, e através dos resultados obtidos constatou-se que isso não ocorreu, uma vez que as concentrações de feofitina foram muito semelhantes às de clorofila, sendo às vezes até iguais entre si, como por exemplo a da espécie PH do Vale do Rio Pilões, onde a concentração de clorofila foi 3,71 e a de feofitina foi de 3,71 (mg/clorofila/litro de amostra), ZC da área do Vale do Rio Mogi clorofila foi 6,19 e feofitina 6,28 (mg/clorofila/litro de amostra) etc.

TABELA 4.3 - DIFERENÇA DE MÉDIA, OBTIDA ATRAVÉS DO TESTE KRUSKAL-WALLIS, PARA OS VALORES DE FRDH NAS BANDAS 1, 2, 3 E 4

	BANDA 1				BANDA 2				BANDA 3				BANDA 4			
Esp.	**CM**	**VM**	**VP**	**H**	**CM**	**VM**	**VP**	**H**	**CM**	**VM**	**VP**	**H**	**CM**	**VM**	**VP**	**H**
CC									142,5	467	248,5	9,60*				
CO													261	606	618	33,17*
CP																
CT																
HC	267	433	234	8,81*	240.5	558	122.5	11.7*	256	426	264	18,21*				
MC									630	190		29,22*	231	580		25,14*
PH					433	297,5	348,5	7,17*								
PS	850,6	250,5	303	42,47*					820	261	297	32,48*	942,5	250	177,5	26,24*
TB	183	803,5	724,5	34,70*									173,5	716,5	702	4,52ns
ZC					166	91,5	310	-3,07								

*significativo ($\alpha = 0,05$) para o teste de Kruskal-Wallis;
ns = não significativo; Esp. - Espécie

OBS: Os resultados de Caminho do Mar (CM), Vale do Rio Mogi (VM) e Vale do Rio Pilões (VP) são a soma de R1, R2 e R3 necessários para aplicar o teste de Kruskal-Wallis (teste não-paramétrico).

TABELA 4.4 - DIFERENÇA DE MÉDIA, OBTIDA ATRAVÉS DO TESTE KRUSKAL-WALLIS PARA AS CONCENTRAÇÕES DE CLOROFILA E CHN

	CLOROFILA				CARBONO				HIDROGÊNIO				NITROGÊNIO			
Espécie	**CM**	**VM**	**VP**	**H**	**CM**	**VM**	**VP**	**H**	**CM**	**VM**	**VP**	**H**	**CM**	**VM**	**VP**	**H**
CC																
CO																
CP	56	185	137	17,86*												
CT																
HC					134	63	56	7,37*	95,5	128	29,5	3,37ns				
MC																
PH													45	95	113	7,87*
PS					166	161	24	2,83ns	125,5	178,5	47	6,78*				
TB	99	188	91	6,16*												
ZC																

*significativo (α = 0,05) para o teste de Kruskal-Wallis;
ns = não significativo

OBS: Os resultados de Caminho do Mar (CM), Vale do Rio Mogi (VM) e Vale do Rio Pilões (VP) são a soma de R1, R2 e R3 necessários para aplicar o teste de Kruskal-Wallis (teste não-paramétrico)

Pelos resultados contidos na Tabela 4.3, pode-se notar que, para a banda 4, todas as espécies apresentaram diferenças significativas (α=0,05) pelo teste de Kruskal-Wallis, exceto a espécie TB na banda 4, cujo valor de FRDH não foi significativo. Os valores identificados em vermelho referem-se a resultados da aplicação do teste Kruskal-Wallis que provavelmente não atenderam a alguma pressuposição necessária à sua aplicação, uma vez que foram identificados valores negativos que são inconsistentes para o teste em questão. Assim, optou-se por desconsiderar estes resultados especificamente para a espécie ZC.

Observando os resultados contidos na Tabela 4.4, pode-se constatar que a maioria das espécies, analisadas também pelo teste de Kruskal-Wallis, apresentaram resultados significativos, com exceção da espécie HC para a concentração de hidrogênio e a espécie PS para a concentração de carbono. Estas duas espécies apresentaram resultados não significativo, indicando que elas apresentam concentrações de hidrogênio e carbono

iguais nas três áreas de estudo.

Considerando os casos nos quais foram identificadas diferenças significativas em pelo menos uma média de FRDH ou de concentração química, quer seja através da aplicação das ANOVAs, quer pela aplicação do teste de Kruskal-Wallis, seguiu-se a aplicação do teste de Tukey (α=0,05). Os resultados referentes aos FRDHs encontram-se apresentados na Tabela 4.5.

TABELA 4.5 - RESULTADOS DO TESTE DE TUKEY PARA OS VALORES DE FRDH, NAS BANDAS 1, 2, 3 E 4

FRDH / Espécies	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4
CC	0,0428 a 0,0422 a 0,0368 b	0,0610 a 0,0560 a 0,0502 b	0.0417 a 0.0411 a 0.0374 b	0,3575 a 0,3320 b 0,3162 b
CO	0,0415 a 0,0356 b 0,0351 b	0,0589 a 0,0486 b 0,0470 b	0,0413 a 0,0410 a 0,0357 b	0.2885 a 0.2506 b 0.2072 c
CP	0,0404 a 0,0386 ab 0,0371 b	0,0556 a 0,0554 a 0,0494 b	0,0407 a 0,0387 b 0,0381 b	0,2825 a 0,2768 a 0,2664 b
CT	0,0449 a 0,0401 ab 0,0396 b	0,0610 a 0,0591 ab 0,0545 b	0,0415 a 0,0360 b 0,0358 b	0,3351 a 0,2944 a 0,2767 b
HC	0.0481 a 0.0456 b 0.0438 c	0,0675 a 0,0628 ab 0,0588 b	0.0481 a 0.0425 b 0.0413 b	0,3391 a 0,3302 a 0,3126 b
PH	0,0398 a 0,0395 a 0,0359 b	0.0552 a 0.0516 ab 0.0489 b	0,0374 a 0,0369 a 0,0335 b	0,3550 a 0,3104 b 0,2984 b
PS	0.0512 a 0.0443 b 0.0404 c	0,0709 a 0,0583 b 0,0560 c	0.0502 a 0.0419 b 0.0392 c	0.3493 a 0.3443 a 0.2887 b
TB		0,0643 a 0,0633 a 0,0554 b	0,0452 a 0,0435 b 0,0397 c	
ZC	0,0459 a 0,0455 a 0,0409 b		0,0423 a 0,0408 a 0,0383 b	0,3578 a 0,3094 b 0,2851 c

Tratamentos com letras iguais não diferem entre si ($\alpha = 0,05$) pelo teste de Tukey.

FR – média do Fator de Reflectância de cada uma das áreas de estudo, em ordem decrescente.

Azul – corresponde às médias referentes à região do Caminho do Mar;

Vermelho - corresponde às médias referentes à região do Vale do Rio Mogi;

Verde - corresponde às médias referentes à região do Vale do Rio Pilões.

A observação dos dados contidos na Tabela 4.5 permite constatar que na região do visível, para a grande maioria das espécies, independentemente de serem tolerantes ou sensíveis, os valores de FRDH referentes às folhas provenientes do Vale do Rio Pilões apresentaram tendência de serem significativamente (α=0,05) superiores aos mesmos valores provenientes das folhas das demais áreas. Essa observação já foi apresentada quando feita a discussão dos gráficos apresentados nas Figuras 4.2 e 4.3. Sendo Vale do Rio Pilões uma área considerada como controle, o esperado seria que as plantas estariam realizando mais intensamente fotossíntese do que aquelas localizadas nas áreas poluídas (Caminho do Mar e Vale do Rio Mogi), absorvendo mais REM e conseqüentemente refletindo menos. No entanto, como esta área é muito sombreada devido ao porte do dossel em relação às outras duas, talvez este sombreamento possa ter influenciado no desenvolvimento/fisiologia das folhas e esta influência trouxe conseqüências em suas respostas espectrais, uma vez que as folhas estão absorvendo menos REM e refletindo relativamente mais. De fato, o trabalho realizado por Pradella et al. (1999) com espécies ocorrentes nas áreas aqui consideradas, constatou que o Ponto de Compensação à Luz (PCL) tendeu a ser menor no Vale do Rio Pilões do que aqueles encontrados nas áreas do Caminho do Mar e Vale do Rio Mogi, isso para a maioria das espécies. O PCL é intensidade luminosa em que a fotossíntese é igual à respiração, ou seja, em termos biológicos, o PCL refere-se à intensidade luminosa a partir da qual inicia-se o balanço positivo da fotossíntese, com a respectiva produção de carboidratos. Assim, a maioria das espécies analisadas por Pradrella et al. (1999) no Vale do Rio Pilões, inicia o balanço positivo da fotossíntese em intensidades luminosas menores do que aquelas mesmas espécies ocorrentes nas demais áreas (Vale do Rio Mogi e Caminho do Mar), e apresentam atividade fotossintética também menor, o que confirma os resultados alcançados neste trabalho.

Na região do infravermelho próximo (banda 4), observa-se que os FRDHs, obtidos nas folhas coletadas no Vale do Rio Mogi freqüentemente foram significativamente inferiores aos FRDHs determinados nas folhas provenientes da área controle (Vale do Rio Pilões), fato este observado nas curvas da Figura 4.2 e nos dados da Tabela 4.5.

Segundo Esau (1974), as folhas que se desenvolvem em locais com maior intensidade

luminosa, como é o caso das áreas do Caminho do Mar e Vale do Rio Mogi em relação ao Vale do Rio Pilões, mostram um grau de xeromorfia maior do que aquelas que estão protegidas da luz. Foi observado que folhas desenvolvidas sob a ação da luz solar direta são menores, porém mais espessas e apresentam tecido paliçádico mais fortemente diferenciado do que as folhas que se desenvolvem na sombra. Com base neste estudo, pode-se talvez atribuir a baixa reflectância encontrada nas folhas provenientes da área Vale do Rio Mogi à estrutura interna das folhas das plantas ser mais compacta do que daquelas que estão se desenvolvendo no Vale do Rio Pilões. Esse resultado contrapõe as observações apresentadas por Pradella et al.(1999), que encontraram maior freqüência de folhas que apresentavam xeromorfia nas áreas poluídas (Caminho do Mar e Vale do Rio Mogi), apontando como possível causa o fato de que plantas que se desenvolvem em áreas não sujeitas à ação de poluentes tenderiam a investir mais na elaboração de estrutura do que aquelas que se desenvolvem em áreas poluídas. Contudo, concorda com as observações de DeLucia et al. (1996), nas quais as folhas que se desenvolvem em ambientes mais sombreados apresentam menor número de camada de células paliçádicas e mesófilo esponjoso mais desenvolvido (menor esclerofilia).

Knap e Carter (1998) estudaram a variação de espessura foliar de várias espécies que se desenvolvem em clima temperado, em função das condições ambientais, concentrando maior atenção à luminosidade. Os autores tentaram associar a espessura das folhas em função da luminosidade do ambiente na qual as plantas se desenvolviam. Eles constataram que a variância das espessuras foi tão grande que não foi possível associá-las às condições ambientais de luminosidade, ou seja, dentro de um mesmo ambiente, as espessuras variam tanto quanto aquelas apresentadas por folhas que se desenvolvem em ambientes diferentes. Contudo, os autores salientam que houve uma forte tendência de aumento da espessura das folhas das espécies que se desenvolviam em ambientes mais iluminados.

Por outro lado, os resultados encontrados para o FRDH, coadunam com aqueles encontrados por Knap e Carter (1998). Os autores concluiram que os valores do FRDH encontrados para folhas que se desenvolvem em ambientes diferentes (iluminados e sombreados) não apresentaram diferenças significativas.

Na Tabela 4.6 são mostrados os resultados do teste de Tukey, para as concentrações de clorofila e CHN, obtidos das amostras de folhas provenientes das espécies tolerantes e sensíveis, nas três áreas selecionadas para o estudo.

TABELA 4.6 - RESULTADOS DO TESTE DE TUKEY PARA AS CONCENTRAÇÕES QUÍMICAS DE CLOROFILA E CHN

Conc.Quím. / Espécie	CLOROFILA (ppm)	CARBONO (%)	HIDROGÊNIO (%)	NITROGÊNIO (%)
CC		49,00 a 48,00 a 47,08 b		3,74 a 3,68 ab 3,31 b
CO	8.08 a 7.88 a 4.90 b	47,92 a 46,07 b 45,46 b		3,51 a 3,16 b 2,93 b
CP	8,18 a 7,16 b 6,57 b	52,90 a 51,91ab 51,04 b		2,33 a 2,25 a 2,05 b
CT		46,28 a 44,96 b 44,90 b	6,86 a 6,45 b 6,40 b	
HC	7,83 a 6,82 a 5,35 b			
PH	7,08 a 6,82 a 4,78 b	53.51 a 53.36 ab 52.52 b	7,35 a 6,93 b 6,72 b	
PS	6,79 a 6,11 a 5,01 b		6.51 a 6.40 ab 6.30 b	1,73 a 1,71 a 1,61 b
TB	6.39 a 5.56 b 5.47 b	47,88 a 47,17 b 45,19 c		2,50 a 2,17 b 2,10 b
ZC	5,48 a 5,27 a 4,10 b	50,69 a 50,04 ab 49,67 b		4,62 a 4,33 a 3,80 b

Tratamentos com letras iguais não diferem entre si ($\alpha = 0,05$) pelo teste Tukey.

Azul - corresponde às médias referentes à região do Caminho do Mar;

Vermelho - corresponde às médias referentes à região do Vale do Rio Mogi;

Verde - corresponde às médias referentes à região do Vale do Rio Pilões

Na Tabela 4.6 são apresentadas somente os casos nos quais foram identificadas diferenças significativas entre as concentrações químicas dos elementos existentes nas folhas provenientes das três áreas.

Observando então os dados apresentados na Tabela 4.6, é possível constatar que houve uma tendência de encontrar valores significativamente superiores das concentrações de clorofila nas folhas provenientes do Vale do Rio Pilões, independentemente da espécie. As únicas exceções ocorreram com as espécies PH e TB, que apresentaram concentrações de clorofila significativamente inferiores no Vale do Rio Pilões, em relação às demais áreas. Aparentemente este resultado contradiz com aquele apresentado na Tabela 4.5 referente aos valores de FRDH encontrados para as bandas da região do visível, uma vez que para maiores concentrações de clorofila o esperado seriam menores valores de FRDH. Contudo, vale relembrar os resultados apresentados por Pradella et al. (1999) com relação aos PCLs de algumas espécies ocorrentes nas três áreas em questão. Como descrito por este autor e já apresentado anteriormente, a atividade fotossintética das espécies ocorrentes no Vale do Rio Pilões foi menor do que aquela verificada nas mesmas espécies que se desenvolvem no Caminho do Mar e Vale do Rio Mogi. Assim, a maior quantidade de clorofila encontrada nas folhas oriundas de Vale do Rio Pilões pode tratar-se de um mecanismo de compensação (devido a menor quantidade de luz) de forma a garantir níveis mínimos de atividade fotossintética.

As concentrações de carbono também apresentaram tendência de serem significativamente superiores nas folhas oriundas do Vale do Rio Pilões, de uma forma mais discreta do que aquela encontrada para as concentrações de clorofila. Neste caso, as exceções foram identificadas em CT (valores encontrados no Vale do Rio Mogi foram significativamente superiores), PH (não houve diferença significativa entre as médias das concentrações de carbono) e PS (também não houve diferença significativa entre as médias das concentrações de carbono). Esse resultado seria um indicativo de que no Vale do Rio Pilões, há uma maior produção de biomassa foliar, quando comparado com as demais áreas, o que concordaria com os resultados descritos por Pradella et al. (1999), que sugerem maior esclerofilia nas folhas que se desenvolvem no Vale do Rio Pilões, do que naquelas existentes nas demais áreas; e ainda com as observações de Fialho (1997) referentes à maior frequência de folhas menos esclerófilas no Vale do Rio Mogi e Caminho do Mar. Contudo, como já mencionado anteriormente, os valores de FRDH referentes à região do infravermelho próximo (banda 4), indicaram conclusão completamente contrária, ou seja, que as folhas existentes no Vale do Rio

Pilões eram menos esclerófilas. Pelas conclusões apresentadas por Pradella et al. (1999), as plantas que se desenvolvem em condições menos estressantes investem mais energia na elaboração de estrutura do que aquelas existentes em áreas sujeitas a diferentes tipos de poluição. O autor sugere que essa afirmação ainda é passível de confirmação.

Considerando agora as concentrações de nitrogênio, não foi verificada qualquer tendência marcante entre essas concentrações nas diferentes áreas de estudo. Uma vez que este nutriente também está associado à atividade fotossintética (Meurer et al., 1981; Salisbury et al., 1969) o esperado seria que quanto maior fosse o valor de sua concentração em folhas, menor seria o valor dos FRDHs correspondentes à região do visível. Analisando os resultados alcançados por espécie, praticamente 50% destas apresentaram resultados esperados, enquanto que os demais 50% apresentaram resultados contrários, o que pode ser um indicativo de que o nitrogênio não explicou a dinâmica dos valores de FRDH em comparação à clorofila e ao carbono.

Para a maioria das espécies, as concentrações de hidrogênio não apresentaram diferenças significativas entre as três áreas, com exceção de CT e PS que apresentaram valores significativamente superiores nas concentrações determinadas no Vale do Rio Mogi, sendo as menores concentrações identificadas no Vale do Rio Pilões. Nas demais espécies, as concentrações deste elemento não apresentaram diferenças significativas. Meurer et al. (1981) consideram que o hidrogênio pode ser absorvido da água e também do ar atmosférico. No processo fotossintético, através da fotólise, a água (H_2O) é reduzida a hidrogênio (H), sendo que maiores concentrações deste elemento seriam um indicativo de que a atividade fotossintética seria então também maior. Para as espécies nas quais foram identificadas diferenças significativas, o resultado é coerente, uma vez que as áreas afetadas por poluentes (Caminho do Mar e Vale do Rio Mogi) apresentaram indícios de realizarem maior atividade fotossintética, quer seja através da análise dos valores de FRDH, quer pelos valores das concentrações de clorofila, carbono e nitrogênio.

Para melhor compreender as relações entre o universo espectral (valores de FRDH) e o universo químico (valores das concentrações químicas), foram determinados os coeficientes de correlação entre os valores de FRDH e os respectivos valores de

concentrações químicas, conforme descrito no item 3.8. Os coeficientes de correlação (*r*) encontram-se apresentados na Tabela 4.7.

TABELA 4.7 - VALORES DOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO (r) DETERMINADOS ENTRE OS VALORES DE FRDH E AS CONCENTRAÇÕES QUÍMICAS DE CLOROFILA E CHN

Cecropia glazioni -CC (espécie tolerante)

Concentrações Químicas	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4
Clorofila	-0,4281	-0,3463	-0,3577	-0,1746
Carbono	0,5911	0,6705	0,6834	0,0527
Hidrogênio	0,5817	0,4065	0,5788	0,5442
Nitrogênio	-0,3160	-0,1885	-0,2091	-0,2252

Cordia sellowiana -CO (espécie sensível)

Concentrações Químicas	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4
Clorofila	0,4395	0,4950	-0,3321	0,7600
Carbono	0,5783	0,6104	0,3600	0,5876
Hidrogênio	0,2081	0,2759	-0,1123	0,3886
Nitrogênio	-0,3212	-0,3136	-0,4015	-0,1319

Campomanesia phae -CP (espécie sensível)

Concentrações Químicas	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4
Clorofila	0,2650	0,1907	0,1898	-0,4480
Carbono	-0,2908	-0,4470	-0,0497	0,0914
Hidrogênio	-0,1452	-0,1568	-0,0999	-0,5607
Nitrogênio	-0,0585	-0,1746	0,1158	-0,6011

Costus spirallis – CT (espécie tolerante)

Concentrações Químicas	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4
Clorofila	0,1821	-0,0522	0,1604	0,4776
Carbono	-0,2989	-0,0871	-0,3011	-0,2624
Hidrogênio	-0,3971	-0,1815	-0,4342	-0,5022
Nitrogênio	-0,1689	0,0107	-0,2137	-0,0408

Hymenaea courbaril - HC (espécie sensível)

Concentrações Químicas	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4
Clorofila	-0,4708	-0,5210	-0,2399	0,5710
Carbono	0,1318	-0,1615	0,0760	0,5415
Hidrogênio	-0,0541	0,2594	-0,0723	-0,2188
Nitrogênio	-0,1761	-0,4825	-0,0154	0,0429

Philodendron imbe - PH (espécie tolerante)

Concentrações Químicas	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4
Clorofila	-0,4395	-0,2388	-0,4677	-0,5195
Carbono	-0,2458	-0,3757	-0,1772	-0,1852
Hidrogênio	-0,5961	-0,5564	-0,5211	-0,7139
Nitrogênio	-0,0675	-0,0566	-0,1590	0,4479

(continua)

TABELA 4.7 - Conclusão

Psidium sp - PS (espécie sensível)

Concentrações Químicas	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4
Clorofila	0,5284	0,2766	0,4477	0,5578
Carbono	0,3914	-0,3285	-0,3221	0,4476
Hidrogênio	-0,3541	-0,2258	-0,2329	-0,5511
Nitrogênio	0,3260	0,2169	0,2294	0,4447

Tibouchina pulchra – TB (espécie tolerante)

Concentrações Químicas	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4
Clorofila	0,0569	0,0334	-0,0962	0,2796
Carbono	0,1915	0,5997	0,7916	0,7203
Hidrogênio	-0,0590	0,1656	-0,0258	0,0445
Nitrogênio	-0,3140	0,2751	-0,0322	0,4141

Zigia cauliflora – ZC (espécie sensível)

Concentrações Químicas	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4
Clorofila	-0,4542	-0,5018	-0,3592	-0,0450
Carbono	0,4854	0,3667	0,4954	0,6265
Hidrogênio	-0,2159	-0,1918	-0,2412	-0,1275
Nitrogênio	-0,6951	-0,8190	-0,5542	-0,3410

Miconia thaezans – MC (espécie tolerante)

Concentrações Químicas	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4
Clorofila	-0,7431	-0,5353	-0,9147	0,8885
Carbono	0,5546	0,1607	0,9063	-0,8719
Hidrogênio	0,1530	0,0399	0,2398	-0,4034
Nitrogênio	-0,4081	-0,1239	-0,7033	0,7275

Os valores de *r* apresentados em vermelho referem-se a *r* >= 0,5000, os quais foram arbitrariamente considerados como de correlação média a alta. Assim, analisando-se os dados contidos nas Tabelas 4.5 e 4.6, levando-se em consideração os valores de *r* determinados, os resultados poderiam ser assim explicados para cada espécie:

CC: os maiores valores de *r* foram encontrados nas relações entre os valores de FRDH referentes às bandas da região do visível e as concentrações de carbono; e ainda entre os FRDHs da banda 3 e da banda 4 e os valores das concentrações de hidrogênio. Em todos estes casos, as relações foram diretas (valores positivos de *r*), o que, à primeira vista, parece ser um resultado incoerente, uma vez que quanto menores os valores de FRDH referentes à região do visível, a atividade fotossintética deveria ser maior com conseqüente maior produção de matéria

expressa em concentração de carbono. Contudo, convém salientar que as maiores concentrações de carbono foram encontradas no Vale do Rio Pilões, bem como os maiores valores de FRDH referentes à região do visível, indicando que apesar de realizarem fotossíntese menos intensamente do que as plantas existentes no Caminho do Mar e Vale do Rio Mogi (áreas poluídas), as plantas de CC que se desenvolvem no Vale do Rio Pilões produziram mais matéria do que as primeiras. De fato, Pradella et al. (1999) determinaram o peso foliar médio desta espécie em indivíduos ocorrentes nas três áreas em questão e identificaram que as folhas com maior peso foram aquelas existentes no Vale do Rio Pilões. Outro resultado interessante que pode ser um indicativo de que a afirmação anterior é pertinente, refere-se às relações entre os valores de FRDH da região do visível e as concentrações de clorofila, as quais resultaram em valores de *r* inferiores a 0,5000 (aqui considerados como "fracos"), mas cujos sinais foram negativos, indicando relações inversas. Esse resultado foi coerente com o esperado, uma vez que quanto menor for a reflectância na região do visível por parte da vegetação, esperam-se maiores concentrações de clorofila. Comparando-se os resultados apresentados nas Tabelas 4.5 e 4.6, para esta espécie, pode-se verificar que as relações entre o carbono e os valores de FRDH foram coerentes, uma vez que as áreas que apresentaram as maiores concentrações deste elemento, apresentaram também os maiores valores de FRDH. Para o caso do hidrogênio, não foram identificadas diferenças significativas entre os valores das suas concentrações;

CO: para esta espécie, os maiores valores de *r* foram encontrados nas relações entre as concentrações de clorofila e os valores de FRDH da banda 4, e entre as concentrações de carbono e os valores de FRDH das bandas 1, 2 e 4. A relação entre a clorofila e os FRDHs da banda 4 pode ser indireta, ou seja, é possível que uma maior concentração de clorofila (para esta espécie) implique em uma formação menos compacta da estrutura interna de suas folhas. Nota-se ainda que foi encontrado valor de *r* igualmente considerável na relação entre as concentrações de carbono e os FRDHs referentes à esta banda espectral, o que poderia ser mais um indicativo de que a hipótese acima apresentada teria alguma

fundamentação. Ainda para a banda 4, conforme pode ser observado na Tabela 4.5, o teste de Tukey indicou a ocorrência de diferença significativa entre os valores de FRDH provenientes das três áreas, sendo o maior valor aquele referente no Vale do Rio Pilões (área controle) e o menor aquele proveniente do Caminho do Mar. Consistentemente, as maiores concentrações de clorofila foram encontradas também no Vale do Rio Pilões e no Vale do Rio Mogi, conforme pode ser observado nos resultados apresentados na Tabela 4.6. Por esse resultado, conclui-se que as folhas de CO provenientes do Vale do Rio Pilões seriam menos esclerófilas, o que corrobora com as afirmações de Esau (1974) e Knap e Carter (1998), já apresentadas anteriormente. Valores de *r* também consideráveis foram encontrados nas relações entre as concentrações de carbono e os FRDHs referentes às bandas 1 e 2. Aqui poderiam ser apresentadas as mesmas argumentações mencionadas em CC quanto à contradição deste resultado, uma vez que era de se esperar uma relação inversa entre essas variáveis;

CP: as relações entre as concentrações de todos os elementos químicos aqui analisados e os valores de FRDH de todas as bandas espectrais foram consideradas baixas para essa espécie, tomando-se como limiar *r*>= 0,5000, com exceção das relações de hidrogênio e de nitrogênio, ambas com os valores de FRDH da banda 4. Destaca-se o carácter inverso destas relações em ambos os casos, indicando que o aumento das concentrações de nitrogênio e de hidrogênio estariam acarretando a diminuição das valores de FRDH na banda 4. Esse resultado seria um indicativo que para essa espécie, o aumento das concentrações de ambos os elementos químicos proporcionariam um espessamento/compactação da estrutura interna de suas folhas, o que acarretaria a diminuição do espalhamento interno da REM, nessa região espectral. Analisando os dados contidos na Tabela 4.6, não foi identificada diferença significativa entre os valores das concentrações de hidrogênio nas três áreas, enquanto que as concentrações de nitrogênio referentes ao Vale do Rio Pilões e ao Vale do Rio Mogi foram significativamente superiores àquela medida nas folhas provenientes do Caminho do Mar. Dessa forma, e considerando a relação

inversa mencionada, o esperado seria que as áreas que apresentassem as maiores concentrações de nitrogênio deveriam apresentar os menores valores de FRDH referentes à banda 4. A comparação dos resultados apresentados nas Tabelas 4.5 e 4.6 permite verificar que de fato isso ocorreu.

CT: a única relação mais elevada foi encontrada entre as concentrações de hidrogênio e os valores de FRDH referentes à banda 4. Valem portanto os mesmos comentários apresentados em CP. A comparação dos dados referentes à esta espécie e apresentados nas Tabelas 4.5 e 4.6 permite verificar que as áreas que apresentaram as maiores concentrações de hidrogênio (Vale do Rio Mogi e Caminho do Mar), foram aquelas que apresentaram os menores valores de FRDH nesta banda espectral, ou seja, haveria mais uma evidência de que a maior concentração de hidrogênio, uma vez associada a uma maior atividade fotossintética e a uma maior produção de matéria, acarretaria uma maior compactação das folhas dessa espécie, a qual estaria implicando na diminuição dos valores de FRDH referentes à banda 4. Pradella et al. (1999) encontraram pesos foliares médios desta espécie mais elevados nestas duas áreas, em relação ao peso foliar medido nas folhas provenientes do Vale do Rio Pilões, o que sustenta essa hipótese formulada;

HC: nesta espécie, foram identificados valores maiores de *r* nas relações entre clorofila e os FRDHs referentes às bandas 2 e 4 e entre carbono e os FRDHs da banda 4. Destaca-se a relação inversa e esperada entre a concentração de clorofila e os valores de FRDH da banda 2. Os resultados apresentados nas Tabelas 4.5 e 4.6 demonstram que as áreas que apresentaram as maiores concentrações de clorofila, foram aquelas que apresentaram os menores valores de FRDH na banda 2, o que demonstra coerência de resultados. Para as relações de clorofila e carbono com os valores de FRDH da banda 4, valem os mesmos comentários apresentados nas espécies anteriores, salientando-se a não disponibilidade de dados específicos como aqueles apresentados por Pradrella et al. (1999) para outras espécies;

PH: destaca-se aqui as relações inversas em todas as situações que apresentaram

valores de *r* mais elevados. As concentrações de clorofila apresentaram relação mais elevada com os valores de FRDH. Assim, concentrações mais elevadas de clorofila estariam acarretando menores valores de FRDH na banda 4, o que levaria à conclusão de que o aumento da concentração de clorofila acarretaria uma menor compactação das folhas dessa espécie. Esse resultado foi exatamente contrário àqueles alcançados nas demais espécies apresentadas até então. Comparando os resultados apresentados nas Tabelas 4.5 e 4.6 é possível verificar que as áreas que apresentaram maior concentração de clorofila (Caminho do Mar e Vale do Rio Mogi), apresentaram os menores valores de FRDH na banda 4, o que caracteriza um resultado consistente. Os outros valores consideráveis de *r* foram identificados nas relações entre as concentrações de hidrogênio e todas as bandas espectrais. Para as bandas do visível, esse resultado parece bastante coerente, uma vez que quanto maior a concentração deste elemento, espera-se maior atividade fotossintética e consequentemente, menor reflexão nas bandas do visível. Observando os dados apresentados nas Tabelas 4.5 e 4.6 é possível constatar que no Vale do Rio Mogi foram encontrados os menores valores de FRDH e os maiores valores de concentração de hidrogênio. Para a banda 4, a relação inversa entre as concentrações de hidrogênio e os valores de FRDH indica que haveria uma maior compactação das folhas com o aumento da atividade fotossintética, contudo essa afirmação não pode ser comprovada neste trabalho;

PS: aqui foram encontrados valores mais elevados de *r* nas relações entre as concentrações de clorofila e os valores de FRDH das bandas 1 e 4, e entre as concentrações de carbono e os valores de FRDH da banda 4. Nos primeiros dois casos, a relação direta da clorofila com a banda 1 parece incoerente, assim como já comentado anteriormente. Já a relação deste elemento com a banda 4, indicaria que maiores concentrações de clorofila acarretariam menor compactação das folhas dessa espécie. De fato, Guyot (1990) mencionou que a diminuição da concentração de clorofila causa diminuição na reflectância nessa região espectral devido à redução do número de camadas celulares, o que corrobora com os resultados aqui encontrados. Considerando os resultados

alcançados por Pradella et al. (1999), as folhas mais leves dessa espécie foram encontradas no Vale do Rio Pilões e pelos resultados alcançados neste trabalho, as maiores concentrações de clorofila foram encontradas nessa mesma área, que também apresentou maiores valores de FRDH (significativamente iguais àqueles determinados no Caminho do Mar). Este resultado é um indicativo que de fato as folhas desta espécie provenientes do Vale do Rio Pilões são realmente menos esclerófilas (menos compactas) do que aquelas que se desenvolvem no Caminho do Mar ou no Vale do Rio Mogi. Para a relação inversa entre as concentrações de hidrogênio e os valores de FRDH na banda 4, a área que apresentou a menor concentração deste elemento foi o Caminho do Mar, que resultou em maiores valores de FRDH na banda 4, juntamente com a área do Vale do Rio Pilões;

TB: as relações mais altas foram identificadas entre as concentrações de carbono e os valores de FRDH das bandas 2, 3 e 4. As relações diretas entre as concentrações deste elemento e os FRDH referentes às bandas do visível indicam que quanto maior a concentração de carbono, maiores foram os valores de FRDH nesta região espectral. Assumindo que a concentração de carbono está relacionada à quantidade de matéria produzida pelo processo de fontossíntese, é de se esperar que a relação entre estas variáveis fosse inversa. Para a relação direta entre as concentrações de carbono e os valores de FRDH da banda 4, o aumento das primeiras acarretaria o aumento dos valores de FRDH nessa região espectral, o que levaria à conclusão que o aumento das concentrações de carbono estaria promovendo uma menor compactação das folhas (menor esclerofilia). Pelos resultados apresentados nas Tabelas 4.5 e 4.6 percebe-se que foram identificadas diferenças significativas entre as concentrações de carbono das três áreas, sendo que as maiores concentrações foram identificadas no Vale do Rio Pilões. Pradella et al. (1999) encontraram maiores pesos médios foliares nas folhas provenientes do Vale do Rio Pilões, o que indicaria que realmente essas folhas possuem maior biomassa do que as demais que se desenvolvem nas outras áreas. Esse resultado contraria a afirmação de que as folhas das espécies que se desenvolvem no Vale do Rio Pilões são menos esclerófilas do que aquelas que se desenvolvem nas demais áreas. Talvez essa espécie apresente tendência

contrária, ou seja, em condições de menor luminosidade, suas folhas passam a ser mais espessas e compactas. Os valores de FRDH referentes à banda 4 não apresentaram diferença significativa entre as três áreas, o que impossibilita qualquer conclusão sobre a esclerofilia destas folhas;

ZC: os maiores valores de *r* foram encontrados nas relações entre as concentrações de clorofila e os valores de FRDH da banda 2 (relação inversa), entre as concentrações de carbono e os valores de FRDH da banda 4 e finalmente entre as concentrações de nitrogênio e os valores de FRDH das bandas do visível. Para o primeiro caso, a relação inversa parece coerente, assim como já comentado anteriormente. As menores concentrações de clorofila foram encontradas no Caminho do Mar, o que levaria a esperar valores maiores de FRDH na banda 2 também nesta área. Isso não foi comprovado, uma vez que não foram identificadas diferenças significativas entre os valores de FRDH nesta banda espectral, considerando as três áreas. No segundo caso, valem os mesmos comentários já apresentados referentes às possíveis relações entre as concentrações de carbono e os valores de FRDH da banda 4. As relações inversas entre as concentrações de nitrogênio e os valores de FRDH das bandas do visível também parecem coerentes, uma vez que esse elemento tem relação com a atividade fotossintética. Analisando os dados apresentados nas Tabelas 4.5 e 4.6, é possível verificar que as maiores concentrações de nitrogênio foram obtidas para as espécies Vale do Rio Mogi e do Vale do Rio Pilões. Por outro lado, os menores valores de FRDH nas bandas 1 e 3, foram verificados para as espécies do Vale do Rio Mogi.

MC: os dados referentes aos valores de FRDH e das concentrações químicas não aparecem nas Tabelas 4.5 e 4.6 para esta espécie, pois como já comentado anteriormente, não foram encontradas diferenças significativas entre eles. Apesar disso, foram determinados os valores de *r* entre estas variáveis, os quais encontram-se apresentados na Tabela 4.7. Para esta espécie então, verificou-se que foram encontradas correlações relativamente altas entre as concentrações de clorofila e os valores de FRDH referentes às bandas do visível e infravermelho

próximo, destacando-se a relação inversa para as bandas do visível, o que parece ser bastante consistente conforme já discutido anteriormente e a relação direta para a banda do infravermelho próximo, que poderia indicar que para esta espécie a maior atividade fotossintética poderia implicar na também maior formação de biomassa que seria arranjada de forma menos compacta, implicando, por sua vez, em um maior espalhamento da radiação incidente. As concentrações de carbono apresentaram relações completamente diferentes com os valores de FRDH quando comparadas com aquelas verificadas para as concentrações de clorofila. As relações diretas entre estas variáveis para a região do visível poderiam indicar quanto maior a biomassa, maior seria a reflectância na região do visível, enquanto que para a região do infravermelho próximo, a reflectância seria menor, indicando resultado completamente contrário ao observado para as concentrações de clorofila. Para as concentrações de hidrogênio os valores de *r* foram todos muito baixos, enquanto que para as de nitrogênio, somente foram identificados valores mais elevados para as bandas 3 e 4, sendo para a primeira uma relação inversa e para a segunda uma relação direta. Em ambos os casos, esse resultado é coerente com aquele discutido para as concentrações de clorofila, uma vez que o nitrogênio é um elemento importante no processo de fotossíntese e portanto, na formação de biomassa.

4.4 Modelos de Regressão Linear Simples e suas Validações

Conforme já mencionado, foram determinados modelos para os casos em que o coeficiente de correlação foi $r >= 0{,}5000$. A Tabela 4.8 apresenta os modelos de regressão linear simples determinados para cada uma das relações consideradas. Para gerar os modelos, as amostras que seriam utilizadas para a sua futura validação não foram incluídas. No Apêndice B encontram-se os gráficos desses modelos.

TABELA 4.8 – MODELOS DE REGRESSÃO LINEAR SIMPLES IDENTIFICANDO A RELAÇÃO BANDA ESPECTRAL, CONCENTRAÇÃO QUÍMICA E O VALOR DE R^2

ESPÉCIE	CONC. QUÍMICAS	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4
CC	CLOROFILA				
	CARBONO	y = 56,163x + 45,408 R^2 = 0,076	y = 66,456x + 44,082 R^2 = 0,2139	y = 108,92x + 43,421 R^2 = 0,1656	
	HIDROGÊNIO	y = 20,17x + 5,9629 R^2 = 0,4324		y = 27,313x + 5,7045 R^2 = 0,4595	y = 1,8557x + 6,1309 R^2 = 0,2367
	NITROGÊNIO				
CO	CONC. QUÍMICAS	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4
	CLOROFILA				y = 22,189x + 1,3925 R^2 = 0,4766
	CARBONO	y = 251,05x + 37,009 R^2 = 0,3975	y = 151,13x + 38,655 R^2 = 0,4324		y = 19,551x + 41,59 R^2 = 0,3543
	HIDROGÊNIO				
	NITROGÊNIO				
CP	CONC. QUÍMICAS	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4
	CLOROFILA				
	CARBONO				
	HIDROGÊNIO				y = -11,724x + 9,4782 R^2 = 0,3102
	NITROGÊNIO				y = -4,9021x + 3,5621 R^2 = 0,1124
CT	CONC. QUÍMICAS	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4
	CLOROFILA				
	CARBONO				
	HIDROGÊNIO				y = -4,4621x + 8,0249 R^2 = 0,3457
	NITROGÊNIO				
HC	CONC. QUÍMICAS	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4
	CLOROFILA		y = -93,982x + 12,715 R^2 = 0,2056		y = 61,4x – 12,951 R^2 = 0,2453
	CARBONO				y = 30,873x + 43,07 R^2 = 0,4886
	HIDROGÊNIO				
	NITROGÊNIO				

(continua)

Tabela 4.8 - Conclusão

PH	**CONC. QUÍMICAS**	**BANDA 1**	**BANDA 2**	**BANDA 3**	**BANDA 4**
	CLOROFILA				y = -25,115x + 14,361 R2 = 0,319
	CARBONO				
	HIDROGÊNIO	y = -42,3x + 8,687 R^2 = 0,3183	y = -17,002x + 7,941 R^2 = 0,1932	y = -44,149x + 8,6533 R^2 = 0,2518	y = -5,5474x + 8,8487 R^2=0,5274
	NITROGÊNIO				
PS	**CONC. QUÍMICAS**	**BANDA 1**	**BANDA 2**	**BANDA 3**	**BANDA 4**
	CLOROFILA	y = 183,9x - 2,2423 R^2 = 0,2714			y = 15,944x + 0,5365 R^2 = 0,1656
	CARBONO				
	HIDROGÊNIO				y = -2,7673x + 7,2646 R^2 = 0,388
	NITROGÊNIO				
TB	**CONC. QUÍMICAS**	**BANDA 1**	**BANDA 2**	**BANDA 3**	**BANDA 4**
	CLOROFILA				
	CARBONO		y = 132,71x + 38,793 R^2 = 0,3154	y = 392,79x + 30,104 R^2 = 0,5806	y = 62,963x + 25,007 R^2 = 0,5993
	HIDROGÊNIO				
	NITROGÊNIO				
ZC	**CONC. QUÍMICAS**	**BANDA 1**	**BANDA 2**	**BANDA 3**	**BANDA 4**
	CLOROFILA		y = -115,76x + 12,368 R^2 = 0,6906		
	CARBONO				y = 14,517x + 45,427 R^2 = 0,687
	HIDROGÊNIO				
	NITROGÊNIO	y = -99,331x + 8,7763 R^2= 0,621	y = -55,702x + 7,8909 R^2 = 0,7957	y = -128,91x + 9,6058 R^2 = 0,4349	
MC	**CONC. QUÍMICAS**	**BANDA 1**	**BANDA 2**	**BANDA 3**	**BANDA 4**
	CLOROFILA	y = -484,36x + 27,517 R^2 = 0,5527	y = -193,34x + 17,419 R^2 = 0,2867	y= -431,24x + 24,687 R^2 = 0,8376	y = 49,852x – 12,059 R^2 = 0,7906
	CARBONO	y = 496,56x + 26,529 R^2 = 0,1774		y = 643,93x + 20,53 R^2 = 0,7067	y = -55,44x + 68,177 R^2 = 0,8221
	HIDROGÊNIO				
	NITROGÊNIO			y = -60,54x + 5,0986 R^2 = 0,5054	y = 4,5483x + 0,8503 R^2 = 0,4476

Uma vez definidos os modelos constantes na Tabela 4.8, seguiu-se à validação dos mesmos, valendo-se então de dados que foram previamente desconsiderados e

selecionados ao acaso especialmente para o atendimento desta finalidade. Para cada uma das relações descritas pelos modelos, foram então calculadas as concentrações dos elementos químicos, mediante a utilização dos valores de FRDH médios (por banda espectral específica e espécie) efetivamente medidos nas amostras selecionadas, e que tiveram também determinadas as concentrações dos elementos químicos. Assim, para cada modelo, tornaram-se disponíveis os valores de concentrações específicas, sendo uma série calculada através do modelo e outra série medida efetivamente em laboratório. Estas duas séries foram então comparadas estatisticamente, conforme mencionado em 3.9.1.

Os resultados referentes à aplicação do teste de igualdade de variância entre as duas séries de dados mencionadas encontram-se no Apêndice C.

Para as relações nas quais os resultados foram significativos, foi necessário aplicar um teste não-paramétrico. Para as demais espécies, onde foram obtidos resultados de igualdade de variância não significativos, foram aplicados testes de ANOVA com α= 0,05, cujo resultados encontram-se no Apêndice D.

Pode-se observar através dos resultados apresentados no Apêndice D, que a maioria das espécies analisadas apresentaram resultados não significativos, indicando que os valores de concentração química calculados através dos modelos de regressão linear foram estatisticamente similares aos valores de concentração obtidos em laboratório (valor real). A exceção só foi feita para a espécie ZC na banda 4 para a relação com o carbono, onde o resultado obtido pela aplicação da ANOVA foi significativo, indicando diferença entre o valor calculado e o estimado pelo modelo.

Para as espécies que apresentaram resultados significativos de igualdade de variância foi aplicado um teste não-paramétrico, com α=0,05, conhecido como o Teste de Wilcoxon. Os resultados referentes a este teste encontram-se no Apêndice E. Pode-se notar que para todas as espécies, o resultado do teste não-paramétrico não foi significativo indicando, também neste caso, que os valores de concentração obtidos pelos modelos foram estatisticamente similares aos valores medidos em laboratório.

Para as espécies que apresentaram resultados significativos de igualdade de variância,

foi aplicado um teste não-paramétrico, com α=0,05, conhecido como o Teste de Wilcoxon. Os resultados referentes a este teste encontram-se no Apêndice E. Pode-se notar que para todas as espécies, o resultado do teste não-paramétrico não foi significativo indicando, também neste caso, que os valores de concentração obtidos pelos modelos foram estatisticamente similares aos valores medidos em laboratório.

Para as relações nas quais os testes de validação foram não significativos, entende-se que seriam possíveis suas utilizações na estimativa das concentrações de elementos químicos específicos, mediante a disponibilidade dos valores de FRDH. Assim, imaginando uma situação na qual pretende-se avaliar a ocorrência de influência de poluentes atmosféricos sobre uma dada cobertura vegetal, que se desenvolve em uma região que constitui habitat das mesmas espécies consideradas neste trabalho, mediante o uso de dados radiométricos, bastaria:

- selecionar uma ou mais espécies para as quais foram estabelecidos modelos validados;
- realizar medidas radiométricas segundo os mesmos procedimentos descritos;
- comparar as concentrações estimadas por estes modelos com aquelas apresentadas na Tabela 4.5.

Se estes valores estiverem mais próximos daqueles determinados para as áreas afetadas pelos poluentes atmosféricos, haverá alguma chance de que as folhas medidas radiometricamente provirão de áreas cujos ambientes apresentam as mesmas características daqueles afetados. Caso contrário, ou seja, apresentarem valores de concentrações mais próximos daqueles determinados no Vale do Rio Pilões, estas folhas poderão provir de áreas não afetadas.

4.5 Análise de Variância e Teste de Tukey Considerando a Resolução Espectral Plena

Foram utilizados os dados referentes à espécie PS, uma vez que esta apresentou diferenças significativas entre os valores de FRDH das três áreas de estudo (tabela 4.5), quando da análise das diferenças entre os valores de FRDH provenientes das diferentes

áreas (nas quatro bandas espectrais).

Os resultados da aplicação das ANOVAs foram todos significativos ao longo de toda a faixa espectral considerada. Assim, seguiu-se à aplicação do Teste de Tukey, conforme descrito em 3.10. Os resultados encontram-se apresentados na Tabela 4.9.

TABELA 4.9 - DIFERENÇAS DE MÉDIAS DO FATOR DE REFLECTÂNCIA EM ORDEM DECRESCENTE, OBTIDAS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DO TESTE DE TUKEY PARA OS COMPRIMENTOS DE ONDA DE 0,402 A 0,801 mm NA ESPÉCIE PS.

Comprimento de onda (mm)			
0,402	0,0422 a	0,0390 b	0,0331 c
0,404	0,0420 a	0,0388 b	0,0330 c
0,407	0,0416 a	0,0385 b	0,0329 c
0,409	0,0415 a	0,0385 b	0,0328 c
0,412	0,0412 a	0,0383 b	0,0327 c
0,415	0,0409 a	0,0382 b	0,0326 c
0,417	0,0406 a	0,0379 b	0,0325 c
0,420	0,0406 a	0,0378 b	0,0326 c
0,422	0,0406 a	0,0377 b	0,0326 c
0,425	0,0407 a	0,0376 b	0,0327 c
0,428	0,0406 a	0,0376 b	0,0326 c
0,430	0,0406 a	0,0376 b	0,0326 c
0,433	0,0405 a	0,0375 b	0,0326 c
0,435	0,0405 a	0,0375 b	0,0326 c
0,438	0,0405 a	0,0373 b	0,0326 c
0,441	0,0405 a	0,0373 b	0,0326 c
0,444	0,0404 a	0,0373 b	0,0327 c
0,447	0,0404 a	0,0372 b	0,0327 c
0,449	0,0404 a	0,0372 b	0,0326 c
0,452	0,0404 a	0,0372 b	0,0326 c
0,455	0,0404 a	0,0372 b	0,0327 c
0,458	0,0404 a	0,0371 b	0,0327 c
0,460	0,0405 a	0,0371 b	0,0328 c
0,463	0,0407 a	0,0371 b	0,0328 c
0,466	0,0408 a	0,0372 b	0,0330 c
0,469	0,0410 a	0,0372 b	0,0331 c
0,472	0,0414 a	0,0374 b	0,0334 c
0,474	0,0418 a	0,0376 b	0,0337 c
0,477	0,0424 a	0,0379 b	0,0341 c
0,480	0,0431 a	0,0384 b	0,0346 c
0,483	0,0440 a	0,0389 b	0,0352 c
0,486	0,0452 a	0,0397 b	0,0361 c
0,488	0,0468 a	0,0406 b	0,0371 c
0,491	0,0486 a	0,0418 b	0,0384 c
0,494	0,0510 a	0,0434 b	0,0401 c
0,497	0,0538 a	0,0453 b	0,0420 c
0,500	0,0571 a	0,0476 b	0,0443 c
0,502	0,0606 a	0,0503 b	0,0469 c
0,505	0,0642 a	0,0531 b	0,0496 c
0,508	0,0678 a	0,0559 b	0,0522 c
0,511	0,0711 a	0,0585 b	0,0548 c
0,514	0,0739 a	0,0609 b	0,0571 c
0,516	0,0762 a	0,0629 b	0,0590 c
0,519	0,0781 a	0,0645 b	0,0606 c
0,522	0,0796 a	0,0657 b	0,0618 c
0,525	0,0806 a	0,0667 b	0,0628 c
0,527	0,0814 a	0,0673 b	0,0635 c
0,530	0,0820 a	0,0678 b	0,0640 c

Comprimento de onda (mm)			
0,533	0,0824 a	0,0681 b	0,0644 c
0,536	0,0827 a	0,0683 b	0,0647 c
0,539	0,0826 a	0,0683 b	0,0647 c
0,541	0,0822 a	0,0680 b	0,0645 c
0,544	0,0814 a	0,0673 b	0,0641 c
0,547	0,0802 a	0,0663 b	0,0633 c
0,550	0,0785 a	0,0649 b	0,0621 c
0,553	0,0766 a	0,0632 b	0,0607 c
0,556	0,0744 a	0,0614 b	0,0591 c
0,559	0,0722 a	0,0594 b	0,0574 c
0,561	0,0700 a	0,0575 b	0,0557 b
0,564	0,0679 a	0,0557 b	0,0541 b
0,567	0,0661 a	0,0541 b	0,0527 b
0,570	0,0645 a	0,0527 b	0,0514 b
0,573	0,0631 a	0,0515 b	0,0503 b
0,576	0,0619 a	0,0506 b	0,0494 b
0,579	0,0610 a	0,0497 b	0,0486 b
0,582	0,0601 a	0,0490 b	0,0479 b
0,585	0,0594 a	0,0485 b	0,0473 b
0,587	0,0588 a	0,0480 b	0,0468 b
0,590	0,0582 a	0,0475 b	0,0463 b
0,593	0,0577 a	0,0471 b	0,0459 b
0,596	0,0571 a	0,0466 b	0,0455 b
0,599	0,0565 a	0,0462 b	0,0450 b
0,602	0,0559 a	0,0456 b	0,0445 b
0,605	0,0552 a	0,0451 b	0,0440 b
0,608	0,0545 a	0,0445 b	0,0434 b
0,611	0,0539 a	0,0440 b	0,0429 b
0,614	0,0534 a	0,0436 b	0,0424 b
0,617	0,0530 a	0,0432 b	0,0420 b
0,620	0,0526 a	0,0430 b	0,0418 c
0,623	0,0523 a	0,0427 b	0,0415 c
0,626	0,0520 a	0,0425 b	0,0413 c
0,629	0,0515 a	0,0423 b	0,0410 c
0,632	0,0509 a	0,0419 b	0,0406 c
0,634	0,0501 a	0,0415 b	0,0400 c
0,637	0,0493 a	0,0411 b	0,0394 c
0,640	0,0484 a	0,0406 b	0,0387 c
0,643	0,0477 a	0,0401 b	0,0381 c
0,646	0,0471 a	0,0398 b	0,0375 c
0,649	0,0467 a	0,0396 b	0,0371 c
0,652	0,0464 a	0,0394 b	0,0368 c
0,655	0,0464 a	0,0394 b	0,0367 c
0,658	0,0464 a	0,0395 b	0,0366 c
0,661	0,0466 a	0,0396 b	0,0366 c
0,664	0,0470 a	0,0399 b	0,0367 c
0,667	0,0476 a	0,0403 b	0,0370 c
0,670	0,0486 a	0,0410 b	0,0375 c

(continua)

TABELA 4.9 - Conclusão

Comprimento de onda (mm)				Comprimento de onda (mm)			
0,673	0,0500 a	0,0419 b	0,0383 c	0,738	0,2975 a	0,2797 a	0,2377 b
0,676	0,0518 a	0,0431 b	0,0394 c	0,741	0,3087 a	0,2938 a	0,2480 b
0,679	0,0539 a	0,0445 b	0,0408 c	0,744	0,3182 a	0,3062 a	0,2570 b
0,681	0,0566 a	0,0461 b	0,0425 c	0,747	0,3262 a	0,3168 a	0,2646 b
0,684	0,0597 a	0,0480 b	0,0446 c	0,750	0,3325 a	0,3255 a	0,2710 b
0,687	0,0635 a	0,0502 b	0,0473 c	0,753	0,3373 a	0,3327 a	0,2760 b
0,690	0,0684 a	0,0531 b	0,0506 c	0,756	0,3409 a	0,3382 a	0,2799 b
0,693	0,0749 a	0,0571 b	0,0550 c	0,759	0,3433 a	0,3424 a	0,2828 b
0,696	0,0832 a	0,0625 b	0,0609 b	0,762	0,3454 a	0,3450 a	0,2849 b
0,699	0,0937 a	0,0699 b	0,0684 b	0,765	0,3475 a	0,3458 a	0,2862 b
0,702	0,1062 a	0,0794 b	0,0776 b	0,768	0,3488 a	0,3461 a	0,2871 b
0,705	0,1205 a	0,0911 b	0,0883 c	0,771	0,3496 a	0,3461 a	0,2876 b
0,708	0,1361 a	0,1047 b	0,1003 c	0,774	0,3501 a	0,3459 a	0,2878 b
0,711	0,1526 a	0,1199 b	0,1133 c	0,777	0,3502 a	0,3456 a	0,2879 b
0,714	0,1698 a	0,1365 b	0,1272 c	0,780	0,3501 a	0,3452 a	0,2878 b
0,717	0,1872 a	0,1542 b	0,1416 c	0,783	0,3499 a	0,3447 a	0,2878 b
0,720	0,2048 a	0,1726 b	0,1564 c	0,786	0,3496 a	0,3442 a	0,2876 b
0,723	0,2221 a	0,1914 b	0,1712 c	0,789	0,3494 a	0,3438 a	0,2875 b
0,726	0,2391 a	0,2103 b	0,1858 c	0,792	0,3493 a	0,3436 a	0,2875 b
0,729	0,2554 a	0,2290 b	0,2000 c	0,795	0,3492 a	0,3435 a	0,2875 b
0,732	0,2708 a	0,2470 b	0,2135 c	0,798	0,3491 a	0,3434 a	0,2875 b
0,735	0,2849 a	0,2640 b	0,2261 c	0,801	0,3490 a	0,3434 a	0,2876 b

Azul – corresponde às médias referentes à região do Caminho do Mar;

Vermelho - corresponde às médias referentes à região do Vale do Rio Mogi;

Verde - corresponde às médias referentes à região do Vale do Rio Pilões.

Comparando os resultados apresentados na Tabela 4.9 com aqueles da Tabela 4.5 pode-se verificar que a adoção de bandas mais largas nas análises estatísticas não comprometem os resultados alcançados, ou seja, os resultados se repetem ao longo de toda a faixa espectral. Estes resultados corroboraram com aqueles encontrados por Ponzoni e Gonçalves (1999).

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Pelos resultados alcançados neste trabalho, a hipótese formulada não foi estatisticamente comprovada. Isto foi constatado devido ao fato de não se obter uma tendência marcante entre as diferenças das concentrações dos elementos químicos mencionados entre as folhas provenientes das três áreas em questão, e por estas diferenças não terem apresentado influência igualmente marcante sobre os respectivos valores de FRDH.

Não foram encontradas também diferenças nos resultados entre as espécies sensíveis e tolerantes que justificassem sua individualização, tanto no que se refere à abordagem meramente espectral, quanto à química.

Os valores de FRDH referentes a região do visível, mesmo considerando espécies diferentes, apresentaram alguma tendência um pouco mais marcante na área do Vale do Rio Pilões, apresentando uma maior freqüência de valores significativamente superiores aos oriundos das demais áreas. Essa tendência parece estar mais associada às questões ambientais que diferem nas três áreas, considerando que o Vale do Rio Pilões apresenta topografia e condições de cobertura do solo completamente diferentes que em Caminho do Mar e Vale do Rio Mogi. A iluminação parece ser o fator ambiental com maior influência, mas este não explica por si só as diferenças nas composições químicas das folhas, e sim estados fisiológicos distintos que podem explicar melhor a tendência mencionada nos valores de FRDH.

Para a região do infravermelho próximo, considerando ser mais influenciada pela estrutura interna da folha, as tendências nos valores de FRDH devem sempre ser analisados levando em consideração as características morfológicas de cada espécie, não cabendo portanto as generalizações. Os valores de FRDH referentes à banda 4 apresentaram correlações mais altas com carbono, hidrogênio e nitrogênio em relação às outras bandas, indicando que esses elementos explicariam a constituição estrutural das folhas. Isso não aconteceu para todas as espécies, o que reforça a conclusão referente à particularidade de cada espécie estudada.

Através dos modelos aqui estabelecidos, considera-se que seria possível estimar as concentrações de alguns elementos químicos a partir de medidas de FRDH especificamente para algumas espécies aqui consideradas e que se desenvolvem na região de Cubatão-SP, apesar dos valores de R^2 serem relativamente baixos para modelos de previsão. Contudo, a associação dos valores encontrados com a intensidade da ação de poluentes atmosféricos é difícil devido à ausência de uma tendência marcante nos resultados. Nesse sentido, entende-se que os resultados da aplicação dos modelos estabelecidos podem ser considerados em trabalhos expeditos de avaliação da possível influência de poluentes atmosféricos na cobertura vegetal que se desenvolve na região de Cubatão SP, uma vez que está se avaliando principalmente as condições ambientais das quais as folhas analisadas estariam provindo. Estas condições ambientais é que, em última análise, estariam sendo influenciadas pelos poluentes.

Pesquisas futuras podem ainda incluir novos processamentos de dados disponibilizados neste trabalho, como por exemplo aqueles conduzidos por Wessman et al. (1989) que aplicaram técnicas derivativas sobre os dados espectrais coletados, cujos resultados foram correlacionados às concentrações de lignina.

Diferenças entre curvas espectrais provenientes de folhas que se desenvolvem em áreas afetadas por poluentes atmosféricos poderão também ser determinadas para identificar regiões espectrais específicas que poderiam apresentar maiores correlações com as concentrações dos elementos químicos aqui considerados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Assunção, G. V. et al. **O sensoriamento remoto na agricultura**. São José dos Campos: INPE, 1989. 217 p. (INPE-4806-MD/39).

Azevedo, C. M. A; Diniz, K.M.; Fialho, R.C.; Pradella, D.Z.A.; Pompéia, S.L.; Pelaes, K.B. **Resultados preliminares do diagnóstico da contaminação de espécies vegetais da Mata Atlântica, Cubatão –SP, por poluição atmosférica.** São Paulo. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), 1995. 67 p. Relatório.

Campos, H. **Estatística experimental não paramétrica**. Piracicaba: Escola superior de agricultura "Luíz de Queiroz", 1983. p. 201-226.

Carter, G. A. Responses of leaf spectral reflectance to plant stress. **American Journal of Botany**, v. 80, n. 3, p. 239-243, 1993.

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB). **Degradação da cobertura vegetal da Serra do Mar em Cubatão**: avaliação preliminar. São Paulo, 1991. 104 p.

Softrent **Cubatão – histórico – aspectos da cidade**. [online]. http://www.cubatao.sp.gov.br/hsaspc.html. mar. 1999

Danelon, O. M. **Influência antropogênica na hidroquímica da bacia do Rio Quilombo**. Piracicaba. 77 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1988.

Danson, F. M.; Steven, M. D.; Malthus, T. J.; Clark, J. A. High – spectral resolution data for determining leaf water content. **International Journal of Remote Sensing**, v. 13, n. 3, p. 461-470, Feb. 1992.

Daughtry, C. S. T.; Biehl, L. L. **Changes in spectral properties of detached leaves**. West Lafayette: Laboratory for Applications of Remote Sensing, 1984. 21 p. (LARS Technical Report, 061574).

DeLucia, E.H.; Nelson K.; Vogelmann, T.C.; Smith, W.K. Contribution of intercellular reflectance to photosynthesis in shade leaves. **Plant, Cell and Environment**, v. 19, n. 2, p.159-170, Feb.1996.

Diniz, K. M. et al. **Avaliação de efeitos de poluentes atmosféricos sobre a vegetação em áreas críticas do estado de São Paulo – monitoramento dos bosques experimentais na Serra do Mar em Cubatão.** São Paulo. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), 1997. 10 p. Relatório.

Diniz, K. M.; Barros, R. M. C.; Marquez, U. M. L. **Composição e concentração de aminoácidos livres em espécies vegetais da Mata Atlântica envasadas em áreas experimentais em Cubatão-SP. Relação com a tolerância à poluição atmosférica biomonitoramento ativo.** São Paulo.Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), 1996. 12 p. Relatório.

Disperati, A. A. O uso do sensoriamento remoto no estudo de pragas florestais. **Floresta** v. 21, n. 1/2, p. 13-25, 1991.

Esau, K. A folha: variações da estrutura. **Anatomia das plantas com sementes**. São Paulo: Edgard Blücher, 1974. p. 216-230.

Fialho, R. C. **Acumulação foliar de fluoretos e seu significado ecológico em espécies arbóreas da Mata Atlântica, Cubatão, SP**. São Paulo. 100 p. Dissertação (Mestrado em ecologia) – Universidade de São Paulo, 1997.

Gates, D. M.; Keegan, H. J.; Scheleter, J. C.; Wedner, V. R. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, v. 4, n. 1, p. 11-20, Jan. 1965.

Gausman, H. W. Leaf reflectance on near-infrared. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 40, n. 2, p. 183-191, Jan. 1974.

Gausman, H. W.; Allen, W. A.; Myers, V. I.; Cardenas, R. Reflectance and internal structure of cotton leaves, *Gossypium hirsutum* L. **Agronomy Journal**, v. 61, n. 3, p. 374-376, 1969.

Gomes, F.P. **Curso de estatística experimental**. Piracicaba: Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1978. 430 p.

Guyot, G. Optical properties of vegetation canopies. In: Steven, M.D.; Clark, J. A. ed., **Applications of remote sensing in agriculture**. London: Butterworths, p. 19-42, 1990.

Guyot, G.; Guyon, D.; Riom, J. Factors affecting the spectral response of forest canopies: a review. **Geocarto International**, v. 4, n. 3, p. 3-18, Sept. 1989.

Hindawi, I. J. **Air pollution injury to vegetation**. North Carolina: Environmental Health Service, 1970. 44 p.

Hopkins, W. G. **Introduction to plant physiology**. New York: John Wiley, 1995. 464p.

Klumpp, A.; Klumpp, G.; Domingos, M. Plants as bioindicators of air pollution at the serra do mar near the industrial complex of Cubatão, Brazil. **Environmental Pollution**, v. 79, n. 2, p. 109-116, 1993.

Knapp, A. K; Carter, G. A. Variability in leaf optical properties among 26 species from a broad range of habitats. **American Journal of Botany**, v. 85, n. 7, p. 940-946, 1998.

Kumar, R. **Radation from plants-reflection and emission**: a review. Lafayette. Purdue Research Foundation, 1974. 88 p. (Research Project nº:5543).

LaCapra, V.C., Melack, J., Gastil, M., Valeriano, D. Remote sensing of foliar chemistry of inundated rice with imaging spectrometry. **Remote Sensing Environmet**, v. 55**,** n. 1, p. 50-58, 1996.

Malavolta, E.; Vitti, G.C.; De Oliveira, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989. 201 p.

Martins, S. E.; Pompéia, S.L.; Mendonça, R.R.; Aguiar, O.T.; Pastore, J.A.; Franco, G.A.D.C. **Composição florística e estrutura da Mata Atlântica efetuada pela poluição em Cubatão-SP.** São Paulo. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), 1996. 61 p. Relatório.

Mendonça, R. R.; Paulics, J. P. J. **Monitoramento do desenvolvimento das espécies vegetais da Mata Atlântica introduzidas em três bosques experimentais no Vale do Moji, Caminho do Mar e Vale dos Pilões**. São Paulo. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), 1996. 99 p. Relatório.

Meurer, E. J.; Wang, G. M.; Wang, S. R. Função dos nutrientes e sintomas de deficiências. In: Miyasaka, S.; Medina, J. C. **A soja no Brasil**. Campinas: ITAL, 1981. p. 156-167.

Meyers, V. I. Crops and soils. In: Cowel, R. N. ed. **Manual of remote sensing**. 2. ed. Falls Church: ASP, 1983. v. 2, Cap. 30, p. 1715-1813.

Mirshawka, V. **Probabilidade e estatística para engenharia**. São Paulo: Livraria Nobel, 1983. 525 p..

Moreira, M. A. **Déficit hídrico na cultura do trigo e o impacto na resposta espectral e em parâmetros agronômicos**. Piracicaba. 142 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1997.

Moreira-Nordemann, L.M. A geoquímica e o meio ambiente. **Geoquímica Brasiliensis**. v. 1, n. 1, p. 89-107, 1987.

Neter, J.; Wasserman, W. **Applied linear statistical models: regression, analysis of variance, and experimental designs**. Homewood: Richard D. Irwin, 1974. 842 p.

Novo, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 1989. 308 p.

Peñuelas, J.; Gamon, J. A.; Fredeen, A. L.; Merino, J.; Field, C. B. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen-and water-limited sunflower leaves. **Remote Sensing Environment**, v. 48, n. 2, p. 135-146, May 1994.

Perazza, M. C. D.; Cipriano A. **Poluicao atmosferica e seus efeitos sobre as plantas: uma revisão**. São Paulo. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), 1985. 130 p. Relatório.

Pompéia, S. L. **Sucessão secundária da Mata Atlântica em áreas afetadas pela poluição atmosférica Cubatão, SP.** São Paulo. 193 p. Tese (Doutorado em Botânica) – Universidade de São Paulo, 1997.

Pompéia, S. L. **Recuperação da biodiversidade da Mata Atlântica em Cubatão**. São Paulo Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), 1992. 21 p. Relatário.

Ponzoni, F. J.; Gonçalves, J. L. M. Spectral features associated with nitrogen, phosphorus and potassium deficiencies in *Eucalyptus saligna* seedling leaves. **International Journal of Remote Sensing**, v. 20, n. 11, p. 2249-2264, 1999.

Ponzoni, F. J.; Gonçalves, J. L. M. **Caracterização espectral de sintomas relacionados às deficiências de Nitrogênio (N), Fósforo (P) e de Potássio (K) em mudas de *Eucalipyptus saligna***. São José dos Campos: INPE, 1997. 48 p. (INPE – 6136-PRP/199).

Ponzoni, F. J.; Disperati, A. A. **Comportamento espectral da vegetação**. São José dos Campos: INPE, 1995. 37 p. (INPE-5619-PUD/065).

Pradella, D. Z. A.; Pompéia, S. L., Fialho, R. C., Moraes, J. A. P. V., Prado, C. H. B. de A., Casele, C. A. **Trocas gasosas de espécies representativas da Mata Atlântica em Cubatão**. São Paulo. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), 1999. 75 p. Relatório.

Pradella, D. Z. A.; Lopes, M. R.; Souza, J. B. **Análise química foliar do teor de fluoreto, macro e micro nutrientes em espécies vegetais da Serra do Mar, envasadas em áreas experimentais Cubatão-SP- Biomonitoramento ativo**. São Paulo. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), 1996. 45 p. Relatório.

Raper, Jr. C. D.; Kramer, P. J**.** Stress physiology. In: Hale, M. G.; Orcutt, D. M.; Thompson, L. K. **The physiology of plants under stress.** 2. ed. Madison: John Wiley & Sons: 1987, Cap. 15, p. 589-641.

Salisbury, F. B.; Ross, C. **Plant physiology**. Belmont: Wadsworth Publishing, 1969. Cap. 13: Photosynthesis. p. 258-276.

Siegel, S. **Estatística não-paramétrica: para as ciências do comportamento**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 350 p.

Silva Filho, N. L. **Recomposição da cobertura vegetal de um trecho degradado da serra do mar, Cubatão, SP**. Campinas: Fundação Gargill, 1988. 53 p.

Singh, S. K.; Rao, D. N.; Agrawal, M.; Pandey, J.; Narayan, D. Air pollution tolerance index of plants. **Journal of Environmental Management**, v. 32, n. 1, p. 45-55, Jan. 1991.

Sousa, C. L.; Ribeiro, M. C.; Ponzoni, F. J. Influência do tempo e do tipo de armazenamento na reflectância espectral de folhas de *Eucalyptus grandis* "Ex-Situ". **Revista Árvore**, v. 20, n. 2, p. 255-265, Jun. 1996.

Tommervik, H.; Johansen, B. E.; Pedersen, J. P. Monitoring the effects of air pollution on terrestrial ecosystems in Varanger (Norway) and Nikel-Pchenga (Russia) using remote sensing. S**cience of the Total Environment**. v. 219, n. 1, p. 87-88, Aug. 1998.

Valeriano, D. M.; Ponzoni, F. J. **A fotointerpretação como instrumento para avaliação de impacto ambiental – a Mata Atlântica em Cubatão**. São José dos Campos: INPE, 1989. 17 p. (INPE-4910-PRE/1511).

Vernon, L.P. Spectrophotometric determination of chlorophylls and pheophytins in plant extracts. **Analytical Chemistry**, v. 32, n. 9, p. 1144-1150, 1960.

Wessman, C.A., Aber, J.D., Peterson, D.L. An evaluation of imaging spectrometry for estimating forest canopy chemistry. **International Journal of Remote Sensing**, v. 10, n. 8, p. 1293-1316, 1989.

Yoder, B. J.; Pettigrew-Cosby, R. E. Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra (400-2500 nm) at leaf and canopy scales. **Remote Sensing Environment**, v. 53, n. 3, p. 199-211, Sept. 1995.

Zar, J. H. **Biostatistical analysis**. London: Prentice-Hall, 1974. 620 p.

APÊNDICE A

ANÁLISES DE VARIÂNCIA (ANOVAS) PARA FRDH E CONCENTRAÇÕES QUÍMICAS

TABELA A.1 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À BANDA 1, ESPÉCIE CC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,000279	2	0,0001393	13,25841	0,000043	3,244821
Dentro dos grupos	0,000399	38	0,000011			
Total	0,000678	40				

TABELA A.2 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À BANDA 1, ESPÉCIE CO

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,000415	2	0,000207	48,34042	0,000000	3,178798
Dentro dos grupos	0,000219	51	0,000004			
Total	0,000633	53				

TABELA A.3 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À BANDA 1, ESPÉCIE CP

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,000060	2	0,000030	13,27799	0,000088	3,340389
Dentro dos grupos	0,000064	28	0,000002			
Total	0,000124	30				

TABELA A.4 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À BANDA 1, ESPÉCIE CT

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,000282	2	0,000141	17,17635	0,000002	3,190721
Dentro dos grupos	0,000395	48	0,000008			
Total	0,000677	50				

TABELA A.5 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À BANDA 1, ESPÉCIE MC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,000047	1	0,000047	16,02305	0,00028	4,098169
Dentro dos grupos	0,000112	38	0,000003			
Total	0,000159	39				

TABELA A.6 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À BANDA 1, ESPÉCIE PH

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,000153	2	0,000076	10,0051	0,000271	3,214481
Dentro dos grupos	0,000329	43	0,000008			
Total	0,000482	45				

TABELA A.7 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À BANDA 1, ESPÉCIE ZC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,000198	2	0,000099	14,48077	0,000031	3,284924
Dentro dos grupos	0,000225	33	0,000007			
Total	0,000423	35				

TABELA A.8 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À BANDA 2, ESPÉCIE CC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,000618	2	0,000309	10,99503	0,000171	3,244821
Dentro dos grupos	0,001067	38	0,000028			
Total	0,001685	40				

TABELA A.9 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À BANDA 2, ESPÉCIE CO

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,001302	2	0,000651	71,7437	0,000000	3,178798
Dentro dos grupos	0,000463	51	0,000009			
Total	0,001764	53				

TABELA A.10 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À BANDA 2, ESPÉCIE CP

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,000267	2	0,000134	18,956171	0,000008	3,36901
Dentro dos grupos	0,000183	26	0,000007			
Total	0,00045	28				

TABELA A.11 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À BANDA 2, ESPÉCIE CT

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,000335	2	0,000168	4,485994	0,016365	3,190721
Dentro dos grupos	0,001793	48	0,000037			
Total	0,002128	50				

TABELA A.12 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À BANDA 2, ESPÉCIE MC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,000024	1	0,000024	1,710091	0,19883	4,098169
Dentro dos grupos	0,000531	38	0,000014			
Total	0,000555	39				

TABELA A.13 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À BANDA 2, ESPÉCIE PS

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,001044	2	0,000522	82,33707	0,000000	3,186585
Dentro dos grupos	0,000311	49	0,00001			
Total	0,001355	51				

TABELA A.14 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À BANDA 2, ESPÉCIE TB

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,000888	2	0,000444	27,88591	0,000000	3,164999
Dentro dos grupos	0,000876	55	0,000016			
Total	0,001764	57				

TABELA A.15 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À BANDA 3, ESPÉCIE CO

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,000367	2	0,000184	52,59935	0,000000	3,178798
Dentro dos grupos	0,000178	51	0,000003			
Total	0,000545	53				

TABELA A.16 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À BANDA 3, ESPÉCIE CP

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,000043	2	0,000022	11,06525	0,000288	3,340389
Dentro dos grupos	0,000055	28	0,000002			
Total	0,000098	30				

TABELA A.17 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À BANDA 3, ESPÉCIE CT

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,000359	2	0,000179	28,61409	0,000000	3,190721
Dentro dos grupos	0,000301	48	0,000006			
Total	0,000659	50				

TABELA A.18 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À BANDA 3, ESPÉCIE PH

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,000146	2	0,000073	14,34938	0,000017	3,214481
Dentro dos grupos	0,000219	43	0,000005			
Total	0,000365	45				

TABELA A.19 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À BANDA 3, ESPÉCIE TB

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,000292	2	0,000146	93,37827	0,000000	3,164999
Dentro dos grupos	0,000086	55	0,000002			
Total	0,000378	57				

TABELA A.20 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À BANDA 3, ESPÉCIE ZC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,000123	2	0,000061	27,8623	0,000000	3,284924
Dentro dos grupos	0,000073	33	0,000002			
Total	0,000195	35				

TABELA A.21 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À BANDA 4, ESPÉCIE CC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,011998	2	0,005999	9,177991	0,00056	3,244821
Dentro dos grupos	0,024837	38	0,000654			
Total	0,036835	40				

TABELA A.22 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À BANDA 4, ESPÉCIE CP

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,001180	2	0,00059	6,297838	0,005514	3,340389
Dentro dos grupos	0,002623	28	0,000094			
Total	0,003803	30				

TABELA A.23 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À BANDA 4, ESPÉCIE CT

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,032190	2	0,016095	18,82697	0,000001	3,190721
Dentro dos grupos	0,041035	48	0,000855			
Total	0,073225	50				

TABELA A.24 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À BANDA 4, ESPÉCIE HC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,004597	2	0,002298	14,86737	0,000015	3,231733
Dentro dos grupos	0,006184	40	0,000155			
Total	0,010781	42				

TABELA A.25 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À BANDA 4, ESPÉCIE PH

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,027597	2	0,013798	20,17013	0,000001	3,214481
Dentro dos grupos	0,029416	43	0,000684			
Total	0,057013	45				

TABELA A.26 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À BANDA 4, ESPÉCIE ZC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,039909	2	0,019954	64,311886	0,000000	3,284924
Dentro dos grupos	0,010239	33	0,000310			
Total	0,050148	35				

TABELA A.27 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA, ESPÉCIE MC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	38,14322	1	38,14322	96,74091	0,000000	4,413863
Dentro dos grupos	7,09708	18	0,394282			
Total	45,2403	19				

TABELA A.28 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA, ESPÉCIE PH

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	24,9521	2	12,47605	4,870912	0,018287	3,466795
Dentro dos grupos	53,78809	21	2,561337			
Total	78,74018	23				

TABELA A.29 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA, ESPÉCIE PS

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	10,33911	2	5,169557	5,013011	0,015596	3,42213
Dentro dos grupos	23,71824	23	1,031228			
Total	34,05735	25				

TABELA A.30 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA, ESPÉCIE HC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	27,91476	2	13,95738	8,64384	0,002338	3,554561
Dentro dos grupos	29,06496	18	1,61472			
Total	56,97971	20				

TABELA A.31 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA, ESPÉCIE ZC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	4,305348	2	2,152674	5,299801	0,018152	3,682317
Dentro dos grupos	6,092702	15	0,40618			
Total	10,39805	17				

TABELA A.32 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA, ESPÉCIE CT

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2,744647	2	1,372324	1,39338	0,267604	3,402832
Dentro dos grupos	23,63732	24	0,984888			
Total	26,38196	26				

TABELA A.33 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA, ESPÉCIE CP

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	5,601966	2	2,800983	7,761993	0,005391	3,73889
Dentro dos grupos	5,052022	14	0,360859			
Total	10,65399	16				

TABELA A.34 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA, ESPÉCIE CC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	7,712459	2	3,856230	0,914778	0,420567	3,633716
Dentro dos grupos	67,44767	16	4,215479			
Total	75,16012	18				

TABELA A.35 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE CARBONO, ESPÉCIE MC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	59,103822	1	59,103822	124,602921	0,000000	4,413863
Dentro dos grupos	8,538073	18	0,74337			
Total	67,641895	19				

TABELA A.36 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE CARBONO, ESPÉCIE PH

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2,387563	2	1,193781	0,768733	0,47749	3,52189
Dentro dos grupos	29,50551	19	1,552922			
Total	31,89308	21				

TABELA A.37 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE CARBONO, ESPÉCIE TB

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	38,007494	2	19,003747	53,922181	0,000000	3,340389
Dentro dos grupos	9,868016	28	0,352429			
Total	47,875510	30				

TABELA A.38 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE CARBONO, ESPÉCIE ZC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3,905311	2	1,952656	6,076035	0,011672	3,682317
Dentro dos grupos	4,820551	15	0,321370			
Total	8,725862	17				

TABELA A.39 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE CARBONO, ESPÉCIE CT

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	10,61913	2	5,309567	12,45681	0,000271	3,466795
Dentro dos grupos	8,951	21	0,426238			
Total	19,57013	23				

TABELA A.40 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE CARBONO, ESPÉCIE CP

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	9,735623	2	4,867812	10,390076	0,001712	3,738890
Dentro dos grupos	6,559083	14	0,468506			
Total	16,294706	16				

TABELA A.41 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE CARBONO, ESPÉCIE CC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	10,331996	2	5,165998	10,106213	0,001025	3,521890
Dentro dos grupos	9,712240	19	0,511171			
Total	20,044236	21				

TABELA A.42 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE CARBONO, ESPÉCIE CO

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	25,947015	2	12,973508	16,785085	0,000028	3,402832
Dentro dos grupos	18,550051	24	0,772919			
Total	44,497067	26				

TABELA A.43 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE HIDROGÊNIO, ESPÉCIE MC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,068229	1	0,068229	2,283891	0,148081	4,413863
Dentro dos grupos	0,537735	18	0,029874			
Total	0,605965	19				

TABELA A.44 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE HIDROGÊNIO, ESPÉCIE PH

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,59429	2	0,797145	19,75467	2,29E-05	3,52189
Dentro dos grupos	0,766692	19	0,040352			
Total	2,360982	21				

TABELA A.45 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE HIDROGÊNIO, ESPÉCIE TB

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,092892	2	0,046446	1,940147	0,162517	3,340389
Dentro dos grupos	0,670306	28	0,023939			
Total	0,763198	30				

TABELA A.46 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE HIDROGÊNIO, ESPÉCIE ZC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,020133	2	0,010067	0,218454	0,806273	3,682317
Dentro dos grupos	0,691222	15	0,046081			
Total	0,711355	17				

TABELA A.47 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE HIDROGÊNIO, ESPÉCIE CT

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,128714	2	0,564357	13,233497	0,000191	3,466795
Dentro dos grupos	0,895568	21	0,042646			
Total	2,024281	23				

TABELA A.48 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE HIDROGÊNIO, ESPÉCIE CP

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,096382	2	0,048191	1,243977	0,318221	3,738890
Dentro dos grupos	0,542354	14	0,038740			
Total	0,638736	16				

TABELA A.49 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE HIDROGÊNIO, ESPÉCIE CC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,157185	2	0,078593	3,399971	0,054674	3,521890
Dentro dos grupos	0,439198	19	0,023116			
Total	0,596383	21				

TABELA A.50 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE HIDROGÊNIO, ESPÉCIE CO

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,197884	2	0,098942	2,567881	0,097593	3,402832
Dentro dos grupos	0,924732	24	0,038531			
Total	1,122616	26				

TABELA A.51 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE NITROGÊNIO, ESPÉCIE MC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,638679	1	0,638679	27,361423	0,000056	4,413863
Dentro dos grupos	0,420162	18	0,023342			
Total	1,058841	19				

TABELA A.52 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE NITROGÊNIO, ESPÉCIE PS

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,088904	2	0,044452	7,478537	0,003148	3,422130
Dentro dos grupos	0,136711	23	0,005944			
Total	0,225615	25				

TABELA A.53 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE NITROGÊNIO, ESPÉCIE TB

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,031057	2	0,515528	15,590101	0,000028	3,340389
Dentro dos grupos	0,925895	28	0,033068			
Total	1,956952	30				

TABELA A.54 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE NITROGÊNIO, ESPÉCIE HC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,395640	2	0,197820	3,092184	0,068772	3,521890
Dentro dos grupos	1,215509	19	0,063974			
Total	1,611149	21				

TABELA A.55 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE NITROGÊNIO, ESPÉCIE ZC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,475600	2	0,737800	10,492346	0,001412	3,682317
Dentro dos grupos	1,054769	15	0,070318			
Total	2,530369	17				

TABELA A.56 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE NITROGÊNIO, ESPÉCIE CT

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,409939	2	0,204970	2,381241	0,116932	3,466795
Dentro dos grupos	1,807613	21	0,086077			
Total	2,217552	23				

TABELA A.57 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE NITROGÊNIO, ESPÉCIE CP

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,187694	2	0,093847	7,870490	0,005122	3,738890
Dentro dos grupos	0,166935	14	0,011924			
Total	0,354629	16				

TABELA A.58 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE NITROGÊNIO, ESPÉCIE CC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,936714	2	0,468357	6,601850	0,006654	3,521890
Dentro dos grupos	1,347923	19	0,070943			
Total	2,284636	21				

TABELA A.59 - TESTE DE ANOVA REFERENTE À CONCENTRAÇÃO DE NITROGÊNIO, ESPÉCIE CO

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,509103	2	0,754551	13,215748	0,000135	3,402832
Dentro dos grupos	1,370277	24	0,057095			
Total	2,879380	26				

APÊNDICE B

MODELOS DE REGRESSÃO LINEAR SIMPLES (GRÁFICOS)

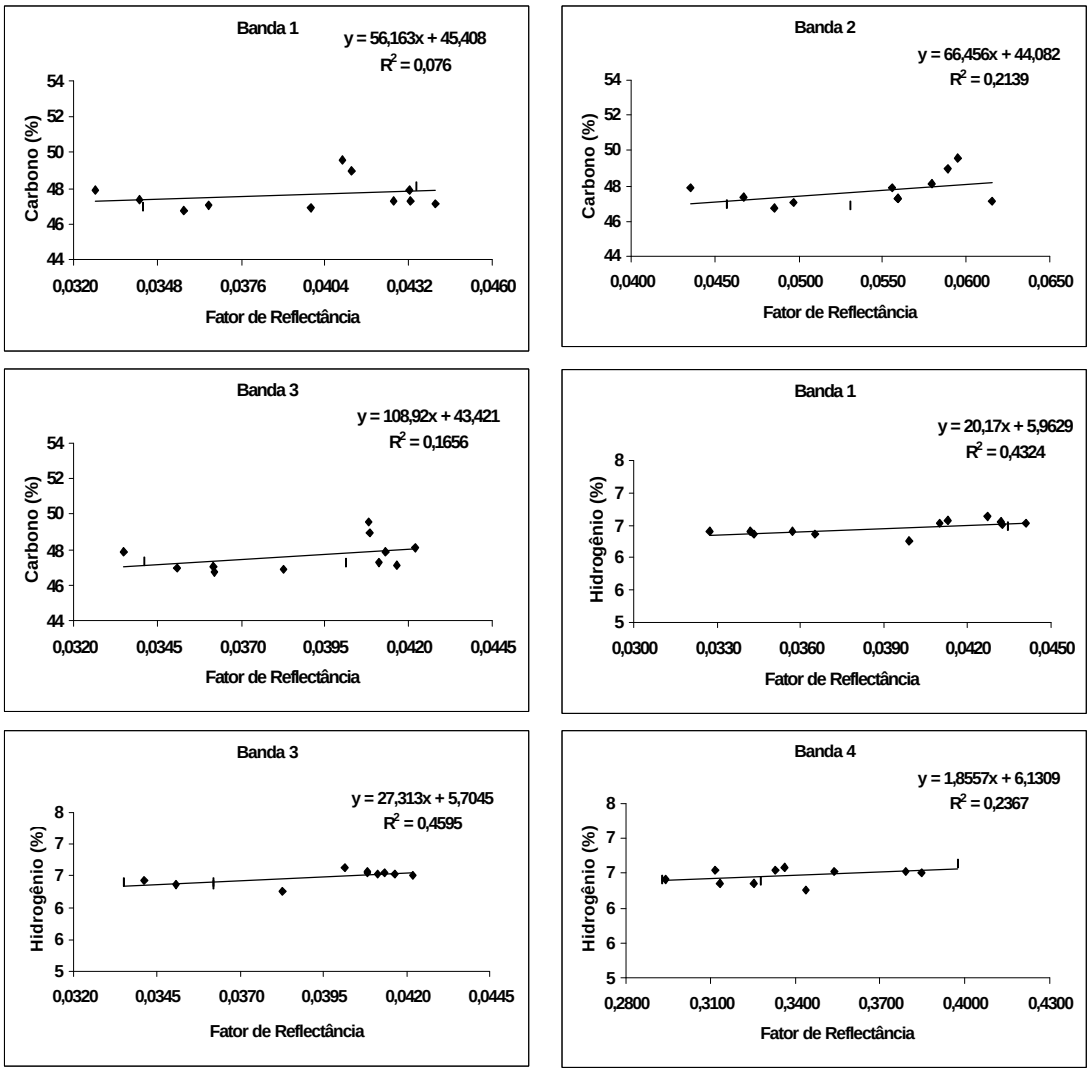


Fig. B.1 - Modelos de regressão linear simples referentes à espécie CC.

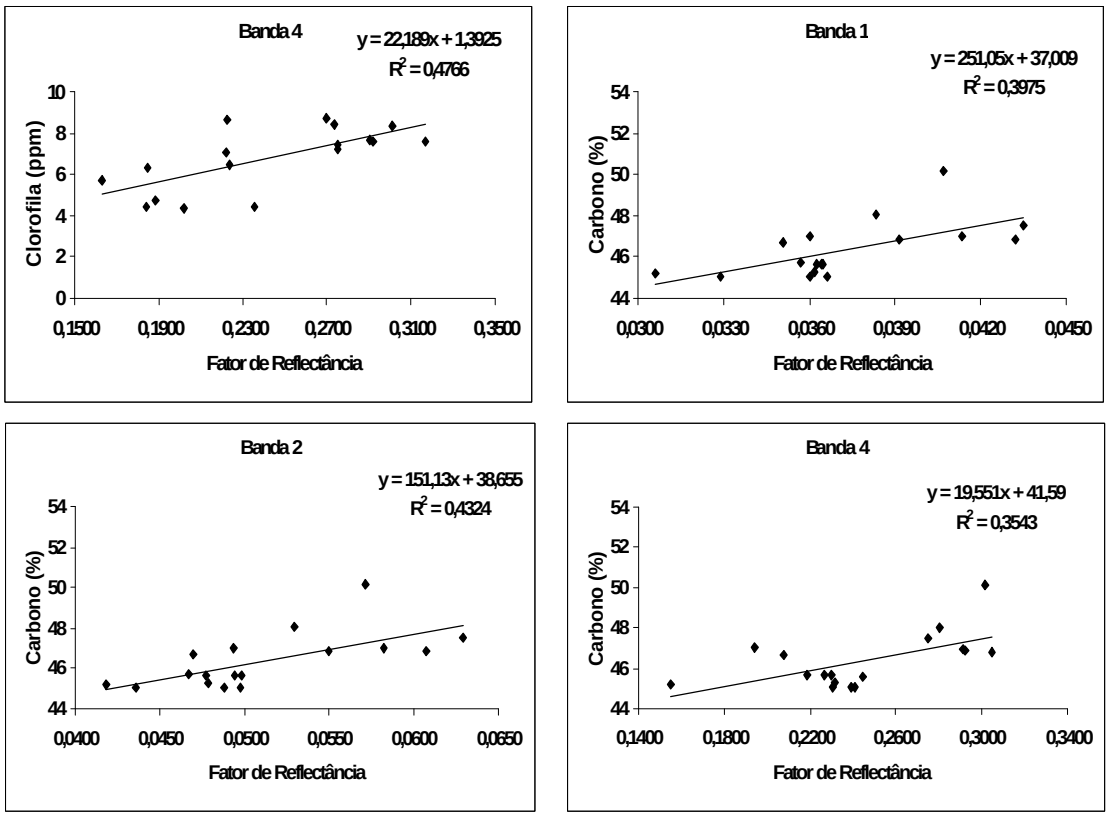


Fig. B.2 - Modelos de regressão linear simples referentes à espécie CO.

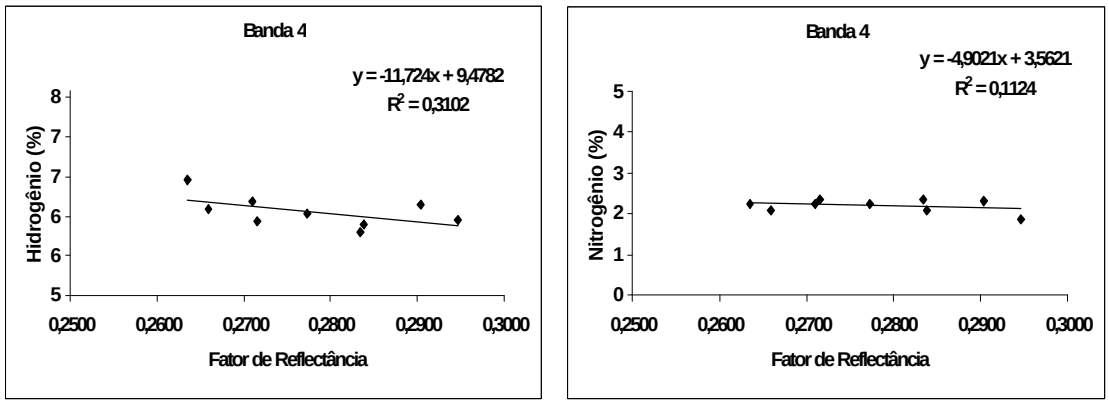


Fig. B.3 - Modelos de regressão linear simples referentes à espécie CP.

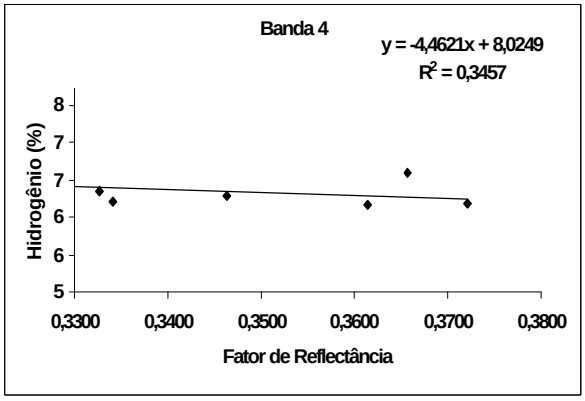
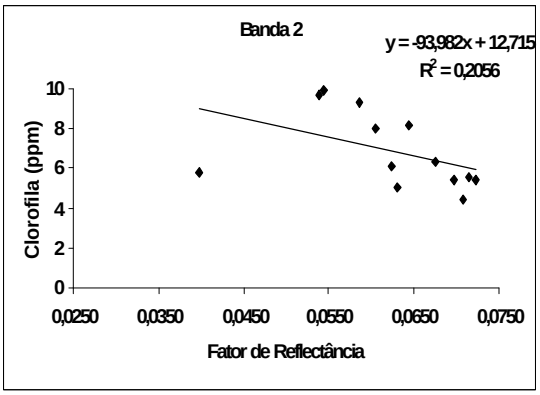
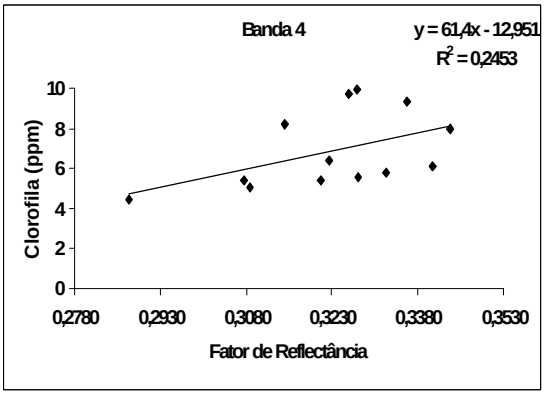


Fig. B.4 - Modelo de regressão linear simples referente à espécie CT.





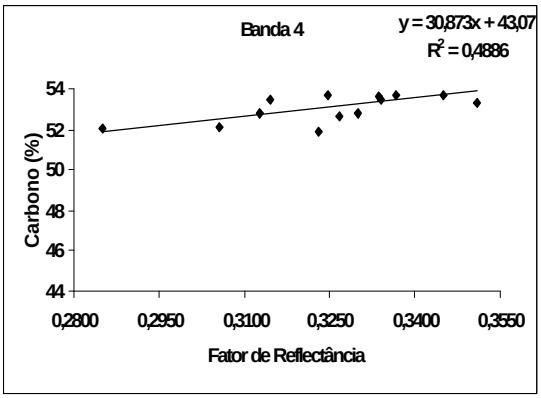


Fig. B.5 - Modelos de regressão linear simples referentes à espécie HC.

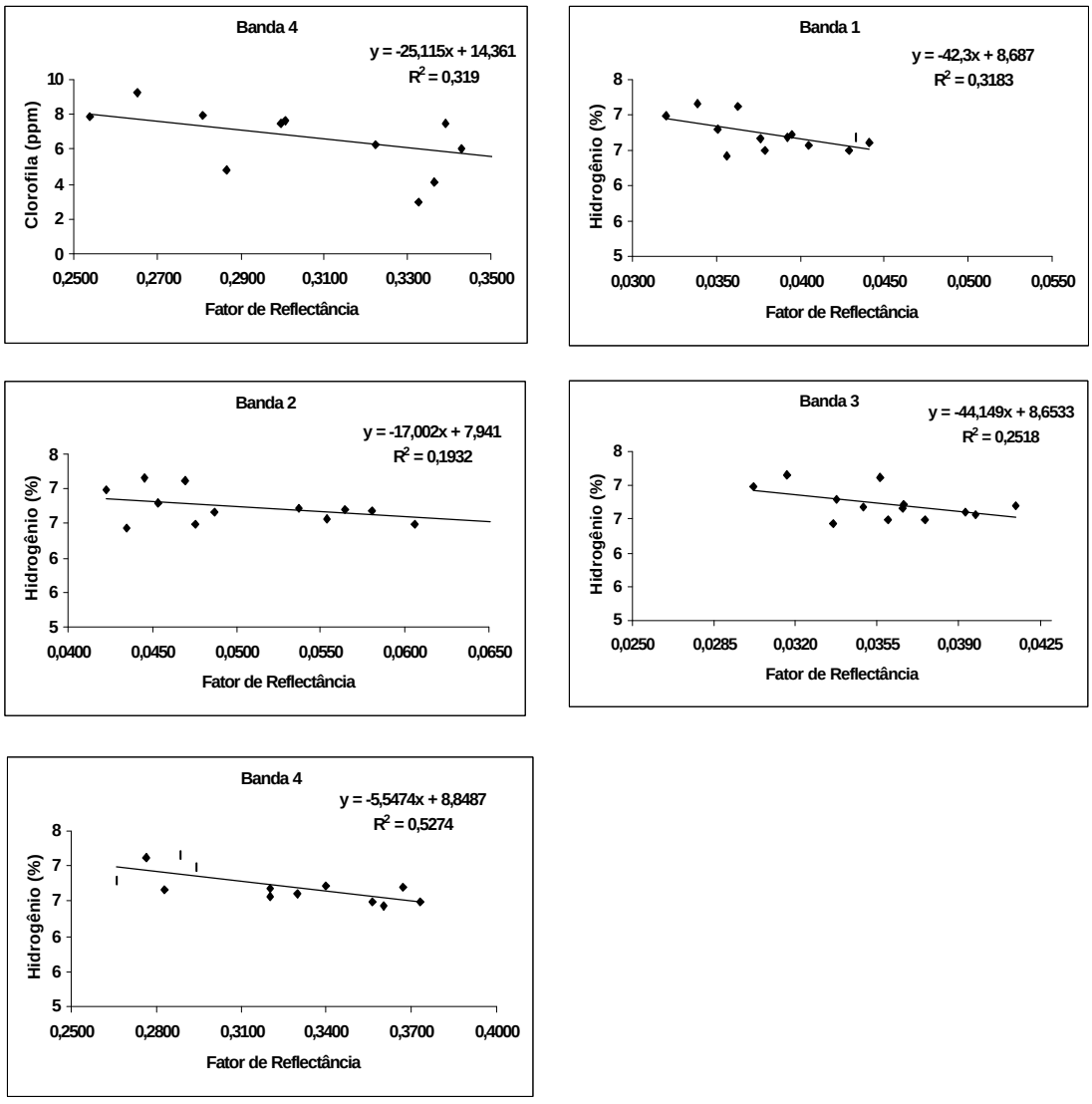


Fig. B.6 - Modelos de regressão linear simples referentes à espécie PH.

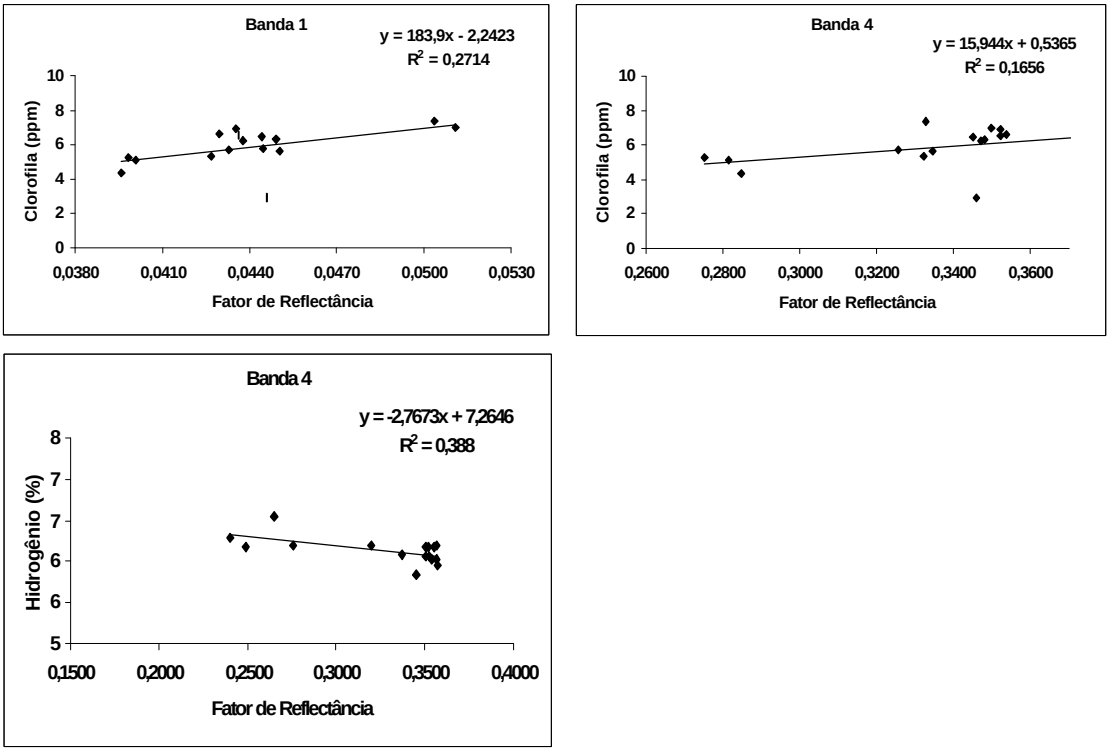


Fig. B.7 - Modelos de regressão linear simples referentes à espécie PS.

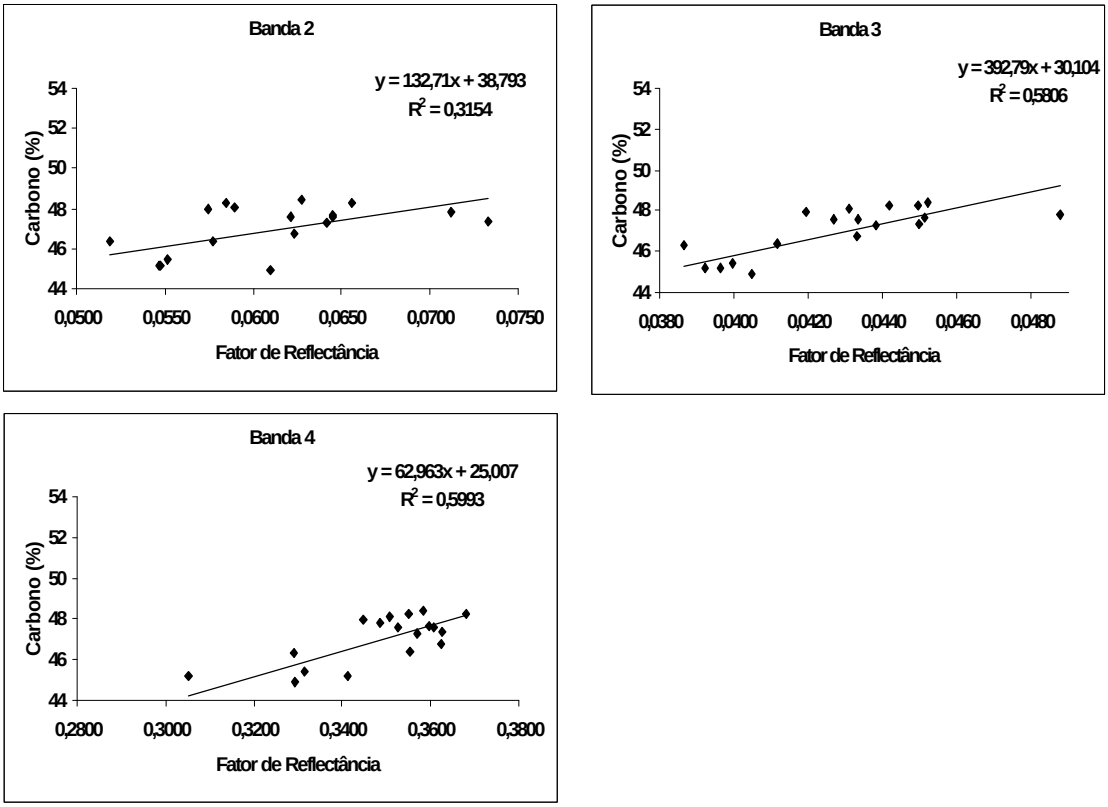


Fig. B.8 - Modelos de regressão linear simples referentes à espécie TB.

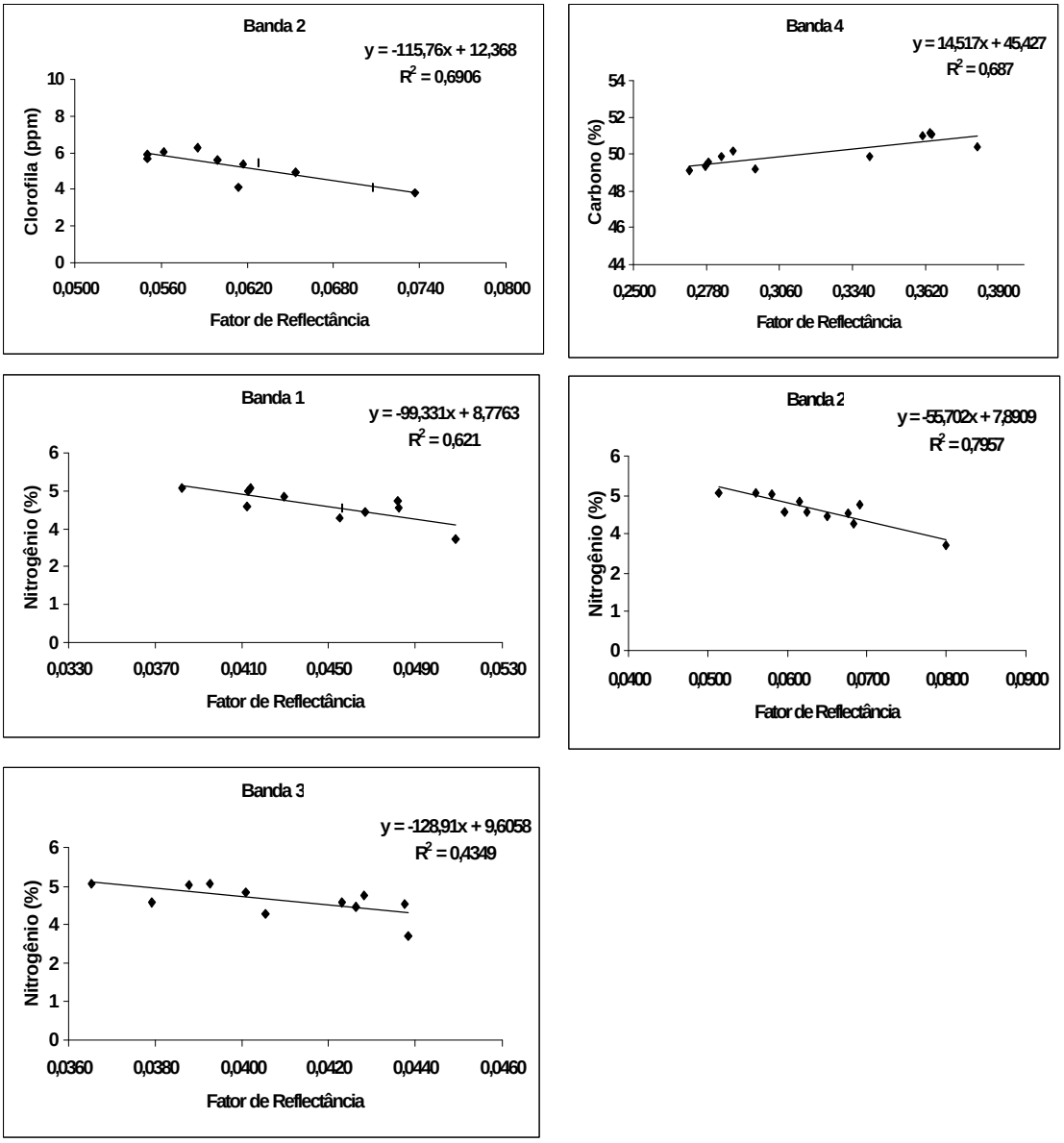


Fig. B.9 - Modelos de regressão linear simples referentes à espécie ZC.

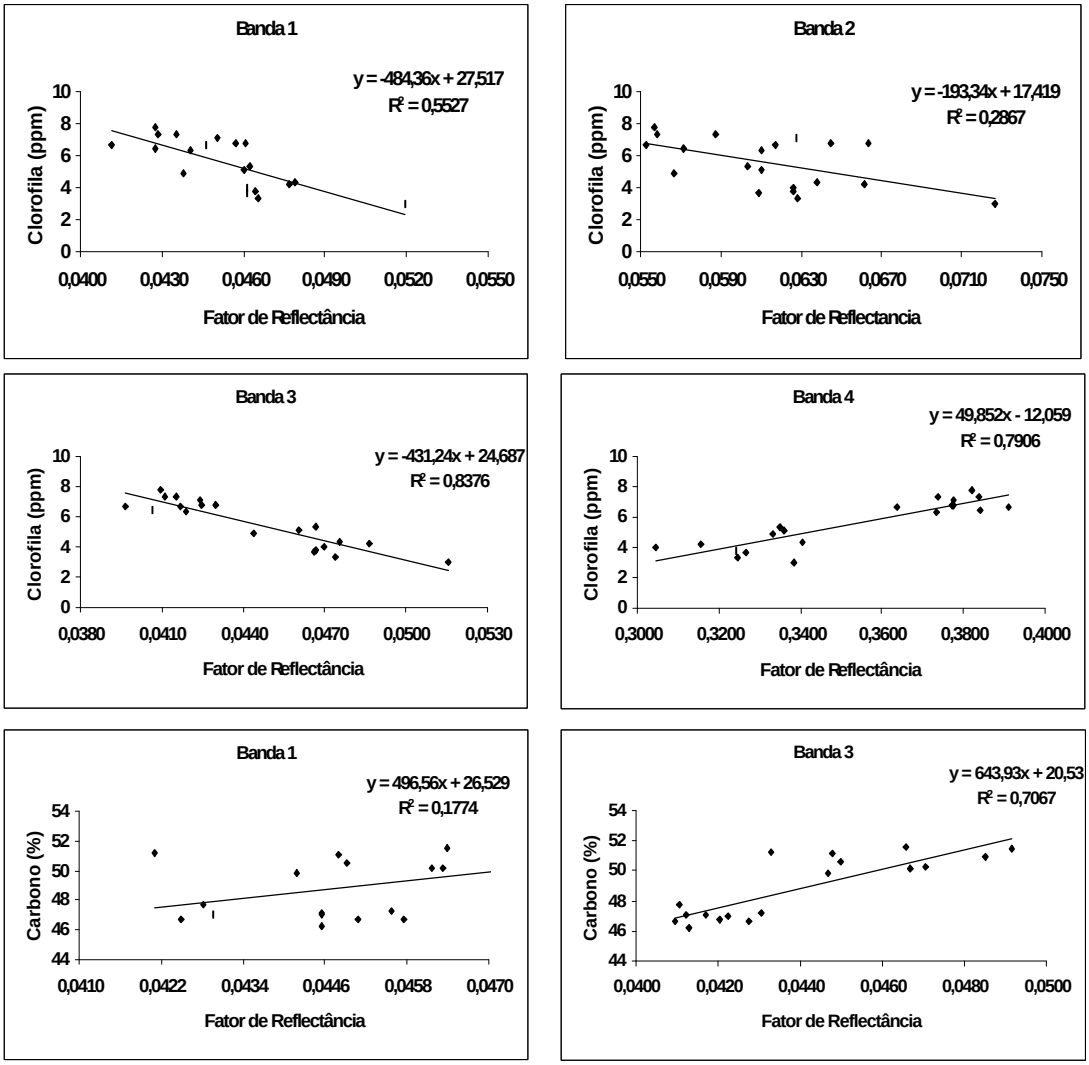
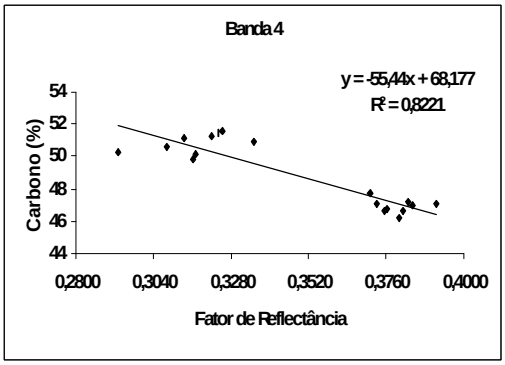
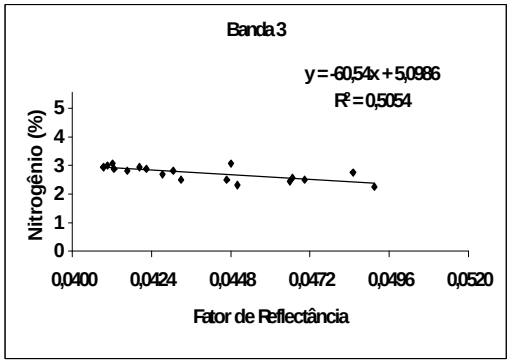


Fig. B.10 - Modelos de regressão linear simples referentes à espécie MC.
(continua)





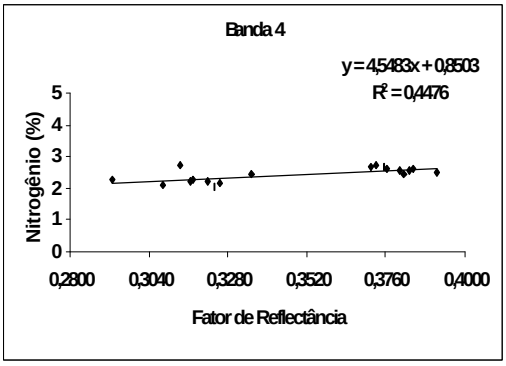


Fig B.10 – Conclusão

APÊNDICE C

IGUALDADE DE VARIÂNCIA ENTRE AS CONCENTRAÇÕES QUÍMICAS ESTIMADAS PELO MODELO E MEDIDAS EM LABORATÓRIO

TABELA C.1 - RESULTADOS REFERENTES AO TESTE DE IGUALDADE DE VARIÂNCIA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS NA ESPÉCIE CC

Conc. Química	BANDA 1			BAN DA 2			BANDA 3			BANDA 4		
	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b
CLOROFILA												
CARBONO	0,07	1,24	11,83*	0,18	1,24	5,89 *	0,19	1,24	5,70 *			
HIDROGÊNIO	0,01	0,05	4,45 *				0,01	0,05	3,06 ns	0,004	0,05	8,81 *
NITROGÊNIO												

Var est – variância estimada; Var calc – variância calculada

* significativo ao nível de 0,05 de significância

ns não significativo

TABELA C.2 - RESULTADOS REFERENTES AO TESTE DE IGUALDADE DE VARIÂNCIA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS NA ESPÉCIE CO

Conc. Química	BANDA 1			BANDA 2			BANDA 3			BANDA 4		
	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b
CLOROFILA										1,07	4,07	3,44 ns
CARBONO	0,71	1,69	1,49 ns	0,99	1,69	0,58 ns				0,31	1,69	5,27 *
HIDROGÊNIO												
NITROGÊNIO												

TABELA C.3 - RESULTADOS REFERENTES AO TESTE DE IGUALDADE DE VARIÂNCIA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS NA ESPÉCIE CP

Conc. Química	BANDA 1			BANDA 2			BANDA 3			BANDA 4		
	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b
CLOROFILA												
CARBONO												
HIDROGÊNIO										0,02	0,03	0,25 ns
NITROGÊNIO										0,004	0,02	4,06 *

TABELA C.4 - RESULTADOS REFERENTES AO TESTE DE IGUALDADE DE VARIÂNCIA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS NA ESPÉCIE CT

Conc. Química	BANDA 1			BANDA 2			BANDA 3			BANDA 4		
	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b
CLOROFILA												
CARBONO												
HIDROGÊNIO										0,04	0,10	1,99 ns
NITROGÊNIO												

TABELA C.5 - RESULTADOS REFERENTES AO TESTE DE IGUALDADE DE VARIÂNCIA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS NA ESPÉCIE HC

Conc. Química	BANDA 1			BANDA 2			BANDA 3			BANDA 4		
	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b
CLOROFILA				0,24	1,68	5,24*				0,48	1,68	2,31 ns
CARBONO										0,37	0,89	1,16 ns
HIDROGÊNIO												
NITROGÊNIO												

TABELA C.6 - RESULTADOS REFERENTES AO TESTE DE IGUALDADE DE VARIÂNCIA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS NA ESPÉCIE PH

Conc. Química	BANDA 1			BANDA 2			BANDA 3			BANDA 4		
	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b
CLOROFILA										0,59	3,99	5,78*
CARBONO												
HIDROGÊNIO	0,03	0,22	4,18*	0,02	0,22	6,84*	0,03	0,22	5,02*	0,04	0,22	3,90*
NITROGÊNIO												

TABELA C.7 - RESULTADOS REFERENTES AO TESTE DE IGUALDADE DE VARIÂNCIA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS NA ESPÉCIE PS

Conc. Química	BANDA 1			BANDA 2			BANDA 3			BANDA 4		
	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b
CLOROFILA	0,62	1,67	1,97 ns							0,59	1,67	2,17 ns
CARBONO												
HIDROGÊNIO										0,01	0,05	3,78 ns
NITROGÊNIO												

TABELA C.8 - RESULTADOS REFERENTES AO TESTE DE IGUALDADE DE VARIÂNCIA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS NA ESPÉCIE TB

Conc. Química	BANDA 1			BANDA 2			BANDA 3			BANDA 4		
	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b
CLOROFILA												
CARBONO				0,30	1,29	5,09 *	0,89	1,29	0,35 ns	0,81	1,29	0,53 ns
HIDROGÊNIO												
NITROGÊNIO												

TABELA C.9 - RESULTADOS REFERENTES AO TESTE DE IGUALDADE DE VARIÂNCIA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS NA ESPÉCIE ZC

Conc. Química	BANDA 1			BANDA 2			BANDA 3			BANDA 4		
	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b
CLOROFILA				0,99	0,53	0,52 ns						
CARBONO										0,23	0,48	0,71ns
HIDROGÊNIO												
NITROGÊNIO	0,08	0,03	1,26 ns	0,07	0,03	0,91 ns	0,07	0,03	0,76 ns			

TABELA C.10 - RESULTADOS REFERENTES AO TESTE DE IGUALDADE DE VARIÂNCIA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS NA ESPÉCIE MC

Conc. Química	BANDA 1			BANDA 2			BANDA 3			BANDA 4		
	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b	Var est	Var calc	b
CLOROFILA	1,80	2,79	0,39 ns	0,17	2,53	12,03*	3,60	2,53	0,25 ns	2,63	2,53	00,3
CARBONO	1,74	2,92	0,54 ns				1,80	2,92	0,47 ns	4,57	2,92	0,41 ns
HIDROGÊNIO												
NITROGÊNIO							0,02	0,04	1,87 ns	0,04	0,04	0,0003 ns

APÊNDICE D

RESULTADOS DAS ANOVAs REFRENTES À VALIDAÇÃO DOS MODELOS

TABELA D.1 - TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE AO HIDROGÊNIO, BANDA 3, ESPÉCIE CC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,001262	1	0,001262	0,044313	0,83593	4,493998
Dentro dos grupos	0,455617	16	0,028476			
Total	0,456879	17				

TABELA D.2 - TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE À CLOROFILA, BANDA 4, ESPÉCIE CO

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,081101	1	0,081101	0,031573	0,860952	4,413863
Dentro dos grupos	46,23603	18	2,568668			
Total	46,31713	19				

TABELA D.3 -TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE AO CARBONO, BANDA 1, ESPÉCIE CO

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,068703	1	0,068703	0,057327	0,813478	4,413863
Dentro dos grupos	21,57195	18	1,198441			
Total	21,64065	19				

TABELA D.4 - TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE AO CARBONO, BANDA 2, ESPÉCIE CO

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,011754	1	0,011754	0,008785	0,926361	4,413863
Dentro dos grupos	24,08343	18	1,337968			
Total	24,09519	19				

TABELA D.5 -TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE AO HIDROGÊNIO, BANDA 4, ESPÉCIE CP

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,012071	1	0,012071	0,456266	0,510378	4,600111
Dentro dos grupos	0,370381	14	0,026456			
Total	0,382452	15				

TABELA D.6 - TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE AO HIDROGÊNIO, BANDA 4, ESPÉCIE CT

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,125796	1	0,125796	1,830486	0,192821	4,413863
Dentro dos grupos	1,23701	18	0,068723			
Total	1,362806	19				

TABELA D.7 -TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE À CLOROFILA, BANDA 4, ESPÉCIE HC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,767594	1	0,767594	0,710211	0,41354	4,600111
Dentro dos grupos	15,13116	14	1,080797			
Total	15,89875	15				

TABELA D.8 -TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE AO CARBONO, BANDA 4, ESPÉCIE HC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,20761	1	0,20761	0,330937	0,574238	4,600111
Dentro dos grupos	8,782773	14	0,627341			
Total	8,990383	15				

TABELA D.9 - TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE À CLOROFILA, BANDA 1, ESPÉCIE PS

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,010467	1	0,010467	0,009136	0,924909	4,413863
Dentro dos grupos	20,62333	18	1,145741			
Total	20,6338	19				

TABELA D.10 -TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE À CLOROFILA, BANDA 4, ESPÉCIE PS

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,003348	1	0,003348	0,002964	0,957185	4,413863
Dentro dos grupos	20,33523	18	1,129735			
Total	20,33858	19				

TABELA D.11 -TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE AO HIDROGÊNIO, BANDA 4, ESPÉCIE PS

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,014872	1	0,014872	0,463678	0,504576	4,413863
Dentro dos grupos	0,577313	18	0,032073			
Total	0,592185	19				

TABELA D.12 -TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE AO CARBONO, BANDA 3, ESPÉCIE TB

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,605088	1	0,605088	0,556333	0,463637	4,300944
Dentro dos grupos	23,92802	22	1,087637			
Total	24,53311	23				

TABELA D.13 -TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE AO CARBONO, BANDA 4, ESPÉCIE TB

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,041011	1	1,041011	0,990648	0,330406	4,300944
Dentro dos grupos	23,11845	22	1,050839			
Total	24,15946	23				

TABELA D.14 -TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE À CLOROFILA, BANDA 2, ESPÉCIE ZC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,6631	1	0,6631	0,871071	0,369059	4,747221
Dentro dos grupos	9,134954	12	0,761246			
Total	9,798054	13				

TABELA D.15 - TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE AO CARBONO, BANDA 4, ESPÉCIE ZC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,354206	1	0,354206	0,994155	0,33841	4,747221
Dentro dos grupos	4,275465	12	0,356289			
Total	4,629671	13				

TABELA D.16 -TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE AO NITROGÊNIO, BANDA 1, ESPÉCIE ZC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,0479	1	0,0479	0,840379	0,377344	4,747221
Dentro dos grupos	0,683978	12	0,056998			
Total	0,731879	13				

TABELA D.17 - TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE AO NITROGÊNIO, BANDA 2, ESPÉCIE ZC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,050043	1	0,050043	0,978456	0,342107	4,747221
Dentro dos grupos	0,613743	12	0,051145			
Total	0,663786	13				

TABELA D.18 - TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE AO NITROGÊNIO, BANDA 3, ESPÉCIE ZC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,049593	1	0,049593	1,022936	0,331783	4,747221
Dentro dos grupos	0,581769	12	0,048481			
Total	0,631361	13				

TABELA D.19 - TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE À CLOROFILA, BANDA 1, ESPÉCIE MC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,142906	1	1,142906	0,544101	0,470246	4,413863
Dentro dos grupos	37,80973	18	2,10054			
Total	38,95263	19				

TABELA D.20 - TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE À CLOROFILA, BANDA 2, ESPÉCIE MC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,186467777	1	0,1864678	0,10953008	0,744501	4,413863
Dentro dos grupos	30,64381942	18	1,7024344			
Total	30,83028719	19				

TABELA D.21 - TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE À CLOROFILA, BANDA 3, ESPÉCIE MC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,352339	1	0,352339	0,136898	0,715702	4,413863
Dentro dos grupos	46,32721	18	2,573734			
Total	46,67955	19				

TABELA D.22 - TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE À CLOROFILA, BANDA 4, ESPÉCIE MC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,151295	1	0,151295	0,064626	0,802209	4,413863
Dentro dos grupos	42,1393	18	2,341072			
Total	42,2906	19				

TABELA D.23 - TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE AO CARBONO, BANDA 1, ESPÉCIE MC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,023255	1	0,023255	0,013448	0,909124	4,493998
Dentro dos grupos	27,66944	16	1,72934			
Total	27,69269	17				

TABELA D.24 - TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE AO CARBONO, BANDA 3, ESPÉCIE MC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,194317	1	0,194317	0,08318	0,776736	4,493998
Dentro dos grupos	37,37777	16	2,336111			
Total	37,57209	17				

TABELA D.25 - TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE AO CARBONO, BANDA 4, ESPÉCIE MC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,879638	1	0,879638	0,252533	0,622143	4,493998
Dentro dos grupos	55,73214	16	3,483259			
Total	56,61178	17				

TABELA D.26 - TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE AO NITROGÊNIO, BANDA 3, ESPÉCIE MC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,012731	1	0,012731	0,441681	0,515777	4,493998
Dentro dos grupos	0,461181	16	0,028824			
Total	0,473911	17				

TABELA D.27 - TESTE DE ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS REFERENTE AO NITROGÊNIO, BANDA 4, ESPÉCIE MC

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,005362	1	0,005362	0,154519	0,699442	4,493998
Dentro dos grupos	0,55517	16	0,034698			
Total	0,560532	17				

APÊNDICE E

RESULTADOS DOS TESTES NÃO-PARAMÉTRICOS DE WILCOXON PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS

TABELA E.1 - TESTE NÃO-PARAMÉTRICO DE WILCOXON APLICADO NA ESPÉCIE CC

Conc. Química	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4
	T	T	T	T
CLOROFILA				
CARBONO	12 ns	12,5 ns	6 ns	
HIDROGÊNIO	16,5 ns			13 ns
NITROGÊNIO				

TABELA E.2 - TESTE NÃO-PARAMÉTRICO DE WILCOXON APLICADO NA ESPÉCIE CO

Conc. Química	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4
	T	T	T	T
CLOROFILA				
CARBONO				25 ns
HIDROGÊNIO				
NITROGÊNIO				

TABELA E.3 - TESTE NÃO-PARAMÉTRICO DE WILCOXON APLICADO NA ESPÉCIE CP

Conc. Química	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4
	T	T	T	T
CLOROFILA				
CARBONO				
HIDROGÊNIO				
NITROGÊNIO				7 ns

TABELA E.4 - TESTE NÃO-PARAMÉTRICO DE WILCOXON APLICADO NA ESPÉCIE HC

Conc. Química	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4
	T	T	T	T
CLOROFILA		5 ns		
CARBONO				
HIDROGÊNIO				
NITROGÊNIO				

TABELA E.5 - TESTE NÃO-PARAMÉTRICO DE WILCOXON APLICADO NA ESPÉCIE PH

Conc. Química	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4
	T	T	T	T
CLOROFILA				11 ns
CARBONO				
HIDROGÊNIO	10 ns	9 ns	11 ns	5 ns
NITROGÊNIO				

TABELA E.6 - TESTE NÃO-PARAMÉTRICO DE WILCOXON APLICADO NA ESPÉCIE TB

Conc. Química	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4
	T	T	T	T
CLOROFILA				
CARBONO		20 ns		
HIDROGÊNIO				
NITROGÊNIO				

TABELA E.7 - TESTE NÃO-PARAMÉTRICO DE WILCOXON APLICADO NA ESPÉCIE MC

Conc. Química	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4
	T	T	T	T
CLOROFILA		20 ns		
CARBONO	20.5 ns			
HIDROGÊNIO				
NITROGÊNIO				