

Influência da geometria de visada na reflectância espectral de duas gramíneas forrageiras

Ademir Fernando Morelli *

Antonio Roberto Formaggio **

José Carlos Neves Epiphânio **

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the influence's valuation of view geometry variation in spectral behaviour of herbaceous vegetation and soil, underlying in composition pastures for Brachiaria decumbens Stapf. cv. Basilisk Stapf and Brachiaria brizantha Stapf. cv. Marandu. The methodology development involved the report analysis between the spectral reflectance and the biophysics parameters of herbaceous vegetation and soil. For this purpose radiometric and biophysics measurements were done for 25 vegetation samples and one soil sample, in experiment areas of 1000 m², for each species. The multispectral bidirectional reflectance measurements (500 to 1100 nm) were obtained in the view zenith angles (θ_v) of 0°, 15°, 30°, 45° and 60° for three sectors of azimuthal plain ($\phi_v = 0^\circ, 90^\circ$ and 180°), with the solar zenith angle variation controlled for an amplitude of the 10° ($\theta_s = 45^\circ$ to 55°) and the solar azimuthal variation compensated in the acquisition method. The following vegetation parameters were measured: fresh and dry biomass, fresh and dry green biomass, droughtry biomass and leaf and stems; water content of total, green and droughtry biomass, Leaf Area Index (LAI) and percentage of canopy cover. The soil parameters available were color, roughness and chemistry composition. This research intent was the comprehension of physical mechanisms involved in the directional reflectance factor distribution of complete homogeneous vegetation canopies and its influences in the relation between spectral behavior and vegetation parameters. The general scattering behavior was coherent with the dynamics observed in the literature and was supported by two principal phenomena: the "phase function" and "geometric effect I". The major trends observed in the reflectance factor occurred in the azimuth in the principal plane of the sun ($\phi_s = 0^\circ$ and 180°), while the minor trends occurred in the azimuth direction perpendicular to the principal plane of the sun ($\phi_v = 90^\circ$). For all view angles and spectral bands the minimum reflectance occurred near nadir ($\theta_v = 0^\circ$) and increased with increasing view zenith angles for all azimuth directions. This trend is caused by the shading of lower canopy layers, by components in the upper layers and by viewing different proportions of the layer components as the view angle changes ("effect I"). In some cases by an additional effect of "phase function", the reflectance minimum was shifted slightly off-nadir in the forward scattering direction ($\phi_s = 0^\circ$). This shift was maximized for occurrence of reproductive structures in the top layers of cover, because this structure is vertical and opaque. The near infra-red band was less influenced by view geometry variation than in the spectral bands of visible, because in the near infra-red band the transmittance was nearly equal to the reflectance for most structural components of herbaceous vegetation, while in the visible the reflectance is major, consequently the "effect I" is maximized. The major information content about vegetation cover was obtained in the principal plane of the sun, in the backscattering direction ($\phi = 180^\circ$), than showed better relationships to the vegetation parameters, because of the occurrence of "hot spot". The vegetation parameters of production and water content showed the best correlations, because its parameters have more association to the near infra-red, that exhibited the better performance than visible bands, more associated to LAI and fresh and dry biomass components. The "effect I" was the dominant phenomenon with controlled the directional reflectance distributions observed, but had its effects altered by the action of additional phenomenon "phase function".

(*) Professor da UNIVAP

(**) Pesquisadores do INPE

1 - INTRODUÇÃO

Uma nova geração de satélites de observação da terra está sendo introduzida, com capacidade de direcionamento de visadas oblíquas longitudinais e transversais à trajetória. Estes incluem o já operacional SPOT ((Système Pour l'Observation de la Terre) (-27° transversalmente à trajetória)) e os propostos satélites da série EOS (Earth Observing System), MISR (Multangle Imaging Spectroradiometer), HIRIS ((High-Resolution Imaging Spectrometer) (-45° transversalmente e $+52^\circ/-30^\circ$ longitudinalmente à trajetória)) e MODIS ((Moderate Resolution Imaging Spectrometer), o MODIS T (-50° longitudinalmente) e o MODIS N (-55° transversalmente)). Adicionalmente o uso dos já existentes sistemas sensores aerotransportados e orbitais com grande ângulo de varredura, tais como a maioria dos sistemas fotográficos, os imageadores multiespectrais aerotransportados e os satélites da série NOAA/AVHRR ((Advanced Very High-Resolution Radiometer (campo de visada com -56°) incrementam grandemente o volume de dados obtidos com ângulos de visada oblíquos (Barnsley, 1983; NASA, 1990).

O sensoriamento remoto direcional oferece grandes vantagens sobre o sensoriamento remoto estritamente no nadir. Uma das vantagens é o incremento da cobertura espacial e temporal das superfícies. Os sistemas radiométricos com grandes ângulos de varredura permitem aumento da área coberta para qualquer particular órbita e os satélites com capacidade de direcionamento de visada aumentam a frequência observacional sem incremento do número de satélites em órbitas simultâneas. Mas a maior vantagem é a de permitir o estudo da FDRB (Função de Distribuição de Reflectância Bidirecional) das superfícies terrestres, com o desenvolvimento de métodos e técnicas que explorem a variabilidade angular destes dados espectrais (Kimes et al., 1984a).

Entretanto, a aplicação do sensoriamento remoto direcional na interpretação de imagens de coberturas vegetais é bastante dificultada pelo caráter marcadamente anisotrópico destas superfícies, sendo que a geometria de visada determina a sua resposta espectral (Suits, 1972). Há necessidade de estudos básicos dos efeitos da variação da geometria de visada no comportamento espectral das superfícies vegetais, com a caracterização da FDRB destas superfícies.

Estudos em radiometria de campo provêm as bases para o entendimento da FDRB de coberturas vegetais, relacionando-a quantitativamente aos parâmetros biofísicos da vegetação herbácea e do solo subjacente.

Em tais estudos, analisa-se a relação funcional entre a reflectância direcional multiespectral e os parâmetros biofísicos, sendo fundamentais para o entendimento dos mecanismos físicos da transferência de radiação envolvidos na dinâmica da FDRB de coberturas vegetais.

Entretanto, a maioria dos experimentos empíricos em campo (p. ex. Kimes, 1983; Guyot, 1984), não avaliam quantitativamente a influência da variação da geometria de visada no relacionamento entre os parâmetros biofísicos e os indicadores espectrais, restringindo-se à descrição da dinâmica do fator de reflectância bidirecional e suposições dos mecanismos físicos da transferência radiativa.

No Brasil, poucos são os estudos básicos sobre o comportamento espectral da vegetação. O INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), principal instituto de pesquisas em sensoriamento remoto, só recentemente iniciou os estudos fundamentais da vegetação, com as pesquisas básicas se concentrando na análise radiométrica e modelagem do comportamento espectral de culturas agrícolas (Batista, et al., 1988; Formaggio, 1989; Formaggio e Epiphânio, 1988 e 1990).

Em consideração à área ocupada (21% do território nacional), à importância econômica e à potencialidade de aplicação das técnicas do sensoriamento remoto em pastagens, poucos são os estudos básicos sobre seu comportamento espectral, restringindo-se aos de Pereira (1986); Santos (1988); Valeriano e Pereira (1988), inexistindo os que enfocam a dinâmica da reflectância direcional desta cobertura, fundamentais para o sensoriamento remoto direcional. Estudos em sensoriamento remoto direcional com a caracterização da FDRB de pastagens permitem o desenvolvimento de técnicas e métodos para a extração de informação sobre esta cobertura, a partir da análise da distribuição espacial e angular dos dados espectrais.

1.1 - OBJETIVOS

1.1.1 - OBJETIVO GERAL

Avaliação da influência da variação da geometria de visada no comportamento espectral da vegetação herbácea e do substrato subjacente em pastagens compostas por *Brachiaria decumbens* Stapf cv. Basilisk e *Brachiaria brizantha* Stapf cv. Marandu.

1.1.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- a - Caracterização da composição e dos aspectos geométricos da vegetação herbácea e do solo subjacente em pastagens compostas por

Brachiaria decumbens Stapf cv. Basilik e *Brachiaria brizantha* Stapf cv. Marandu;

- b - Caracterização da distribuição angular da reflectância bidirecional multiespectral, obtida em diferentes geometrias de visada, para a vegetação herbácea e para o solo subjacente, em pastagens compostas por *Brachiaria decumbens* Stapf cv. Basilik e *Brachiaria brizantha* Stapf cv. Marandu;
- c - Análise das relações funcionais entre a reflectância bidirecional multiespectral obtida nas diferentes geometrias de visada e os parâmetros biofísicos da vegetação herbácea e do solo subjacente em pastagens, em função da geometria de visada na aquisição dos dados espectrais.

2 - REVISÃO DE LITERATURA

2.1-FATORES CONTROLADORES DO COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE PASTAGENS

Métodos de extração de informação das superfícies vegetais por sensoriamento remoto baseiam-se na análise da distribuição espectral e angular da REM sobre tais coberturas. A distribuição espectral é determinada, principalmente pelas propriedades ópticas dos constituintes da cobertura. A distribuição angular é dependente principalmente das características estruturais da vegetação e da geometria de aquisição.

Para o desenvolvimento de métodos de extração de informação que explorem a distribuição espectral e angular da reflectância da vegetação, é necessário o entendimento dos mecanismos físicos da transferência radiativa para os vários comprimentos de onda como uma função:

- a- da estrutura geométrica da vegetação, que é importante informação usada para discriminar e classificar várias formas e funções de coberturas vegetais;
- b- das propriedades ópticas das coberturas vegetais e do solo subjacente que fornecem informações da sua composição química e estrutura física.
- c- da geometria de aquisição, que determina a resposta espectral de alvos altamente anisotrópicos como o complexo vegetação-solo em pastagens.

Estrutura Geométrica da Vegetação

A Estrutura Geométrica da Vegetação (EGV) é o maior determinante da distribuição angular da REM em coberturas vegetais (Kimes e Kirchner, 1984). A

EGV pode ser descrita quantitativamente por parâmetros biofísicos como a distribuição das plantas no terreno, o Índice de Área Foliar (IAF), o Índice de Cobertura (IC) e a Função de Distribuição Angular das Folhas (DAF). Tais parâmetros variam espacialmente e temporalmente de acordo com o tipo de vegetação, o estágio de desenvolvimento e as condições da vegetação. Para gramíneas, podem ocorrer mudanças significativas na DAF no decorrer do dia, devido a fatores como movimentos heliotróficos das folhas, condições ambientais (p.ex. vento), e condições fitossanitárias (estresse, doenças) (Kimes, 1984). A EGV é muito complexa, heterogênea e transiente, o que dificulta grandemente sua medição e quantificação.

Propriedades ópticas da vegetação e do solo

Na vegetação herbácea, as folhas são os elementos estruturais que tem o papel mais importante no comportamento espectral da cobertura vegetal. As folhas são a unidade funcional na complexa interação com a REM, como coletores de luz apresentam pigmentos e adaptações anatômicas que otimizam a interceptação da radiação para a fotossíntese, resultando em um padrão próprio de comportamento espectral (Valeriano, 1988).

Geometria de aquisição

Para a análise da resposta espectral bidirecional da vegetação em função da geometria de aquisição dos dados espectrais é fundamental o conhecimento da dinâmica da reflectância bidirecional de coberturas vegetais. Os fatores de reflectância bidirecional que cobrem inteiramente o hemisfério de reflexão como uma função do AZS (Ângulo Zenital Solar), AAS (Ângulo Azimutal Solar), AZV (Ângulo Zenital de Visada) e AAV (Ângulo Azimutal de Visada), são usados para caracterizar a radiação refletida por uma cobertura vegetal (Kimes et al., 1985). Medidas do fator de reflectância bidirecional são a melhor aproximação possível para representar a Função de Distribuição de Reflectância Bidirecional (FDRB) que pode ser obtida em campo (Kimes et al., 1980). Kimes (1983) e Guyot (1984), baseados em dados obtidos em campo e por modelagem, propuseram os dois principais mecanismos físicos que controlam a dinâmica da reflectância bidirecional: o "efeito geométrico 1" e a "função de fase".

Segundo Kimes (1983) o efeito 1 é primariamente causado pelo sombreamento das camadas inferiores da cobertura vegetal pelos componentes das camadas superiores e pela visada de diferentes proporções dos componentes das camadas com a variação do ângulo zenital de visada. Os princípios físicos envolvidos são

discutidos profundamente em Kimes (1993). Os padrões de reflectância bidirecional também são dependentes de um outro efeito, denominado na literatura de "Função de fase" (Kimes, 1984, Kimes et al., 1985). O conceito geral da função de fase, foi definido por Chandrasekher (1960), os mecanismos físicos que explicam essa função foram discutidos por Kimes (1984). A função de fase é um componente muito importante no controle da dinâmica direcional da resposta espectral de uma cobertura vegetal, pois define o espalhamento anisotrópico para qualquer ponto particular de interação da cobertura, como sendo uma função do AAS, DAF e das propriedades de reflectância e transmitância foliar (Kimes, 1984).

Kimes et al. (1984a), baseados na análise da dinâmica da reflectância bidirecional de diversas culturas, demonstraram os ângulos de visada oblíquos ótimos em relação a duas estratégias de extração de informação. A primeira estratégia visa a utilização de medidas com AZV oblíquos como extensão à cobertura espectral e temporal a medições em AZV verticais. Os AZV ótimos são aqueles que minimizam a variação na resposta do sensor relativa à resposta no nadir; são AZV que estão na direção azimutal perpendicular ao plano principal do Sol para todas as superfícies vegetais e ângulos solares. A segunda estratégia visa a utilização de medidas com AZV oblíquos como incrementadores do conteúdo de informação sobre as características físicas do alvo. Os AZV oblíquos ótimos são aqueles que, relativos a AZV verticais, provêm informação adicional e/ou superior sobre as características do alvo. Concluíram que AZV oblíquos ótimos são aqueles com o azimute no plano principal do Sol para todas as superfícies e bandas espectrais. O desenvolvimento metodológico baseou-se nessas duas estratégias, com a geometria de aquisição priorizando a variação dos dados espectrais.

3 - MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - MATERIAL

Para as medidas radiométricas utilizou-se o espectroradiômetro Spectron SE-590, que adquire um espectro radiométrico em 256 bandas na faixa de 368,4 nm a 1113,7 nm. Para maiores informações ver o manual de referência Steffen (1988).

Como sistema de suporte à aquisição empregou-se um mastro de elevação composto de um braço de extensão e uma base de sustentação dos sensores. Utilizaram-se também sistemas de controle das variáveis envolvidas no processo de aquisição. A configuração dos sistemas está exposta em Morelli (1993).

3.2 - Métodos

A pesquisa foi realizada no Instituto de Zootecnia de Nova Odessa - SP, no período de junho a julho de 1991. Aplicando-se critérios de representatividade em área cultivada e extensão dos cultivos selecionaram-se as espécies *Brachiaria decumbens* e *Brachiaria brizantha*. As duas espécies são as mais cultivadas extensivamente em área no Brasil e continuam em processo de expansão da área cultivada.

Aquisição de dados espectrais e biofísicos

Aquisição e processamento dos dados espectrais

Foram realizadas medições radiométricas para 25 amostras da vegetação e para uma amostra do solo em áreas experimentais de 1000 m², para cada espécie. As medidas da reflectância bidirecional multiespectral (500 a 1100 nm) foram obtidas segundo o método de aquisição sugerido por Kimes (1983), nos ângulos zenitais de 0, 15, 30, 45 e 60 graus para 3 setores do plano azimutal (0, 90 e 180 graus), com a variação do ângulo zenital solar controlada para uma amplitude de 10 graus (45°-55°) e a variação azimutal solar compensada no método de aquisição. A variação azimutal em relação a EGV foi minimizada intra ângulos zenitais de visada, pelo curto período de aquisição, e compensada entre ângulos azimutais de visada, pela aquisição em dias diferentes, mas no mesmo período (horário) de aquisição (mesmo AZS e AAS) (tabelas 3.1 e 3.2). Fotografias verticais e do perfil da vegetação documentaram os locais e a área amostrada, para o estabelecimento do índice de cobertura da fitomassa verde, da fitomassa seca, do solo exposto e a distribuição e intensidade de sombras em cada um destes componentes, além de registrar o estágio fenológico da vegetação. Após a fase de aquisição, os espectros foram processados no programa Espectro (Steffen, 1988). O processamento envolveu a transferência, a filtragem de ruídos, a ordenação dos espectros e o cálculo do fator de reflectância. O programa permitiu ainda a transferência dos espectros para uma planilha de cálculo, onde realizou-se a correção do fator de reflectância e o cálculo da reflectância média para as bandas espectrais do Spectron compreendidas entre as bandas TM1 (450-520nm), TM2(520-600nm), TM3 (630-690nm) e TM4 (760-900).

Tabela 3.1 - descrição do processo de aquisição dos dados espectrais para *Brachiaria decumbens*:

AZV	DIA	AAS início	AAS final	VAR AAS	AZS início	AZS final	VAR AZS
0	03/06	65	48	17	49	43	6
15	02/06	47	14	33	43	44	1
30	02/06	12	6	6	44	55	11
45	01/06	20	1	19	44	55	11
60	01/06	28	15	13	43	49	6

Tabela 3.2- Descrição do processo de aquisição dos dados espectrais para *Brachiaria brizantha*

AZV	DIA	AAS início	AAS final	VAR AAS	AZS início	AZS final	VAR AZS
0	18/07	12	8	4	44	51	7
15	18/07	41	12	29	43	44	1
30	17/07	12	6	6	44	55	11
	18/07	57	45	12	44	43	1
45	17/07	26	10	16	43	48	5
60	16/07	66	22	44	49	43	6

Aquisição e processamento de dados biofísicos

Realizou-se a amostragem biofísica nas mesmas amostras medidas radiometricamente aplicando-se o método do corte e pesagem da fitomassa. Assim, obtiveram-se os seguintes parâmetros biométricos da vegetação: Fitomassa total fresca (FTT_PU) e seca (FTT_PS), fitomassa verde fresca (FTV_PU) e seca (FTV_PS), fitomassa seca fresca (FTS_PU) e seca (FTS_PS), teor de água total (TAFTT) e da biomassa verde (TAFTV) e seca (TAFTS), folhas verdes fresca (FV_PU), folhas secas (FS_PU), colmos verdes (MV_PU) e secos (MS_PU). Para a estimação do índice de cobertura (IC) empregou-se técnica fotográfica. O índice de área foliar (IAF) foi determinado por planimetria e relacionamento do peso com a área foliar e a distribuição angular das folhas estratificada por altura da cobertura (DAFE) foi obtida através de uma bússola e um clinômetro acoplado. Parâmetros biofísicos coletados do solo foram a classificação da cor do solo segundo a tabela Munsell, textura e rugosidade.

4.- RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dada a similaridade do comportamento espectral entre as duas espécies de gramíneas e ao reduzido espaço, apresentam-se somente os resultados e a discussão para *Brachiaria brizantha*.

4.1 - COMPOSIÇÃO DA VEGETAÇÃO HEBÁCEA E DO SOLO SUBJACENTE *BRACHIARIA BRIZANTHA*

Tabela 4.1 - estatísticas descritivas dos parâmetros biofísicos da cobertura de *Brachiaria brizantha*.

Parâmetros	Média	Desvio Padrão	Proporção (%)	Variabilidade (%)
FTT(PU)	4 136,00	892,50	100,00	21,00
FTT(PS)	2 519,45	504,25	100,00	20,00
FTV(PU)	2 734,40	586,41	66,11	21,01
FTV(PS)	1 505,92	427,67	59,77	27,82
FTS(PU)	1 401,60	443,57	33,89	31,01
FTS(PS)	993,47	353,89	39,43	34,90
FV(PU)	1 062,65	320,66	39,09	29,32
FS(PU)	566,45	389,29	80,55	69,18
MV(PU)	2 165,77	627,74	23,1	34,11
MS(PU)	334,02	226,67	38,83	63,18
TAFTT	1 616,63	504,50	39,09	30,58
TAFTV	1 228,49	369,62	44,93	29,48
TAFTS	408,13	169,95	29,12	40,80
IAF	5,64	1,59		

Substrato

O substrato é constituído de solo exposto, serapilheira, parte dos colmos e raízes superficiais. Os colmos e as raízes não foram retirados para não modificar as condições originais do substrato e da rugosidade superficial. O solo do local é classificado como Podzólico vermelho-amarelo variação laras, segundo caracterização da Comissão Nacional de Solos, (CNS_SNPA, 1989). Sua análise química revelou a seguinte composição: pH = 5,6; carbono 1,10%; e, em mg por 200 ml de TFSA, $PO_4^{-3} = 0,08$; $K^+ = 0,18$; $Ca^{++} = 1,30$; Al = ausente.

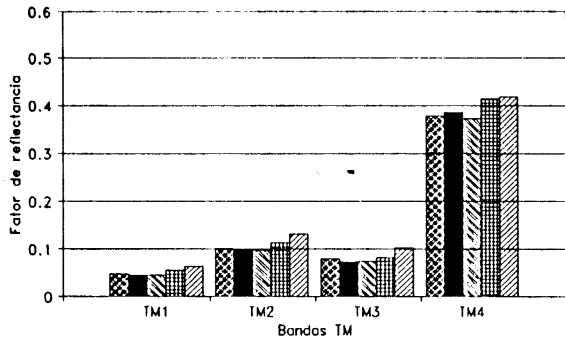
4.2 - ESTRUTURA GEOMÉTRICA DA COBERTURA

Distribuição Angular Estratificada das Folhas

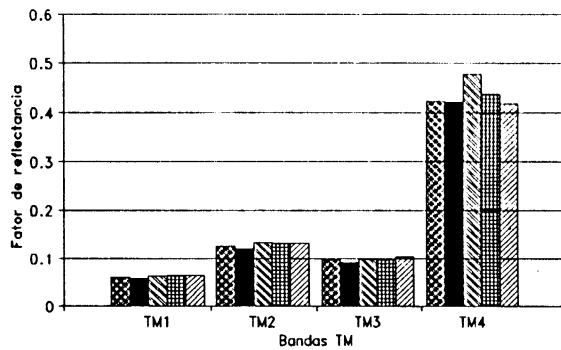
Os estratos superiores e inferiores da cobertura apresentam características de distribuição pronunciadamente distintas. Os 3 estratos superiores (60 a 90 cm) classificam-se, quanto à frequência dos ângulos de inclinação foliar, como erectófilos (maior frequência de ângulos zenitais entre 0 e 3,6°) e conseqüentemente sem orientação azimutal, enquanto os estratos inferiores (60 cm) classificam-se como plagiófilos (maior frequência de ângulos entre 30 e 40°) e sem preferência de orientação azimutal (ângulos azimutais entre 0 e 360°).

4.3 - Caracterização da distribuição angular da reflectância bidirecional multispectral de *B. brizantha*

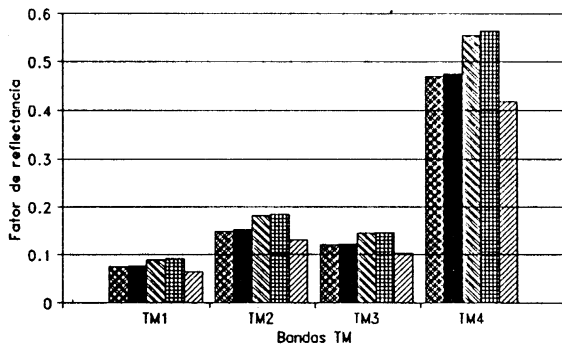
Para a caracterização da distribuição da reflectância analisaram-se as variações azimutais e zenitais dos FRBMs obtidos em diferentes AAV e AZV. As figuras 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam os valores absolutos, as variações azimutais e zenitais dos FRBMs, respectivamente. Os mecanismos físicos envolvidos na dinâmica observada são analisados a seguir.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.1 - Valores absolutos dos FRBMs para os AAV de (a) 0, (b) 90 e (c) 180 graus para *B. brizantha*.

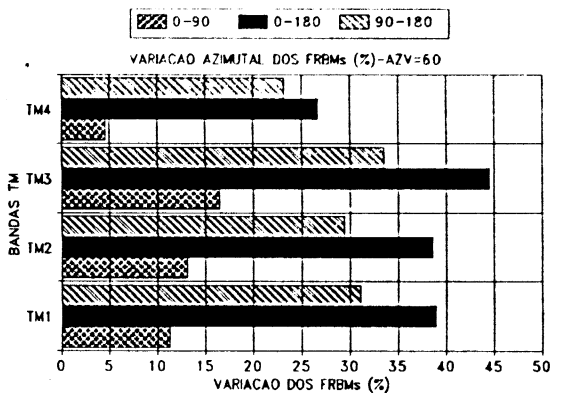
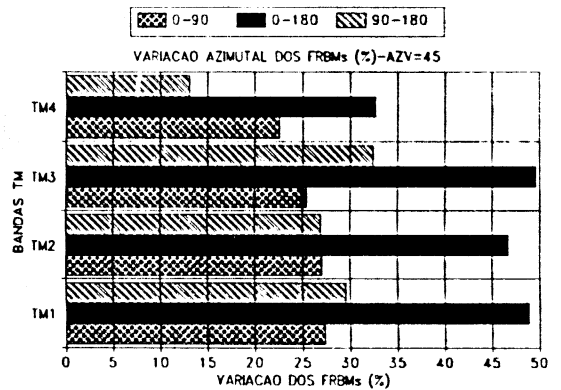
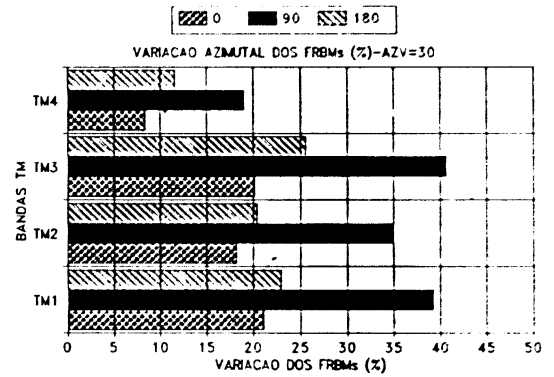
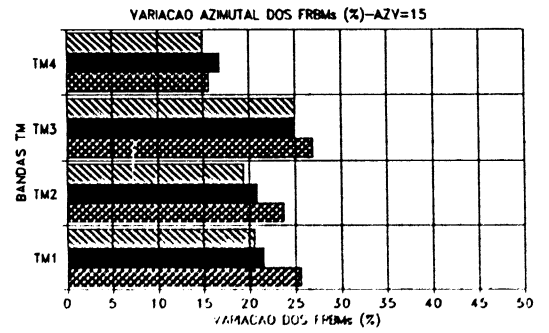


Fig. 4.2 - Variação azimutal relativa dos FRBMs para *B. Brizantha* nos AZV de 15, 30, 45 e 60 graus

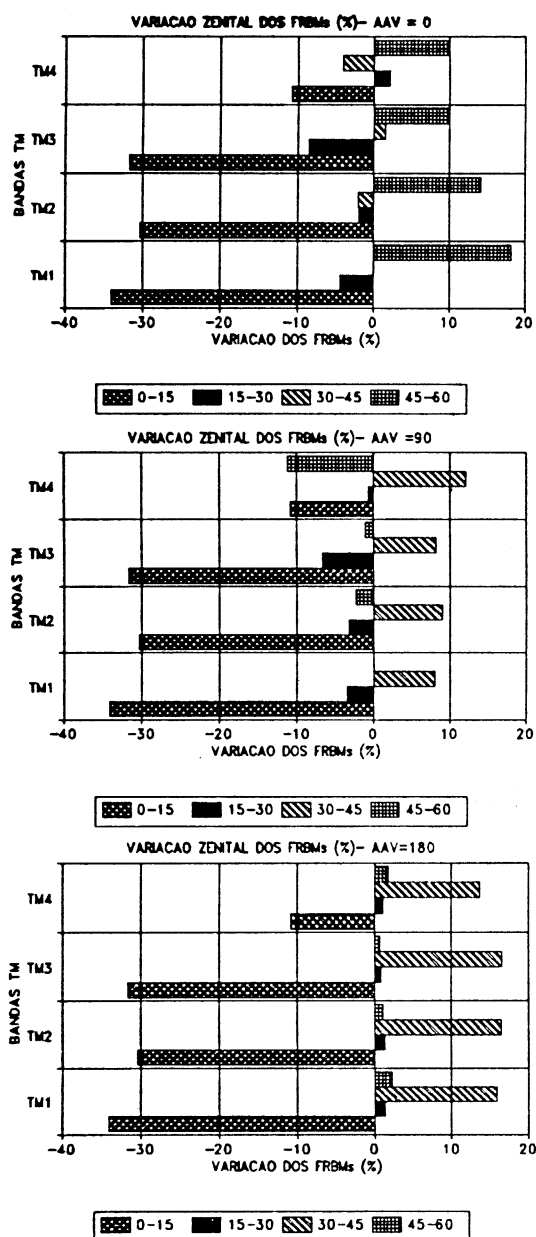


Fig. 4.3 - Variação zenital relativa dos FRBMs para *Brachiaria brizantha* para os AAV de 0°, 90° e 180°.

As maiores variações zenitais ocorreram no AAV de 180° e foram coerentes às encontradas por Goel (1986), Guyot (1984), Kimes (1983), Kimes et al. (1984a), para coberturas completas de gramíneas e estão relacionadas, principalmente ao efeito da EGV conhecido como "efeito 1" (Kirchner et al., 1982). As mínimas reflectâncias ocorreram para visadas na direção do sol (AAV = 0°), ocorrendo valores negativos em relação ao nadir. Segundo Kimes (1984), isto se deve ao efeito aditivo da função de fase: o sensor visa uma alta proporção de faces sombreadas dos componentes da vegetação que não estão expostas à radiação solar direta.

Entretanto, se este fosse o único mecanismo operante, esperar-se-ia o decréscimo da reflectância com a visada na direção do sol, para todos os AZV, o que não aconteceu. Teoricamente conforme Guyot (1984), a reflectância mínima deve ocorrer somente para AZV até 30°, devido ao efeito 1 ser dominante para os AZV maiores. Este desvio da reflectância mínima com o aumento do AZV ocorre para AZS menores que 55°, devido à distribuição do fluxo solar interceptado, como uma função da altura na cobertura ser mais uniforme que em AZV extremos (AZS maiores que 55°) (Kimes, 1983). Assim, o efeito 1 é minimizado para AZV entre 0 e 30°, enquanto o efeito da função de fase na diminuição da reflectância com o aumento do AZV é aparente. Para AZV maiores que 30°, o efeito 1 é maximizado; no entanto, ainda se observa o efeito da função de fase, que incrementa mais os FRBMs no AAV de 180° em relação aos AAV de 0 e 90 graus.

Seguindo esta lógica, deve-se esperar que com o aumento da densidade da vegetação menor será o desvio, desde que se intensifique o efeito 1. Kimes (1983) observou desvios para o mínimo de reflectância para coberturas completas e densas de gramíneas para o vermelho e IVP. Entretanto, embora a cobertura fosse densa, o desvio para o mínimo ocorreu até o AZV de 45°, onde ainda ocorreram valores menores que os do nadir, sugerindo uma maior ação da função de fase. Conforme Kimes (1983), adicionalmente ao efeito da variação na proporção de faces sombreadas (quantidade de sombras), deve-se considerar a intensidade do sombreamento, que é dependente do comprimento de onda. Assim, quanto maior a transmitância menor será o desvio, uma vez que a intensidade de sombreamento será menor. Para as monocotiledôneas, como a gramínea *B. brizantha*, que apresentam mesófilos compactos, há uma maior transmitância para o visível e IVP do que para as dicotiledôneas (mesófilo diferenciado), que possuem pouca superfície de contato entre o ar dos espaços intercelulares e as paredes celulares, o que resulta numa menor frequência na mudança de trajetória da radiação (Knipling, 1970a). Se para uma maior transmitância foliar é esperado um menor desvio, outros componentes da cobertura podem ter influenciado. Um fator adicional que pode estar interferindo é a presença de inflorescências e colmos nas camadas superiores. A associação de componentes verticais e opacos, provoca a maximização da variação azimutal e conseqüentemente do desvio para o mínimo no AAV de 0°, num efeito aditivo da função de fase. Segundo Kimes (1984), quando a reflectância da cobertura é significativamente maior que a sua transmitância, a reflectância mínima ocorre em uma grande extensão, a partir do nadir em direção ao AAV de 0° e 90°.

O que explica os valores dos FRBMs inferiores aos do nadir para todos os AZV, indicando um domínio da função de fase, principalmente para as bandas de absorção do visível, devido às propriedades de transmitância e reflectância da cobertura determinarem a essas bandas uma alta absorção, resultando em um maior desvio relativo. Ainda, para o AAV de 90° a maior influência da função de fase causou uma mínima variação nos FRBMs com o incremento do AZV, devido à redistribuição do fluxo espalhado entre as camadas da cobertura ser mais uniforme neste AAV, sendo o efeito 1 minimizado relativamente aos outros planos azimutais (Kimes, 1984). Estes mesmos mecanismos explicam também as maiores variações azimutais observadas entre os AAV de 0 e 180 graus e as menores entre os AAV de 0 e 90 graus. O menor valor do FRBM do AZV de 60° em relação ao de 45° no AAV de 90° foi determinado por uma conjugação entre o efeito 1 e a função de fase: Segundo o efeito 1, com o aumento do AZV, aumenta a contribuição relativa das camadas superiores (geralmente mais refletoras), em relação aos componentes das camadas inferiores. Ocorre que as camadas superiores da cobertura de *B. brizantha*, além de serem erectófilas, possuem estruturas opacas e bastante refletoras (inflorescências e colmos), que determinam uma maior retro-reflexão e, conseqüentemente, um menor espalhamento múltiplo e distribuição do fluxo nessas camadas, ocorrendo esta queda no fator de reflectância com o incremento do AZV para o AAV de 90°.

A tendência de uma maior variação absoluta e relativa entre os AZV de 30 e 45° nos AAV de 90 e 180 graus, pode ser decorrente da ocorrência dos picos principal e secundário de reflexão próximos ao AZV de 45°, visto que o AZS variou de 45 a 55 graus no período de aquisição. Gerstl (1986); Goel e Grier (1986) e Simmer e Gerstl (1985) também verificaram a ocorrência de uma maior variação da reflectância próximo aos picos principal (AAV de 180°) e secundário (AAV de 90°) de reflexão. Conforme Kimes et al. (1985) a exata posição do pico de reflexão em coberturas vegetais é determinada por uma complexa interação de vários fenômenos, incluindo, o espalhamento anisotrópico do solo, o efeito geométrico da vegetação, a função de fase para uma particular distribuição, orientação e propriedades ópticas e o efeito 1. Para o AAV de 0°, dada a menor amplitude do pico de reflexão, uma maior variação entre os AZV de 45 e 60 graus é esperada, como conseqüência da maior intensidade do efeito 1 nestes AZV extremos, pelos mecanismos físicos já mencionados.

Também as menores variações entre os AZV de 15 e 30 graus, para os AAV de 90 e 180 graus, são conseqüência da minimização do efeito 1, já que este ocorre com menor intensidade entre ângulos zenitais

mínimos. A menor variação entre os AZV de 30 e 45 graus no AAV de 0° é conseqüência do efeito aditivo da função de fase ao efeito 1, a ser explicada para as variações azimutais.

Considerando as variações zenitais em relação às bandas espectrais, uma menor variação relativa zenital e azimutal para a banda TM4 em todos os AAV é esperada, porque a transmitância e a reflectância da vegetação são aproximadamente idênticas nessa banda (cerca de 50% e 45%, respectivamente). Além disso, a reflectância foliar no IVP é relativamente alta, com o espalhamento múltiplo resultando em uma melhor distribuição entre as camadas da cobertura e, conseqüentemente, uma distribuição mais azimutalmente simétrica. Havendo um menor gradiente de interceptação e espalhamento da REM em função das camadas da cobertura, minimiza-se a atuação do efeito 1 (maior controlador das variações zenitais) e a função de fase intensifica-se. No entanto, as menores variações na TM4 ocorreram somente nos AAV de 0 e 180 graus, pois para o AAV de 90° esta banda foi a que mais variou. Esse comportamento deve-se principalmente à já discutida queda do valor do FRBM para o AZV de 60°, visto que esta banda foi a que apresentou a queda mais acentuada (11,16% na TM4 contra os 0,0%, 2,3% e -1,0% que ocorreram respectivamente para a TM1, TM2 e TM3). Este comportamento também foi observado por Barnsley (1984), mas a explicação para este comportamento anômalo do IVP e os mecanismos físicos que atuaram não estão ainda esclarecidos na literatura. Talvez, para este estudo, estejam relacionados às propriedades ópticas dos componentes opacos, que podem ter ocasionado a queda, mas que normalmente afetariam mais os FRBMs da banda do visível, pelo fato de serem fotossinteticamente ativos.

A menor variação relativa para a TM1 no AAV de 90° não foi coerente com a literatura. Para os demais AAV as maiores variações ocorreram no visível, dada a maior intensidade do sombreamento foliar nesta região do espectro, mas incoerentemente foi a banda do TM1 a que mais variou entre as do visível. Para o azul é esperado uma menor variação, dada a tendência de uma maior intensidade do processo de espalhamento atmosférico nesta banda, ocasionar uma melhor distribuição da REM incidente na cobertura e, conseqüentemente, um menor gradiente de interceptação e espalhamento em função das camadas da cobertura (Knipling, 1970; Kimes et al., 1985).

Uma maior variação no vermelho é esperada, pois nessa faixa as folhas absorvem a maioria da radiação incidente (Allen et al., 1969), resultando uma maior intensidade de sombreamento, sem o espalhamento atmosférico observado para o azul. Kimes (1983), Guyot (1984) e Goel e Thompson (1985) observou uma maior variação do vermelho para coberturas completas

de gramíneas. Entretanto, deve-se salientar que a diferença da TM1 em relação às outras bandas do visível foi pequena, com variações zenitais de 4,37% e 0,6% para a TM2 e 2,75% e 1,42% para a TM3; e com variações azimutais de 6,6%, 0,77%, 5,11% e 0,28% em relação à TM2, e de 1,38%, 3,09%, 1,75% e 13,3% em relação à TM3, respectivamente nos AZV de 15, 30, 45 e 60 graus. A menor variação azimutal absoluta e relativa na banda TM4 e as maiores para a banda do visível (na TM1 para o AZV de 15° e na TM3 para o AZV de 30, 45 e 60 graus) foram coerentes, tendo o comportamento explicado pelos mesmos mecanismos atuantes nas variações zenitais.

As variações azimutais foram superiores às zenitais para todos os AZV e AAV, indicando que embora o efeito geométrico da vegetação ("efeito 1") domine sobre os outros mecanismos físicos para as variações zenitais, o efeito aditivo das variações previstas pela "função de fase", como orientação foliar, densidade das camadas e propriedades ópticas, dominou para as variações azimutais e alterou expressivamente a distribuição angular dos FRBMs, principalmente para as bandas do visível. Neste experimento, pelo fato da cobertura ser densa, erectófila e o AZS ser grande (AZS entre 45 e 55 graus) o efeito 1 foi maximizado, porque foi baixa a probabilidade de descontinuidades ("gaps"), ou seja, da radiação penetrar nas camadas inferiores, ficando uma grande proporção de irradiância solar espalhada pelas camadas superiores. Como consequência da maximização do efeito 1 ocorreu uma grande variação entre os valores dos FRBMs obtidos no nadir (AZV=0) e os oblíquos (AZV≠0). As maiores variações no plano paralelo e as menores no perpendicular ao plano solar, foram coerentes com a teoria do efeito 1 e da função de fase, os mecanismos que explicam esses fenômenos.

Nos AAV de 0 e 90 graus, as maiores variações verificadas para os AZV de 45 e 30 graus, respectivamente, são justificadas pela maximização do "desvio para o mínimo" ocorrida nos valores dos FRBMs nestes planos azimutais. A maior variação no AZV de 60° e a menor no de 15° para o AAV de 180° é consequente da amplitude na intensidade do efeito 1 com a variação do AZV, maior para grandes AZV e menor para pequenos AZV.

No AAV de 90° a "queda" da reflectância na TM4 entre os AZV de 45 e 60 graus, ocasionou a menor variação negativa neste azimute. Para a banda do visível todos os valores dos FRBMs foram inferiores aos obtidos no nadir para os AAV de 0 e 90 graus. As maiores variações ocorridas na banda do vermelho e as menores no IVP eram esperadas e já tiveram seus princípios físicos explicados nas teorias do efeito 1 e da função de fase. Conforme Kimes (1984) é esperado que coberturas próximas a erectófilas exibam relativamente

pouca variação na forma geral da distribuição da reflectância, porque o efeito 1 domina fortemente sobre os outros mecanismos. Entretanto, segundo o mesmo autor, análises de sensibilidade da reflectância e transmitância foliar e de outras estruturas da cobertura, demonstraram que variações nesses parâmetros podem alterar significativamente o comportamento azimutal, principalmente nas bandas do visível.

4.5 - RELAÇÃO FUNCIONAL ENTRE A REFLECTÂNCIA BIDIRECIONAL MULTIESPECTRAL OBTIDA NAS DIFERENTES GEOMETRIAS DE VISADA E OS PARÂMETROS BIOFÍSICOS DA VEGETAÇÃO HERBÁCEA EM PASTAGENS COMPOSTAS POR *BRACHYLARIA BRIZANTHA*.

Descreveu-se em nível geral a distribuição dos valores dos coeficientes para as correlações entre os FRBMs obtidos em diferentes geometrias de visada e os parâmetros biofísicos. Em seguida analisaram-se as relações específicas entre os FRBMs e os parâmetros biofísicos que caracterizam a produção, a disponibilidade de componentes, o teor de água e a estrutura geométrica da cobertura de *B. brizantha*. Para tanto, foram calculadas as médias dos valores em módulo dos coeficientes de correlação por AAV, AZV, banda espectral e parâmetro biofísico.

Em geral predominaram valores de coeficientes baixos e positivos, com uma média geral de 0,201. Os maiores valores médios dos coeficientes ocorreram no AAV de 180° (0,245) e os menores no AAV de 0° (0,201), com valores intermediários para o AAV de 90° (0,226).

Considerando as correlações por faixa espectral, a TM4 apresentou o maior valor médio para as correlações (0,254) e a TM3, o menor (0,175), para a maioria dos parâmetros biofísicos, com exceção da FTS(PS), onde se observaram valores médios superiores para a TM3 (0,287) e inferiores para a TM4 (0,225), do MS(PU), com valores superiores na TM4 (0,183) e inferiores com a TM2 (0,141), e do IAF, superior na TM1 (0,163) e inferior na TM4 (0,131).

Os parâmetros biofísicos caracterizadores da produção de fitomassa apresentaram os maiores valores dos coeficientes de correlação, seguidos dos indicadores do teor de água, da disponibilidade dos componentes da fitomassa e do IAF.

Para os AZVs de 45 e 60 graus as variações azimutais foram mais marcantes, resultando em alta variação nos valores dos coeficientes entre os diferentes AAVs e em comportamentos bastante distintos para cada tipo de parâmetro biofísico.

Realizada a descrição em nível geral, analisa-se a seguir, as relações específicas de cada grupo de

parâmetros caracterizadores da fitomassa e os FRBMs obtidos com a variação da geometria de visada.

Produção

Em nível geral, para os parâmetros da produção de fitomassa total, FTT(PU) e FTT(PS), as correlações foram fracas, com valores médios de coeficientes de 0,225 e 0,216, respectivamente. O AAV de 180° apresentou os maiores valores médios dos coeficientes para os valores em peso úmido e seco da fitomassa (0,291 e 0,253), seguido dos AAV de 90° (0,270 e 0,234) e 0° (0,238 e 0,187). Zenitalmente, as maiores correlações ocorreram nos AZVs de 30° para a FTT(PU)(0,269) e de 15° para a FTT(PS)(0,323) e as menores no AZV de 0° para a FTT(PU)(0,055) e a FTT(PS)(0,122). O AZV de 45°, para os AAV de 0 e 90 graus, e o AZV de 60°, para o AAV de 0°, apresentaram um comportamento diferenciado dos demais AZVs, com tendências de correlações inversas. Espectralmente, as melhores correlações para a FTT(PU) e para a FTT(PS) ocorreram para a banda TM4 (0,347 e 0,325) e as piores na TM3 (0,161 e 0,159). Apesar dos baixos valores médios gerais, para determinadas geometrias de visada, observaram-se altos valores de coeficientes para as correlações com a FTT(PU) e FTT(PS).

Os parâmetros FTT(PU) e FTT(PS) tiveram os maiores valores dos coeficientes nas mesmas geometrias de visada, o que é esperado, dada a alta correlação observada entre os pesos úmidos e secos das medidas de fitomassa ($r = 0,880$; $p = 0,000$).

As melhores correlações ocorridas para os AZVs de 30 e 45 graus nos AAVs de 180 e 90 graus, podem estar associadas à maior intensidade da reflectância nestas geometrias de visada, devido à presença dos picos principal (AAV de 180°) e secundário (AAV de 90°) de reflexão para todas as faixas espectrais, que representaram melhor o volume da fitomassa, por apresentarem uma maior sensibilidade à arquitetura e às propriedades ópticas dos constituintes da cobertura conforme Bunnik (1978); Gerstl (1986); Guyot (1984) e Kimes (1983).

Os maiores valores dos coeficientes observados para as correlações na TM4 estão coerentes com os padrões de reflectância do dossel nesta banda, que respondem diretamente à densidade vertical da fitomassa, visto que esta faixa penetra na cobertura, espalha e reflete mais em relação às bandas no visível. Além disso, conjugado aos padrões normais da reflectância do IVP no nadir, o efeito geométrico 1, maximiza a reflectância nesta banda, ampliando os limites assintóticos da reflectância e melhor representando a fitomassa amostrada. Para as bandas TM1 e TM3 eram esperados valores negativos dos coefi-

cientes, dada a alta absorção pela fitomassa nessas faixas (Allen et al., 1968), mas esses só ocorreram no AZV de 45°. Esse comportamento inverso deve-se ao efeito 1, que provoca um aumento da reflectância com o incremento no AZV, principalmente na região do visível (a TM1 e a TM3 apresentaram as maiores variações azimutais, zenitais e em relação ao nadir), devido à menor penetração radiação na cobertura e à maior contribuição relativa das camadas superiores da cobertura, que refletem uma maior quantidade do fluxo solar (Kimes, 1983).

O AZV de 45° nos AAV de 0 e 90 graus e o AZV de 60° no AAV de 0° apresentaram padrões de reflectância distintos dos demais AZVs. Embora a maioria dos coeficientes não tenham sido estatisticamente significativos (somente a banda TM3 no AAV de 90° e AZV de 45°, foi significativo com $r = -0,400$; $p = 0,046$), este comportamento inverso merece atenção. O AZV de 45° nos AAVs de 0 e 90 graus, apresentou valores dos FRBMs inferiores aos obtidos no AZV de 15° (que apresentou valores inferiores ao nadir), devido à maximização do desvio da reflectância mínima, por princípios físicos já explicados e, principalmente, devido à presença de inflorescências, que determinaram esse comportamento atípico, que pode ter subestimado a fitomassa total e ocasionado as relações inversas observadas. Para o AZV de 60° no AAV de 0° os valores dos coeficientes aumentaram, mas não o suficiente para não subestimar a fitomassa, dados os baixos valores dos coeficientes apresentados nesse azimute. O comportamento normal para o AZV de 45° no AAV de 180°, deve-se à alta variação apresentada (as maiores variações azimutais e zenitais para esse azimute), incrementando os valores dos FRBMs e representando melhor as características da fitomassa da cobertura.

Disponibilidade dos Componentes

Em geral, as correlações entre os parâmetros caracterizadores da disponibilidade de componentes apresentaram baixos valores dos coeficientes. Para os parâmetros FTV e FTS, os valores em peso seco apresentaram coeficientes superiores em relação ao peso úmido, observando-se para a FTV, valores de coeficientes de 0,230 e 0,255 e para a FTS, valores de 0,218 e 0,253, respectivamente para os valores em peso úmido e seco desses parâmetros. Os valores dos coeficientes das correlações entre os FRBMs e os componentes da FTV(PU) e FV(PU) ($r = 0,149$) e MV(PU) ($r = 0,210$) foram superiores aos verificados para os componentes da FTS(PU), FS(PU) ($r = 0,137$) e MS(PU) ($r = 0,165$).

Para todos os parâmetros os maiores valores dos coeficientes foram observados para as correlações com

os FRBMs obtidos no AAV de 180° e os menores no AAV de 0°. Considerando os AZVs que apresentaram os maiores e menores coeficientes, houve uma grande variação entre os componentes verdes e secos. A FTV em seus valores em peso úmido e seco, apresentou os maiores coeficientes no AZV de 15° (0,398 e 0,313) e os menores nos AZVs 0° (0,132) e de 45° (0,119). O componente FV(PU) apresentou melhores correlações no AZV de 0° ($r=0,257$) e as piores no AZV de 60° ($r=0,110$) e o componente MV(PU), apresentou as melhores com o AZV de 30° ($r=0,280$) e as piores com o AZV de 0° ($r=0,045$). Já a FTS para seus valores em peso úmido e seco, apresentou melhores correlações com os FRBMs obtidos no AZV de 45° ($r=0,312$ e $0,372$) e as piores com os obtidos no AZVs de 0° ($r=0,147$) e 60° (0,160). O componente FS(PU) correlacionou-se melhor com os FRBMs obtidos no AZV de 45° ($r=-0,208$) e pior com os obtidos no AZV de 0° ($r=0,102$) e o componente MS(PU), melhor com o AZV de 0° ($r=0,290$) e pior com o AZV de 15° (0,088).

A TM4 foi a banda que melhor se correlacionou com os parâmetros FTV(PU) ($r=0,328$) e FTV(PS) ($r=0,298$) e seus componentes FV(PU) ($r=0,185$) e MV(PU) (0,245). Para o parâmetro FTS, a TM4 apresentou melhores correlações com os valores em peso úmido ($r=0,267$) e com os componentes FS(PU) ($r=0,187$) e MS(PU) ($r=0,182$) e a TM3 com os seus valores em peso seco ($r=0,287$). Para a FTV e todos os seus componentes as piores correlações foram com a banda TM3, com valores médios de coeficientes para a FTV(PU) de 0,170, para a FTV(PS) de 0,175, para a FV(PU) de 0,130 e para o MV(PU) de 0,160.

A FTS(PU) e a FS(PU) tiveram as piores correlações com a TM2 ($r=0,177$ e $0,116$, respectivamente).

Já a FTS(PS) e o componente MS(PU) apresentaram correlações mais fracas com a TM4 ($r=0,225$) e com a TM2 ($r=0,141$), respectivamente.

A alta variabilidade verificada para os valores dos coeficientes de correlação ocasionou baixos valores médios, que podem ter mascarado os altos coeficientes ocorridos para determinadas geometrias de visada.

Os maiores coeficientes encontrados para os valores em peso seco para os parâmetros FTV e FTS, devem-se à alta variabilidade verificada para os parâmetros TAFTV (29%) e TAFTS (40%), confirmada pelas fracas correlações entre os parâmetros FTV(PS) e TAFTV ($r=0,077$; $p=0,246$) e entre FTS(PS) e TAFTS ($r=0,350$; $p=0,047$), que causaram uma maior dispersão dos dados biofísicos para os valores em peso úmido. As melhores correlações com os componentes da FTV devem-se à maior sensibilidade espectral às propriedades ópticas dos constituintes fotossinteticamente ativos, principalmente na

região do visível, e às propriedades reflexivas do mesófilo das folhas verdes, para o IVP (Allen, 1969 e Knipling, 1970), que atuam fortemente nos mecanismos físicos da distribuição angular da reflectância. Além disso, a degeneração das propriedades ópticas e reflexivas das folhas ocorre de baixo para cima na cobertura, ficando a FTS concentrada nas camadas inferiores e as folhas e o material verde concentrados nas camadas superiores, que apresentam uma maior contribuição relativa na reflectância da cobertura com o aumento do AZV, principalmente para as bandas do visível e deve ter influenciado as respostas nos AZV oblíquos. Outro fator associado é a maior proporção dos componentes da FTV na cobertura e à menor variabilidade apresentada por esses componentes em relação aos da FTS. De fato, a proporção de FTV é de 79,2% (MV=53,2% e FV=26%) e a de FTS é de 20,8% (MS=7,8% e FS=13,2%) e a variabilidade é de 29% e 34% para a FV e o MV, respectivamente, em relação a 69% e 63%, apresentados pela FS e MS, respectivamente.

Os maiores valores dos coeficientes observados para o AAV de 180° devem-se à ocorrência do pico de reflexão nesse azimute. Os menores valores para o AAV de 0°, devido às mínimas reflectâncias ocorridas para as visadas na direção do Sol, ocasionaram valores negativos em relação ao nadir, uma vez que o sensor visa uma alta proporção de faces sombreadas dos componentes da vegetação que não estão expostas diretamente à irradiância solar direta (Kimes, 1983). Assim, o sinal da vegetação é muito fraco, com ruídos e baixa informação espectral nesse azimute (Gerstl, 1986).

Conforme Kimes (1983) e Kimes (1984), para coberturas completas de gramíneas, com alta densidade de fitomassa, a discriminação dos componentes fotossinteticamente ativos dos não ativos, relacionado às propriedades ópticas dos componentes da fitomassa, em função da variação da geometria de visada, são mais dependentes da atuação dos mecanismos da "função de fase". Tais mecanismos atuam mais fortemente até o AZV de 30°; a partir desse AZV outro mecanismo, o efeito geométrico 1, passa a atuar com maior intensidade. Mais relacionado à Estrutura da Vegetação (EGV) e os efeitos dos parâmetros estruturais DAF, IAF e IC determinam mais a resposta da cobertura. Assim, explicam-se as maiores correlações da FTV e seus componentes com os FRBMs obtidos no AZV de 15 e 30 graus, onde o conteúdo de informação sobre as propriedades ópticas das folhas é superior, e as menores nos AZVs de 45 e 60 graus, onde dominam as informações sobre as características reflexivas da cobertura.

Para a FTS e seus componentes não fotossinteticamente ativos, a informação sobre as propriedades ópticas das folhas é mínima, dada a degeneração das

propriedades reflexivas, devido à despigmentação ocorrida com o processo de senescência foliar. Por outro lado a senescência não ocasiona a perda das propriedades reflexivas, que são devidas à estrutura do dossel e do mesófilo da folha, que são mais atuantes no IVP. Assim, justificam-se as maiores correlações ocorridas para a FTS e FS no AZV de 45° (no pico de reflexão), onde o conteúdo de informação sobre as características reflexivas da cobertura é máximo. Seguindo esta lógica, o AZV de 60° também deveria apresentar boas correlações. Talvez a presença de inflorescências na camada superior da cobertura (a contribuição relativa desta camada é máxima no AZV de 60°) tenha alterado o padrão normal da reflectância. De fato, para o AZV de 60° nos AAV de 0 e 90 graus, ocorreu uma queda da reflectância em relação ao AZV de 45°, enquanto esperavam-se valores superiores, dada a atuação do efeito 1. O parâmetro MS apresentou um comportamento bastante distinto dos demais componentes da FTS, para os valores médios. Entretanto, as geometrias de visadas específicas onde ocorreram as maiores correlações com esse parâmetro foram para os FRBMs obtidos no AZV de 45°, onde teoricamente era esperado.

Espectralmente, eram esperadas melhores correlações entre os componentes da FTV e FTS para as bandas no visível, dada a maior discriminação das propriedades ópticas das folhas verdes e secas nessa faixa, porém somente o parâmetro FTS(PS) apresentou melhores correlações com a TM3, sendo que os demais parâmetros se correlacionaram melhor com a TM4.

Uma explicação para isso está no fato de que a variação na geometria de visada afetou mais os padrões de reflectância no visível, principalmente no vermelho, conferindo-lhes um comportamento inverso ao esperado normalmente. Adicionalmente, as baixas correlações verificadas para os componentes da FTV e da FTS devem-se à menor penetração das bandas no visível na cobertura com a variação da geometria de visada, mais sensíveis às propriedades ópticas da vegetação, não alcançando a FTS, que se concentra mais nas camadas inferiores. Embora o IVP penetre mais na cobertura, esta faixa apresenta menor sensibilidade e discriminação entre constituintes fotossinteticamente ativos e não ativos. Corroborando as afirmações acima, os maiores valores médios dos coeficientes para os parâmetros MS(PU) e FV(PU) foram verificados no AZV de 0°, posição onde o sensor recebe mais o fluxo refletido pelas camadas inferiores da cobertura onde estão concentrados esses componentes. Considerando as geometrias de visada que apresentaram valores máximos dos coeficientes, novamente para a maioria dos parâmetros biofísicos, os maiores valores dos coeficientes foram observados

próximos aos picos principal e secundário de reflexão. Especificamente, a banda TM4 nos AAV de 180 e 90 graus, para os AZVs de 15 e 30 graus apresentaram os maiores coeficientes para os parâmetros FTV(PU), FTV(PS), FV(PU), MV(PU) e o AZV de 45° com os parâmetros FTS(PU), FTS(PS) e MS(PU).

Teor de água

As correlações entre os parâmetros do teor de água da fitomassa e os FRBMs obtidos com a variação da geometria de visada foram fracas, com os parâmetros TAFTT, TAFTV e TAFTS apresentando valores médios dos coeficientes de 0,220, 0,156 e 0,279, respectivamente.

Azimutalmente, os maiores coeficientes foram observados para as correlações com os FRBMs obtidos no AAV de 180° e os menores no AAV de 0°, para todos os parâmetros, com valores médios de (0,259 e 0,245), (0,154 e 0,114) e (0,346 e 0,292), respectivamente para os AAVs de 180 e 0 graus, para os parâmetros TAFTT, TAFTV e TAFTS. Zenitalmente, para o parâmetro TAFTT os maiores valores médios dos coeficientes foram observados para as correlações com os FRBMs no AZV de 30° (0,275) e as piores com os obtidos no AZV de 0° (0,052). Já os parâmetros TAFTV e TAFTS correlacionaram-se melhor com os obtidos no AZV de 15° ($r=0,268$ e $0,476$, respectivamente) e pior com os AZVs de 0°, para o TAFTV ($r=0,052$) e 45°, para o TAFTS ($r=0,105$).

Quanto às correlações por banda espectral, na TM4 ocorreram os maiores valores médios dos coeficientes para todos os parâmetros, com valores de 0,309; 0,196 e 0,323, respectivamente para os parâmetros TAFTT, TAFTV e TAFTS. Os menores coeficientes foram observados na banda TM3 para os parâmetros TAFTT (0,187), TAFTV (0,134) e TAFTS (0,231). Como para as correlações com os parâmetros caracterizadores da produção e disponibilidade de componentes, observou-se um comportamento distinto do AZV de 45° para os AAV de 0 e 90 graus e do AZV de 60° para o AAV de 0°.

Os menores valores para os coeficientes das correlações com as bandas de absorção do visível devem-se ao efeito 1, que aumentando a reflectância com o incremento do AZV, alterou o comportamento inverso esperado na relação dos FRBMs com esses parâmetros. Na TM4 ocorreram as maiores correlações com todos os parâmetros, o que é coerente com a literatura, considerando-se que o desempenho do IVP como estimador do teor de água, seja o resultado da manifestação da alta reflectância que as folhas apresentam nesta faixa do espectro (Allen, 1968; Knippling, 1970a). Neste aspecto, são fundamentais as análises das relações entre os parâmetros carac-

terizadores da produção e disponibilidade dos componentes com os parâmetros do teor de água.

O parâmetro TAFTT apresentou moderadas correlações com a FTT(PS) ($r=0,570$; $p=0,003$), FTV(PS) ($r=0,560$; $p=0,002$) e FTS(PS) ($r=0,670$; $p=0,001$). Ocorreram baixos valores de coeficientes para as correlações entre os parâmetros TAFTV e FTV(PS) ($r=0,077$; $p=0,000$) e entre TAFTS e FTS(PS) ($r=0,350$; $p=0,356$).

Os valores moderados e baixos encontrados podem ser justificados pela alta variabilidade observada nos parâmetros que caracterizam o teor de água (30% para o TAFTT, 29% para o TAFTV e 40% para o TAFTS), e são responsáveis pelos baixos valores encontrados entre os parâmetros e os FRBMs.

Analisando especificamente as geometrias de visada que apresentaram os maiores valores dos coeficientes para os parâmetros caracterizadores do teor de água, nota-se que são similares aos obtidos para os parâmetros correspondentes caracterizadores da fitomassa. Esta similaridade corrobora a dedução de que os mesmos mecanismos operantes para as relações entre os FRBMs e os parâmetros caracterizadores da fitomassa, atuam para os caracterizadores do teor de água.

Índice de Área Foliar (IAF)

As relações entre os FRBMs obtidos nas diferentes geometrias de visada e o IAF não foram claras, predominando valores baixos de coeficientes, com uma média por parâmetro de (0,144).

Os maiores valores médios de correlação ocorreram no AAV de 90° (-0,193), seguido dos AAV de 180° (0,185) e 0° (0,174). O AZV de 45° apresentou as melhores correlações (0,221), seguido pelo AZV de 60° (0,166) e as piores correlações ocorreram nos AZVs de 0° (0,062) e 30° (0,090). Considerando as bandas espectrais, a TM1 e a TM3 apresentaram as maiores correlações ($r=0,163$ e $0,135$, respectivamente) e a TM4, as piores ($r=0,131$). Ocorreram valores de coeficientes significativos somente para as bandas TM1 e TM3 para o AAV de 90° no AZV de 45° ($r=-0,440$; $p=0,040$ e $r=-0,400$; $p=0,048$). Esses coeficientes negativos observados estão coerentes com o comportamento inverso esperado entre a reflectância e o IAF para essas faixas espectrais.

As melhores correlações verificadas para o AZV de 45° podem ser atribuídas à ocorrência dos picos principal (AAV de 180°) e secundário (AAV de 90°) de reflectância ("hot-spot") próximos a este AZV. Conforme Bunnik (1978) e Gerstl (1986), há uma maior sensibilidade da reflectância às alterações na distribuição angular, tamanho e densidade foliar da cobertura no "hot-spot", uma vez que nestes picos há

ausência de sombreamento mútuo das folhas, ou seja, o máximo de área foliar exposta diretamente à irradiância e conseqüentemente, uma maior reflexão.

A ocorrência destes picos e o efeito da "função de fase", que caracteriza a ocorrência da forte retro-reflexão no AAV de 180° , os menores valores no AAV de 0° e valores intermediários no AAV de 90° , conferiram aos AAV de 90° e 180° as melhores correlações e ao AAV de 0° , as piores. Os menores valores no AZV de 0° , devem-se às mínimas reflectâncias que ocorreram nesse AZV, já que para coberturas erectófilas o sensor no nadir visa uma grande proporção de superfície foliar que está aproximadamente paralela ao sensor e sombreada, refletindo pouco na direção do sensor.

Fatores relacionados às características da composição da fitomassa de *B. brizantha*, à técnica convencional de estimativa do IAF utilizada e aos fatores geométricos da variação da geometria de visada, causaram os baixos valores dos coeficientes e os valores negativos para as correlações com a TM2 e a TM4.

A baixa contribuição em peso do parâmetro FV para a FTT (26%) associada à variação na relação do peso por unidade de área foliar ocorrida entre amostras com diferentes FTT, foram as principais causas dos baixos valores. Esses fatores, provocaram uma subestimação, pelas técnicas convencionais, dos parâmetros FV e IAF para as amostras com maior FTT, sendo responsáveis pelos baixos valores e pelos coeficientes negativos observados para a TM2 e a TM4 nos AZV de 15, 45 e 60 graus. Adicionalmente, os efeitos geométricos e as propriedades ópticas da cobertura ("efeito 1" e "função de fase") provocaram uma alteração do comportamento assintótico da reflectância obtida no nadir em relação ao IAF. O efeito 1, aumentando os valores dos FRBMs, ampliou os limites da curva de reflectância para os AAV de 90 e 180 graus e a função de fase, diminuindo-os para o AAV de 0° , reduziu os limites da assíntota, principalmente para a bandas na região do visível. A redução da assíntota com a diminuição dos FRBMs no AAV de 0° , pode ser entendida como uma subestimação do IAF pela variação da geometria de visada, que compensou a subestimação ocorrida pelas técnicas convencionais, justificada pelo fato do AAV de 0° apresentar os maiores valores médios do coeficiente de correlação (-0,121) entre todos os AAV. Embora não estatisticamente significativa, a tendência de valores positivos dos coeficientes no AZV de 30° , podem ser atribuídas à queda na reflectância ocorrida em relação ao AZV de 15° e ao nadir, para os AAV de 0 e 90 graus, subestimando o IAF e à pequena variação azimutal e zenital ocorrida para este zênite no AAV de 180° .

5 - CONCLUSÕES

O comportamento geral observado para as coberturas compostas por *B. brizantha* e *B. decumbens* foi coerente com o observado na literatura para coberturas completas de gramíneas, sendo explicado pela atuação conjunta dos mecanismos físicos "efeito 1" e "função de fase". A coerência observada convalida a metodologia proposta para aquisição dos dados espectrais e a eficiência dos sistemas de controle previstos no planejamento experimental.

Quanto às estratégias adotadas na seleção da geometria de visada, objetivando uma maior representatividade dos dados espectrais, conclui-se que:

- 1- A primeira estratégia adotada, de maximização da variação da resposta espectral da vegetação em função da geometria de visada, foi confirmada pelas maiores variações zenitais dos FRBMs no plano azimutal paralelo ao solar (AAV de 0 e 180 graus).
- 2- A segunda estratégia, de minimização da resposta, também foi confirmada pelas menores variações zenitais observadas no plano perpendicular ao solar (AAV de 90°).

O desvio para o mínimo na reflectância do nadir para os AZVs de 0°, que normalmente ocorre para coberturas de gramíneas completas e erectófilas até o AZV de 30°, para AZS maiores que 55°, como um efeito aditivo da "função de fase" ao "efeito 1", foi acentuado pela presença de inflorescências (componentes opacos) nas camadas superiores da cobertura, ocorrendo valores dos FRBMs inferiores ao nadir até o AZV de 45°, nos AAVs de 0°, para *B. decumbens* e *B. brizantha*, e de 90°, para *B. brizantha*.

As maiores variações zenitais ocorridas entre os AZVs de 30 e 45 graus nos AAV de 180 e 90 graus, para as duas espécies estão associadas a ocorrência dos picos principal (AAV de 180°) e secundário (AAV de 90°) de reflexão próximos a esses AZVs. As maiores variações entre os AZVs de 45 e 60 graus para o AAV de 0° estão relacionadas à maior intensidade do efeito 1 nesse AZV para esse azimute.

A menor variabilidade observada para o AAV de 180° está associada ao domínio do efeito 1, relacionado à EGV, que apresentou uma menor variação no comportamento nesse azimute. A maior variabilidade verificada no AAV de 0° está relacionada à maior variação das propriedades ópticas dos constituintes entre as camadas da cobertura, que ocasionou uma maior atuação da função de fase nesse azimute.

As bandas do visível, principalmente as de absorção, foram as mais influenciadas pela variação da geometria de visada, apresentando uma maior variação azimutal, zenital e em relação ao nadir, enquanto a faixa do IVP (TM4), apresentou as menores variações. Estes

resultados podem estar relacionados à maior intensidade dos mecanismos efeito 1 e, principalmente, da função de fase, no visível em relação ao IVP.

Tanto para *B. brizantha* como para *B. decumbens* não foi verificada a influência do substrato, pelo espalhamento do solo, sendo a distribuição angular dos FRBMs explicados pela interação dos mecanismos físicos com a vegetação. A variação da geometria de visada alterou profundamente as relações normalmente observadas para os FRBMs obtidos no nadir, principalmente nas bandas de absorção no visível, onde verificou-se um comportamento oposto ao do nadir, com o aumento da reflectância com o AZV.

O IVP foi o menos influenciado, devido a menor intensidade dos mecanismos físicos nessa faixa em relação ao visível e à não alteração do comportamento normal da reflectância.

O máximo conteúdo de informação sobre a estrutura geométrica da cobertura está contido no AAV de 180°, que melhor se correlacionou com a maioria dos parâmetros biofísicos, principalmente de produção da fitomassa. As piores correlações do AAV de 0° com todos os parâmetros biofísicos podem estar relacionadas ao comportamento inverso da reflectância (diminuição) com o aumento do AZV. Os maiores coeficientes de correlação ocorridos com a maioria dos parâmetros biofísicos no AZV de 45 estão associados à ocorrência dos picos de reflexão primário (AAV de 180°) e secundário (AAV de 90°) próximos a esse AZV. Os maiores valores médios dos coeficientes verificados para o AZV de 15°, devem-se à menor variação nos valores dos coeficientes em relação aos AZVs maiores e às baixas correlações para as bandas do visível, principalmente as de absorção, para os AZVs maiores, que apresentaram um comportamento oposto aos de AZV menores. A ocorrência de menores valores médios nos AZVs de 0 e 30 graus, relaciona-se à maior variabilidade amostral verificada nesses AZVs, que ocasionou uma maior dispersão dos dados e piores correlações.

Os parâmetros caracterizadores da produção e do teor de água da fitomassa apresentaram as melhores correlações, principalmente por estarem mais relacionados à faixa do IVP, que apresentou as maiores correlações. Os baixos valores dos coeficientes verificados para os parâmetros caracterizadores da disponibilidade de componentes e para o IAF, são justificados pelo comportamento oposto ao normalmente observado para as faixas de absorção do visível com o aumento do AZV. Associado a este fator, a maior variabilidade amostral para os componentes da fitomassa ocasionou uma maior dispersão dos dados. Para o IAF, a variação na relação entre o peso e a área foliar, ocasionou uma subestimação desse parâmetro

para as amostras com maior fitomassa, também prejudicando as correlações.

A análise das correlações entre os FRBMs obtidos com diferentes geometrias de visada e os parâmetros biofísicos possibilita uma seleção da geometria de visada e das faixas espectrais, que permitam a extração de um maior conteúdo de informação à partir dos dados angulares, muito úteis em reduzir o número de observações requeridas para caracterizar a FDRB de superfícies. Isto pode ser essencial para observações por satélite, visto que a partir de plataformas remotas, somente poucos ângulos de visada podem ser utilizados.

O aumento da representatividade amostral observada com o incremento do AZV, confere além de informação adicional sobre os aspectos geométricos da cobertura, uma melhor qualidade da informação quando comparada à obtida no nadir.

O efeito geométrico da cobertura ("efeito 1"), mecanismo que controla as diferentes contribuições relativas das camadas inferiores e superiores da cobertura, foi o mecanismo dominante na configuração da distribuição angular dos dados espectrais, mas teve seus efeitos alterados pelas diferenças estruturais (DAF, IAF e sombras), em composição (densidade de vegetação e disponibilidade dos componentes) e nas propriedades ópticas (folhas jovens nas camadas superiores, folhas desenvolvidas nas camadas inferiores, presença de inflorescências nas camadas superiores), entre as camadas da cobertura. Tais alterações relacionadas à atuação do efeito de "função de fase" conferem a esse efeito uma maior importância relativa na distribuição da reflectância, do que a normalmente considerada na literatura para coberturas homogêneas e completas. Assim, há necessidade de maiores estudos desse efeito, com uma estratificação das características da cobertura e análises de sensibilidade na reflectância e transmitância de seus componentes.

6 - REFERÊNCIAS

Allen, W.A.; Gausman, H.W.; Richardson, A.J. ; Thomas, J.P. Interaction of isotropic light with a compact plant leaf. *Journal of Optical Society of America*, 59:1376-1379, 1969.

Barnsley, M.J. The implication of view angle effects on the use of multispectral data for vegetation studies. In: INTERNATIONAL CONFERENCE HELD IN SILSOE: THE APPLICATION OF REMOTE SENSING TECHNIQUES TO AID RANGE MANAGEMENT, 9. Silsoe, Bedford, U.K., 21-23 Sep., 1983. Proceedings. Remote Sensing Society. University of Reading. England. 1983.

Barnsley, M.J. Effects of off-nadir view angles on the detected spectral response of vegetation canopies. *International Journal of Remote Sensing*, 5(4):715-728, Jul. Aug., 1984.

Batista, G.T.; Rudorff, B.T.F.; Oviedo, A.P.F. Resposta espectral da soja e sua relação com parâmetros agrônômicos. IN: ANAIS DO 5º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Natal-RN, 11 a 15 de outubro, 1988. p.407-413.

Bunnik, N.J.J. The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relations with their morphological and optical properties. Thesis. medelingen. landbouwhogeschool, Wageningen 78-1. 176 pp, 1978.

Chandrasekhar, S. Radiative transfer. New York, Dover Publications, 1960.

Formaggio, A.R. Características agrônômicas e espectrais para sensoriamento remoto de trigo e de feijão. ESALQ/USP, Piracicaba, 1989. 161 p. (Tese de Doutorado).

Formaggio, A.R.; Epiphanyo, J.C.N. Estudos radiométricos das culturas de trigo e de feijão em três tipos de latossolos. IN: ANAIS DO 5º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Natal-RN, 11 a 15 de outubro, 1988. p. 393-399.

Formaggio, A.R.; Epiphanyo, J.C.N. Características espectrais de culturas e rendimento agrícola. INPE, São José dos Campos, 1990, 167p. INPE-5125-RPE/630.

Gerstl, S.A.W.; Simmer, C. Remote sensing of angular characteristics of canopy reflectances, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23(5):648-658, Sep., 1986.

Goell, N.S.; Thompson, R.L. Optimal solar/viewing geometry for an accurate estimation of leaf area index and leaf angle distribution from bidirectional canopy reflectance data. *International Journal of Remote Sensing*, 6(9):1493-1520, Sep., 1985.

Guyot, G. Angular and spatial variability of spectral data in the visible and near infrared. COLL. INTERNATIONAL SIGNATURES SPECTRALES D'OBJETS EN TÉLÉDÉTECTION, 2. Bordeaux, 12-16 Sep., 1983. Ed INRA Publ., 1984 (Les Colloque de l'INRA, n° 23).

Kimes, D.S.; Markhan, B.L.; Tucker, C.J.; Mc-Murtrey III, J.E. Temporal relationships between spectral response and agronomic

- variables of a corn canopy. *Remote Sensing of Environment*, 11 :401-411. 1981.
- Kimes, D.S. Dynamics of directional reflectance factor distributions for vegetation canopies. *Applied Optics*, 22(9): 1364-1372, 1983.
- Kimes, D.S.; Holben, B.N.; Tucker, C.J.; Newcomb, W.W. Optimal directional view angles for remote sensing missions. *International Journal of Remote Sensing*, 5(6):887-903. Nov. Dec., 1984a.
- Kimes, D.S.; Kirchner, J.A. Diurnal variations of vegetation canopy structure. *International Journal of Remote Sensing*, 4(2):257-271, Apr., 1984.
- Kimes, D.S. Modeling the directional reflectance from complete homogeneous vegetation canopies with various leaf-orientation distributions. *Optical Society of America*, 1(7):725-737. 1984.
- Kimes, D.S.; Norman, J.M.; Walthall, C.L. Modeling the radiant transfer of sparse vegetation canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. GE-23 (5):695-704, 1985.
- Kirchner, J.A.; Kimes, D.S.; McMurtrey III, J.E. Variation of directional reflectance factors with structural changes of a developing alfalfa canopy. *Applied Optics*, 21:3766-3774. 1982.
- Knipling, E.B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment* 1 (2): 155-159. 1970a.
- Morelli, A.F. *Influência da geometria de visada na reflectância espectral de duas gramíneas forrageiras*. São José dos Campos, INPE, 1993. (no prelo)
- NASA. From Pattern to Process: The strategy of the Earth Observing System. EOS Science Steering Committee. Report V.II. 1990
- Pereira, M.D.B. *Correlação da fitomassa foliar de campo cerrado com dados espectrais obtidos pelo sistema MSS/LANDSAT e por radiometria de campo*. São José dos Campos, INPE, 1986 (INPE-3758-TDL/205).
- Santos, J.R. *Biomassa aérea da vegetação do Cerrado: estimativa e correlação com dados do sensor "Thematic Mapper" do satélite Landsat*. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. 1988. Tese de Doutorado em Ciências Florestais.
- Steffen, C.A. *SPECTRON SE - 590 - Manual de Referência*. INPE. DSR. DPA - LARAD. 1988.
- Suits, G.H. The cause of azimuthal variations in directional reflectance of vegetative canopies. *Remote Sensing of Environment*. 2():175-182, 1972.
- Valeriano, D.M. *Interações da radiação solar com a vegetação*. São José dos Campos, INPE, 1988. (INPE-4697-MD/038).
- Valeriano, D.M.; Pereira, M.D.B. *Relações entre a biomassa aérea do estrato rasteiro do cerrado e sua reflectância espectral*. São José dos Campos, INPE, 1988 (INPE-4848-PRE/1477).