

AVALIAÇÃO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E DE BANDAS TM/LANDSAT PARA ESTIMATIVA DE VOLUME DE MADEIRA EM FLORESTA IMPLANTADA DE *PINUS SPP.*

Claudia Linhares de Sousa
Flávio Jorge Ponzoni

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Av. dos Astronautas 1758 - 12227-010 - São José dos Campos - SP - Brasil
{linhares, flavio}@ltid.inpe.br

Abstract: TM/Landsat bands and some vegetation indices were investigated to evaluate their sensitivity on detecting timber volume changes and their relationships with this forest parameter. Timber volume were obtained from traditional forest inventory, for mature and dense *Pinus spp.* stands, before and after thinning procedures. ANOVA's were applied for each variable to identify significant differences, always considering two treatments: before and after thinnings. Regression models were also defined to analyze the relationships between orbital and timber volume data. The results showed that timber volume changes can be detected by reflectance values at middle infrared wavelenghts (TM 5 e 7) and by Greenness & Brightness Kauth-Thomas values. The vegetation indices usually applied to estimate green biomass were not appropriate to assess timber volume and two new indices were proposed: Moisture Vegetation Index (MVI) and Green NDVI (GNDVI).

Key words: Timber volume, vegetation indices.

1. Introdução

As técnicas de Sensoriamento Remoto (SR) têm sido amplamente utilizadas em estudos e aplicações na área florestal, destacando-se os projetos que visam a quantificação de biomassa florestal, com o objetivo de conhecer a efetiva contribuição do Brasil nas emissões de CO₂ na atmosfera, devido à utilização/destruição de seus recursos naturais, sobretudo na região amazônica. Para estudos da cobertura vegetal, além dos tradicionais mapeamentos que discretizam a vegetação em classes fisionômicas, ênfase tem sido dada à quantificação de parâmetros biofísicos e às relações existentes entre eles. Os parâmetros biofísicos caracterizam a arquitetura de um dossel e incluem a biomassa (peso seco por unidade de área) e o Índice de Área Foliar (IAF).

Estimativas de biomassa florestal através de SR podem ser realizadas mediante a utilização de dados coletados em níveis de campo, aeronave ou orbital. Em qualquer um destes níveis, tem sido explorada, entre outras, a relação entre IAF e biomassa. O IAF é um importante parâmetro biofísico da vegetação, sendo definido como a área foliar total projetada por unidade de área de terreno (m²/m²) (Daughtry, 1990; Gower e Norman, 1991; Curran et al., 1992). Sua importância deve-se à relação com a biomassa vegetal (Goel, 1989) e por caracterizar a arquitetura do dossel, justificando a diversidade de estudos em SR envolvendo estimativas deste parâmetro. Estas estimativas permitem uma avaliação das condições fisionômicas e fisiológicas dos dosséis (Asrar et al., 1989) e análises quantitativa e qualitativa das trocas energia/matéria ocorridas nos mesmos (Curran et al., 1992; Gong et al., 1992).

O uso de dados orbitais constitui-se em um método indireto e não destrutivo para estimativa do IAF. A radiação espectral refletida pelos dosséis é influenciada, além dos parâmetros

biofísicos, por outros relacionados às geometrias de iluminação e de visada e pelas propriedades espectrais dos elementos da vegetação que os constitui (folhas, galhos, troncos, entre outros). De maneira geral é esperado que quanto maior o IAF, menor o valor de radiância espectral referente às regiões do visível (380 a 720 nm) e do infravermelho médio (1300 a 3000 nm), devido à maior disponibilidade de pigmentos fotossintetizantes absorvendo Radiação EletroMagnética (REM) incidente e quantidade de água, respectivamente, e maior valor na região do infravermelho próximo (720 a 1300 nm), devido ao maior espalhamento múltiplo entre folhas (Curran et al., 1992). Baseado nisso, foram desenvolvidos os índices de vegetação, gerados a partir dos valores de radiância refletida nas bandas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo, cuja relação com o IAF têm sido demonstrada por diversos estudos. Os índices exploram o contraste existente entre estas duas regiões espectrais no que diz respeito à radiância refletida pela vegetação.

Dentre estes índices de vegetação, o “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI) desenvolvido por Rouse et al. (1974), é o mais conhecido e utilizado para estudos de caracterização e monitoramento da vegetação. Segundo Huete (1988), juntamente com o “Ratio Vegetation Index” (RVI), consistem nos dois *índices de razão* mais difundidos. Existem também os chamados *índices ortogonais*, que representam a distância ortogonal entre um ponto correspondente à reflectância do dossel até a linha de solo, podendo-se citar o “Difference Vegetation Index” (DVI) (Tucker, 1979) e o “Weighted Vegetation Index” (WDVI) (Clevers, 1989). Com o uso desses índices, percebeu-se a necessidade de um índice que considerasse a resposta do solo, a qual poderia ser dominante sobre a resposta da vegetação, dependendo da porcentagem de cobertura. Visando amenizar esse efeito de solo, foi criado o “Soil-Adjusted Vegetation Index” (SAVI) (Huete, 1988), que se baseia no princípio de que a curva de vegetação tende a aproximar-se da curva de solo para baixas densidades de vegetação, passando por uma mistura de respostas espectrais para densidades médias e quase nenhuma influência do solo para densidades altas de vegetação. O SAVI consiste na própria fórmula do NDVI, acrescida de uma constante L, que varia de 0 a 1, dependendo do grau da maior ou menor cobertura do solo, respectivamente. Em seguida vieram duas modificações do SAVI: o “Transformed SAVI” (TSAVI) (Baret et al., 1989) e o “Modified SAVI” (MSAVI) (Qi et al., 1994). Outra necessidade que surgiu com o uso dos índices, foi de considerar a influência da atmosfera na resposta da vegetação, que altera os valores dos índices. Assim, foram desenvolvidos alguns índices que visam corrigir ou minimizar os efeitos atmosféricos, dentre eles o ARVI (“Atmospherically Resistant Vegetation Index”) e o GEMI (“Global Environment Monitoring Index”), que serão abordados neste trabalho. O ARVI é uma modificação do NDVI e foi proposto por Kaufman e Tanré (1992) para ser utilizado a partir dos dados do MODIS/EOS, com o objetivo de minimizar os efeitos atmosféricos a que está sujeita a banda do vermelho. Assim, é utilizada a diferença entre a radiância refletida no vermelho e no azul, para corrigir a radiância no vermelho e estabilizar o índice quanto à variações da composição da atmosfera (Huete et al., 1997). O ARVI mostrou ser quatro vezes mais sensível à atmosfera que o NDVI, sendo favorável aos estudos envolvendo áreas completamente cobertas por vegetação, cuja influência dos efeitos atmosféricos são maiores que para solos. O GEMI é um índice não-linear de vegetação, que também visa minimizar os efeitos atmosféricos em estudos de monitoramento global da vegetação, usando dados AVHRR/NOAA (Pinty e Verstraete, 1992).

Apesar da viabilização destes produtos (Imagens-Índice), suas sensibilidades quanto à quantificação da biomassa florestal são ainda pouco conhecidas, principalmente em ambiente de floresta heterogênea. Nestas, a análise das relações entre imagens e biomassa é bastante dificultada devido à grande diversidade florística, fisionômica e fenológica, à pouca disponibilidade de dados quantitativos de biomassa coletados em nível de campo, bem como daqueles de SR, devido a problemas das mais variadas ordens, que incluem cobertura de nuvens, periodicidade das imagens coincidente com levantamentos de dados em campo, por exemplo. Desta forma, as florestas implantadas apresentam algumas vantagens por serem constituídas por pelo menos um gênero cobrindo extensas áreas, serem inventariadas regularmente quanto ao estado fitossanitário, volume de madeira, realização de técnicas de manejo florestal, entre outros. Dentre estas técnicas de manejo florestal que promovem alterações na quantidade de biomassa florestal, destacam-se as técnicas de desbastes, que são aplicadas com objetivos bem definidos e que são viabilizadas mediante o conhecimento do estoque de biomassa florestal, expressa comumente por volume de madeira (m^3/ha), antes e depois da retirada de material lenhoso. A disponibilidade dessa informação viabiliza o estudo das sensibilidades mencionadas acima, gerando conhecimentos e possibilitando possíveis aplicações tanto em áreas de florestas naturais (monitorando sua devastação), como de florestas implantadas (monitorando seu crescimento e desbastes).

O objetivo deste trabalho consistiu em avaliar a sensibilidade das bandas TM/Landsat e dos índices de vegetação mencionados anteriormente na detecção de alterações no volume de madeira em plantios adultos e densos de *Pinus spp.*, decorrentes da realização de desbastes, visando fornecer uma possível metodologia para estimativa deste parâmetro dendrométrico a partir de dados orbitais.

2. Material e Métodos

A área de estudo consiste na Fazenda Monte Alegre, de propriedade da DURAFLOA S.A., localizada no município de Agudos/SP, imediatamente a nordeste da mancha urbana desta cidade. Encontra-se delimitada pelos paralelos $22^{\circ}21'$ e $22^{\circ}28'$ de latitude sul e pelos meridianos $48^{\circ}48'$ e $48^{\circ}59'$ de longitude oeste, aproximadamente. A área total da fazenda é de 13.580,79 ha ($135,81 \text{ km}^2$) e sua altitude média é de 628 m. Esta fazenda é constituída, em sua maioria, por plantios das seguintes espécies: *Pinus caribea* var. *bahamensis* (PCB), *Pinus caribea* var. *caribea* (PCC), *Pinus caribea* var. *hondurensis* (PCH), *Pinus elliottii* var. *elliottii* (PEE) e *Pinus oocarpa* var. *oocarpa* (POO). A localização da área de estudo e dos municípios vizinhos no contexto estadual podem ser visualizados na **Figura 1**.

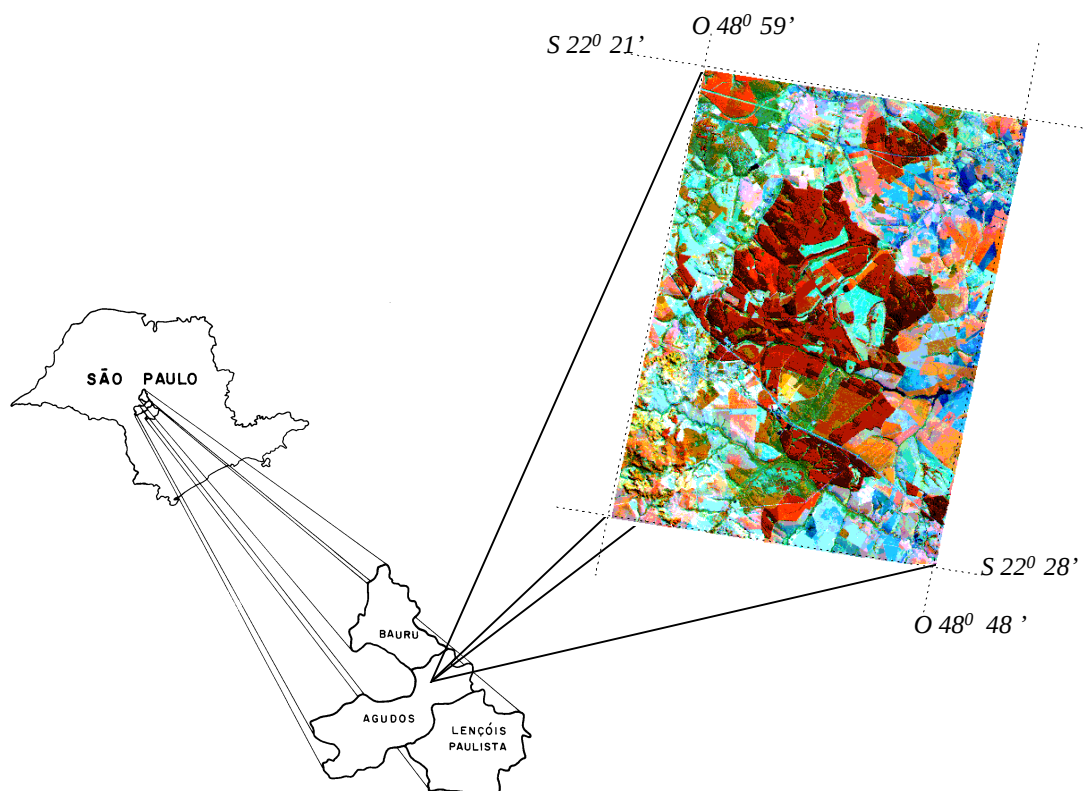


Figura 1 - Localização da área de estudo e dos municípios vizinhos no estado de São Paulo.

Para a análise proposta neste trabalho, foram considerados dados de volume de madeira, obtidos a partir de inventários florestais tradicionais realizados pela empresa, antes e depois da aplicação de desbastes nos talhões, entre os anos de 1992 e 1995. A saída de um determinado volume de madeira por ocasião do desbaste acarreta uma nova condição do talhão, no que diz respeito à biomassa do mesmo. Sendo as duas situações, antes e depois do desbaste, significativamente diferentes, dados orbitais podem ser analisados quanto à sensibilidade em detectar estas diferenças. Os dados orbitais consistiram em uma série temporal de imagens digitais do satélite Landsat 5, órbita/ponto 221/76 B (-2''), imediatamente anteriores e posteriores às datas dos desbastes. As mesmas foram convertidas em imagens reflectância e em seguida retificadas radiometricamente, segundo metodologia proposta por Hall et al. (1991), por se tratarem de imagens multitemporais passíveis de diferenças radiométricas quanto à calibração dos sensores e efeitos atmosféricos. Foram extraídos os valores de reflectância nas bandas TM 1 a TM 5 e TM 7, dos talhões de interesse, a partir dos quais foram gerados diversos índices de vegetação: NDVI, RVI, SAVI, considerando $L=0,5$ (mais usual, para dosséis médios) e $L=0,25$ (para dosséis densos), MSAVI, TSAVI, DVI, WdVI, GEMI, ARVI e Razões Simples. O objetivo de escolher vários índices de vegetação, que consideram diferentes aspectos (solo e atmosfera, por exemplo), foi comparar seus desempenhos e suas sensibilidades e identificar uma explicação para possíveis diferenças entre eles. Além dos índices de vegetação, foram geradas imagens "Greenness" (GR) e "Brightness" (BR) (Kauth e Thomas, 1976), das quais foram extraídos seus valores separadamente e realizada uma Razão Simples BR/GR. Para os índices que exigiam os parâmetros α e β da curva de solo, as médias de reflectância nas bandas TM 3 (vermelho) e TM 4 (infravermelho próximo)

de dez diferentes tipos de solos na área de estudo foram obtidas diretamente da imagem para a geração da curva de solo.

Na análise estatística, foram utilizados dois procedimentos principais: análises de variância (ANOVA's) e modelos de regressão linear simples. As ANOVA's foram aplicadas a 10% de probabilidade, para cada uma das variáveis estudadas, considerando-se dois tratamentos (antes e depois do desbaste), cada um com 52 repetições (talhões). Cada talhão foi considerado como uma unidade amostral de um experimento inteiramente casualizado. O objetivo foi identificar a ocorrência de diferenças estatísticas entre os dois tratamentos, que indicariam a sensibilidade da variável em questão para a saída de volume de madeira. Os dados de volume e os dados orbitais foram inseridos, dois a dois, em modelos de regressão linear simples, para estabelecimento das equações e dos valores R, que indicaram o grau de correlação entre as variáveis.

3. Resultados e Discussão

A realização de desbastes acarretou uma diminuição no volume de madeira dentro dos talhões, que foi significativa a 90%, segundo resultado da ANOVA (**Tabela 1**), ou seja, o volume anterior ao desbaste foi estatisticamente diferente do posterior.

Tabela 1 - ANOVA aplicada ao volume.

VOLUME	SQ	gl	QM	F
<i>Tratamento</i>	69784,962	1	69784,962	30,557*
<i>Resíduo</i>	232947,192	102	2283,796	
<i>Total</i>	302732,153	103		

* - significativo a 10% de probabilidade

Baseado neste fato, as bandas TM, os índices de vegetação e os valores GR e BR foram avaliados quanto à sua sensibilidade em detectar esta diferença de volume. Iniciando com os valores de reflectância, observa-se na **Tabela 2**, que as bandas sensíveis à diminuição do volume de madeira foram TM 2 (verde), TM 5 e TM 7 (ambas infravermelho médio). As bandas TM 3 (vermelho) e TM 4 (infravermelho próximo), geralmente utilizadas para levantamento de biomassa, não foram sensíveis à essa diferença.

Tabela 2 - ANOVA's aplicadas às bandas TM/Landsat.

TM 1	SQ	gl	QM	F	TM 2	SQ	gl	QM	F
<i>Tratamento</i>	0,991	1	0,991	2,108 ^{ns}	<i>Tratamento</i>	0,887	1	0,887	3,853*
<i>Resíduo</i>	47,967	102	0,470		<i>Resíduo</i>	23,486	102	0,230	
<i>Total</i>	48,958	103			<i>Total</i>	24,373	103		
TM 3	SQ	gl	QM	F	TM 4	SQ	gl	QM	F
<i>Tratamento</i>	0,016	1	0,016	0,150 ^{ns}	<i>Tratamento</i>	4,169	1	4,169	1,457 ^{ns}
<i>Resíduo</i>	10,779	102	0,106		<i>Resíduo</i>	291,882	102	2,862	
<i>Total</i>	10,795	103			<i>Total</i>	296,051	103		
TM 5	SQ	gl	QM	F	TM 7	SQ	gl	QM	F
<i>Tratamento</i>	7,753	1	7,753	6,054*	<i>Tratamento</i>	5,269	1	5,269	11,147*
<i>Resíduo</i>	130,637	102	1,281		<i>Resíduo</i>	48,208	102	0,473	
<i>Total</i>	138,391	103			<i>Total</i>	53,476	103		

* - significativo a 10% de probabilidade

ns - não significativo a 10% de probabilidade

Lembrando que as bandas do visível estão relacionadas com atividade fotossintética (quantidade de pigmentos); a do infravermelho próximo, com a estrutura do dossel e as do infravermelho médio, com o conteúdo de água nas folhas (Kumar, 1972), algumas possibilidades podem ser discutidas. A área estudada consiste em uma floresta implantada, homogênea sob os aspectos fisionômico e florístico. Acredita-se que a saída de um determinado número de árvores, e consequentemente de volume de madeira e de biomassa foliar, causaria, predominantemente, a retirada de pigmentos fotossintetizantes e de água. Isso explicaria a sensibilidade da banda TM 2, que sendo do visível, teria sido sensível à diminuição de pigmentos; e das bandas TM 5 e TM 7 relativas ao infravermelho médio, que respondem pelo conteúdo de água, que foram sensíveis à diminuição de biomassa. A sensibilidade da banda TM 5 às alterações de volume já havia sido relatada por Ardö (1992), Olsson (1994), Gemmel (1995) e Nilson e Olsson (1995). A insensibilidade da banda TM 4 pode ser explicada pelo fato de estarem sendo retiradas várias folhas do interior do dossel, em detrimento às alterações arquitetônicas do mesmo, tais como eliminação de estratos verticais, mudanças significativas no espaçamento dos indivíduos, etc. Tais alterações exerceriam efeito sobre os valores de reflectância dos pixels na banda TM 4, as quais não se verificaram. Provavelmente, este comportamento não ocorre em florestas heterogêneas, de grande diversidade florística e arquitetura complexa. Nestas, a retirada de indivíduos dominantes ou de uma mesma espécie, por exemplo, podem alterar a copa e a arquitetura interna deste dossel, respectivamente, alterando seu brilho nas imagens orbitais e, consequentemente, seus valores de reflectância e dos índices de vegetação.

Também foram analisados os valores de “Greenness” e de “Brightness”, originários do espaço bidimensional de Kauth e Thomas (“Tasselled Cap”) (1976), quanto à sensibilidade à diminuição de madeira, e a razão simples BR/GR. A análise de variância destas três variáveis mostrou que todas foram sensíveis à saída de madeira, apresentando valores anteriores aos desbastes estatisticamente diferentes dos posteriores, a 90% de probabilidade. Assim, os valores de Greenness ou a razão simples BR/GR mostraram-se passíveis de utilização para detectar alterações no volume de madeira, para este tipo de floresta implantada (**Tabela 3**).

Tabela 3 - ANOVA's aplicadas aos valores de Greenness e Brightness.

GREENNESS	SQ	gl	QM	F	BRIGHTNESS	SQ	gl	QM	F
<i>Tratamento</i>	386,425	1	386,425	12,412*	<i>Tratamento</i>	105,864	1	105,864	4,693*
<i>Resíduo</i>	3175,542	102	31,133		<i>Resíduo</i>	2300,688	102	22,556	
<i>Total</i>	3561,967	103			<i>Total</i>	2406,553	103		
BR/GR	SQ	gl	QM	F					
<i>Tratamento</i>	0,028	1	0,028	11,829*					
<i>Resíduo</i>	0,238	102	0,002						
<i>Total</i>	0,266	103							

* - significativo a 10% de probabilidade

Analisando os resultados das ANOVA's para os índices de vegetação, percebe-se que nenhum deles foi sensível à saída de madeira (**Tabela 4**), fato que pode ser explicado pelos resultados obtidos anteriormente, i.e., a insensibilidade das bandas TM 3 e TM 4. Todos os índices aqui analisados utilizam estas duas bandas em suas fórmulas, sendo coerente que também não fossem sensíveis às alterações daquele parâmetro dendrométrico.

Tabela 4 - ANOVA's aplicadas aos índices de vegetação.

NDVI	SQ	gl	QM	F	RVI	SQ	gl	QM	F
<i>Tratamento</i>	0,001	1	0,001	0,306 ^{ns}	<i>Tratamento</i>	0,001	1	0,001	0,313 ^{ns}
<i>Resíduo</i>	0,278	102	0,003		<i>Resíduo</i>	0,175	102	0,002	
<i>Total</i>	0,278	103			<i>Total</i>	0,175	103		
SAVI (L=0,5)	SQ	gl	QM	F	SAVI (L=0,25)	SQ	gl	QM	F
<i>Tratamento</i>	0,001	1	0,001	1,054 ^{ns}	<i>Tratamento</i>	0,002	1	0,002	0,800 ^{ns}
<i>Resíduo</i>	0,113	102	0,001		<i>Resíduo</i>	0,207	102	0,002	
<i>Total</i>	0,114	103			<i>Total</i>	0,209	103		
MSAVI	SQ	gl	QM	F	TSAVI	SQ	gl	QM	F
<i>Tratamento</i>	0,001	1	0,001	1,176 ^{ns}	<i>Tratamento</i>	0,000	1	0,000	0,754 ^{ns}
<i>Resíduo</i>	0,100	102	0,001		<i>Resíduo</i>	0,006	102	0,000	
<i>Total</i>	0,101	103			<i>Total</i>	0,006	103		
GEMI	SQ	gl	QM	F	ARVI	SQ	gl	QM	F
<i>Tratamento</i>	0,002	1	0,002	1,265 ^{ns}	<i>Tratamento</i>	0,034	1	0,034	2,181 ^{ns}
<i>Resíduo</i>	0,122	102	0,001		<i>Resíduo</i>	1,609	102	0,016	
<i>Total</i>	0,123	103			<i>Total</i>	1,643	103		
WDVI	SQ	gl	QM	F	DVI	SQ	gl	QM	F
<i>Tratamento</i>	0,000	1	0,000	1,059 ^{ns}	<i>Tratamento</i>	0,000	1	0,000	1,271 ^{ns}
<i>Resíduo</i>	0,031	102	0,000		<i>Resíduo</i>	0,029	102	0,000	
<i>Total</i>	0,032	103			<i>Total</i>	0,030	103		
PVI	SQ	gl	QM	F					
<i>Tratamento</i>	0,001	1	0,001	1,311 ^{ns}					
<i>Resíduo</i>	0,102	102	0,001						
<i>Total</i>	0,103	103							

ns - não significativo a 10% de probabilidade

Considerando-se os resultados encontrados pela aplicação das ANOVA's para as bandas TM e para os índices de vegetação, quais sejam, a sensibilidade das bandas TM 2, TM 5 e TM 7 para alterações no volume de madeira em plantios comerciais, dois novos índices foram testados e são aqui propostos como alternativas para futuros estudos que envolvam estimativas deste parâmetro. Tomando-se a fórmula básica do NDVI, que atualmente é o índice de vegetação mais utilizado e difundido nos estudos de SR, primeiramente foi testada a troca da reflectância na banda TM 3, que não foi sensível para alterações do volume de madeira, pela reflectância na banda TM 2. Esta nova formulação mostrou ser sensível à alterações de volume, assim como a Razão Simples utilizando essas mesmas bandas (TM 2 e TM 4) (**Tabela 5**). Este novo índice foi denominado **Green NDVI** (GNDVI) e continua utilizando uma banda do infravermelho próximo e uma do visível, entretanto a mais sensível delas, a TM 2. O princípio do NDVI é explorar a grande diferença existente entre as reflectâncias nestas duas bandas e, ainda, seu comportamento inversamente proporcional. Com o aumento da vegetação, há um aumento da reflectância na banda do infravermelho próximo, devido ao maior espalhamento da REM, e uma diminuição na banda vermelho, devido à maior absorção de REM pelos pigmentos, que estão em maior quantidade, aumentando também os valores de NDVI. Este princípio continua válido no GNDVI.

Tabela 5 - ANOVA's aplicadas ao GNDVI e à Razão Simples TM 2/TM 4.

TM2/TM4	SQ	gl	QM	F	GNDVI 2/4	SQ	gl	QM	F
Tratamento	0,013	1	0,013	5,893*	Tratamento	0,018	1	0,018	6,274*
Resíduo	0,225	102	0,002		Resíduo	0,286	102	0,003	
Total	0,238	103			Total	0,304	103		

* - significativo a 10% de probabilidade

No segundo índice de vegetação, denominado **Moisture Vegetation Index** (MVI), uma das bandas do infravermelho médio (TM 5 ou TM 7) é utilizada no lugar da banda do visível (TM 3). Este índice também foi sensível à saída de volume de madeira dos talhões, assim como suas Razões Simples (**Tabela 6**). Aqui também é mantido o princípio do NDVI, de explorar o contraste entre a alta reflectância na região do infravermelho próximo e as baixas reflectâncias nas regiões do infravermelho médio. O comportamento destas duas regiões do espectro eletromagnético também são inversamente proporcionais, uma vez que com o aumento da vegetação, aumenta a absorção de REM pela água contida nas folhas na região do infravermelho médio.

Tabela 6 - ANOVA's aplicadas ao MVI e às Razões Simples TM 5 e 7/TM 4.

TM5/TM4	SQ	gl	QM	F	MVI (TM 5)	SQ	gl	QM	F
Tratamento	0,038	1	0,038	3,146*	Tratamento	0,039	1	0,039	3,267*
Resíduo	1,244	102	0,012		Resíduo	1,221	102	0,012	
Total	1,282	103			Total	1,260	103		
TM7/TM4	SQ	gl	QM	F	MVI (TM 7)	SQ	gl	QM	F
Tratamento	0,038	1	0,038	10,151*	Tratamento	0,104	1	0,104	10,626*
Resíduo	0,380	102	0,004		Resíduo	1,002	102	0,010	
Total	0,418	103			Total	1,106	103		

* - significativo a 10% de probabilidade

Os valores dos coeficientes de correlação (R) (**Tabela 7**) dos dados de volume com os dados orbitais abordados neste trabalho mostraram fracas correlações entre estas variáveis, podendo-se supor que este parâmetro dendrométrico não é passível de ser estimado e quantificado via técnicas de SR. No entanto, a sensibilidade das imagens Greenness e Brightness, dos novos índices propostos (GNDVI e MVI) e das bandas TM 2, TM 5 e TM 7 às alterações quantitativas mostram que estes dados podem ser utilizados para a identificação de áreas que sofreram uma diminuição em sua biomassa. Este trabalho pode ser um indicativo de que resultados semelhantes podem ser alcançados para áreas de floresta heterogênea, podendo os dados orbitais mencionados serem ferramentas úteis na detecção de áreas antropizadas.

Tabela 7 - Coeficientes de correlação entre volume e dados orbitais.

<i>Bandas TM</i>	<i>Índices de vegetação</i>	<i>Greenness e Brightness</i>		<i>Novos Índices</i>
TM 1	NDVI	GEMI	GR	TM 2/TM 4
0,133	-0,192	-0,164	0,003	0,195*
TM 2	RVI	ARVI	BR	GNDVI
0,086	0,193	0,010	0,010	-0,199*
TM 3	SAVI (L = 0,5)	WDVI	BR/GR	TM 5/TM 4
0,102	-0,179	-0,187	0,001	0,208*
TM 4	SAVI (L = 0,25)	PVI		MVI (TM5)
-0,157	-0,183	-0,173		-0,206*
TM 5	MSAVI	DVI		TM 7/TM 4
0,156	-0,179	-0,176		0,090
TM 7	TSAVI			MVI (TM7)
0,065	0,024			-0,080

* - significativo a 5% de probabilidade

4. Conclusão

A análise de variância aplicada aos dados de volume indicou uma saída significativa de madeira dos talhões analisados. Esta diminuição de madeira pode ser detectada pelas bandas TM/Landsat 2, 5 e 7; pelos valores de Greenness e de Brightness isoladamente; por uma Razão Simples BR/GR e por dois novos índices de vegetação, baseados na fórmula do NDVI. Estes índices são o *GNDVI*, que utiliza a banda TM 2 no lugar da TM 3 e o *MVI*, que utiliza uma das bandas do infravermelho médio (TM 5 ou TM 7) no lugar da banda do visível. Estes índices mantêm o princípio do NDVI, de detectar alterações de biomassa baseado no contraste dos valores de radiância refletida nas bandas utilizadas. Estes resultados indicariam que os índices de vegetação normalmente utilizados para monitoramento e levantamento de biomassa não são adequados para detectar alterações no volume de madeira, nas condições semelhantes àquelas deste trabalho. Isto provavelmente deve-se ao fato de todos envolverem em suas fórmulas a banda relativa ao vermelho (TM 3), que foi a menos sensível às alterações estudadas. Assim, a troca desta banda pelas bandas TM 2, TM 5 e TM 7, parecem ter solucionado este problema, para esta área de estudo.

No entanto, todos os dados orbitais analisados neste trabalho mostraram fracas correlações com volume de madeira, exceto pelo *GNDVI* e pelo *MVI* com a banda TM 5, que apresentaram correlações significativas a 5%, embora ainda baixas. Isto indica que este parâmetro dendrométrico não é passível de ser estimado e quantificado via SR orbital, embora seja possível detectar e identificar áreas que tenham sofrido alterações em sua biomassa devido à ações antrópicas, mesmo quando o padrão da imagem parece inalterado.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à DURAFLORA S.A., pela atenção com que nos atenderam, por disponibilizar os dados dendrométricos necessários e pelo apoio logístico oferecido durante o trabalho de campo.

Referências Bibliográficas

- ARDÖ, J. Volume quantification of coniferous forest compartments using spectral radiance recorded by Landsat Thematic Mapper. **International Journal of Remote Sensing**, 13(9):1779-1786, 1992.
- ASRAR, G.; MYNENI, R. B.; KANEMASU, E. T. Estimation of plant-canopy attributes from spectral reflectance measurements. In: Asrar, G. **Theory and applications of optical remote sensing**. New York, John Wiley, 1989. Cap. 7, p.252-296.
- BARET, F.; GUYOT, G.; MAJOR, D. J. TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. In: 12th Canadian Symposium on Remote Sensing, IGARSS'90, Vancouver, Canada. **Proceedings**. v. 3. p.1355-1358, 1990.
- CLEVERS, J. G. P. W. The application of a weighted infrared-red vegetation index for estimation leaf area index by correcting for soil moisture. **Remote Sensing of Environment**, 29:25-37, 1989.
- CURRAN, P.J.; DUNGAN, J.L.; GHOLZ, H.L. Seasonal LAI in Slash Pine estimated with Landsat TM. **Remote Sensing of Environment**, 39(1):3-13, 1992.
- DAUGHTRY, C.S.T. Direct measurements of canopy structure. In: Goel, N.S., Norman, J.M. Instrumentation for studying vegetation canopies for remote sensing in optical and thermal infrared regions. **Remote Sensing Reviews**, 5(1):45-60, 1990.
- GEMMELL, F.M. Effects of forest cover, terrain and scale on timber volume estimation with Thematic Mapper data in a rocky mountain site. **Remote Sensing of Environment**, 51(2):291-305, 1995.
- GOEL, N.S. Inversion of canopy reflectance models for estimation of biophysical parameters from reflectance data. In: Asrar, G. **Theory and applications of optical remote sensing**. New York, John Wiley, 1989. Cap. 6., p.205-251.
- GONG, P.; PU, R.; MILLER, J.R. Correlating Leaf Area Index of Ponderosa Pine with hyperspectral CASI data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 18(4):275-282, 1992.
- GOWER, S.T.; NORMAN, J.M. Rapid estimation of Leaf Area Index in conifer and broad-leaf plantations. **Ecology**, 72(5):1896-1900, 1991.
- HALL, F.G.; STREBEL, D.E.; NICKESON, J.E.; GOETZ, S.J. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multirate, multisensor images. **Remote Sensing of Environment**, 35(1):11-27, 1991.
- HUETE, A.R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, 25(3):295-309, 1988.
- HUETE, A. R.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; LEEUWEN, W. v. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, 59:440-451, 1997.
- KAUFMAN, Y. J.; TANRÉ, D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 30:261-270, 1992.

- KAUTH, R.J.; THOMAS, G.S. The tasselled cap: a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In: Symposium on the Machine Processing of Remotely Sensed Data. **Proceedings**. p.4B41-4B51, 1976.
- KUMAR, R. **Radiation from plants-reflection and emission**: a review. Lafayette, Purdue University, 1972. 88p.
- NILSON, T.; OLSSON, H. Effect of thinning cutting on boreal forest reflectance: a comparison of simulations and Landsat TM estimates. **International Journal of Remote Sensing**, 16(15):2963-2968, 1995.
- OLSSON, H. Changes in satellite-measured reflectances caused by thinning cuttings in boreal forest. **Remote Sensing of Environment**, 50(3):221-230, 1994.
- PINTY, B.; VERSTRAETE, M. M. GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. **Vegetatio**, 101: 15-20, 1992.
- QI, J.; CHEHBOUNI, A.; HUETE, A. R.; KERR, Y. H.; SOROOSHIAN, S. A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. **Remote Sensing of Environment**, 48:119-126, 1994.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W., HARLAN, J. C. Monitoring the vernal advancement retrogradation of natural vegetation. **Final Report Type III - NASA/GSFC**, 1974.
- TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, 8:127-150, 1979.