



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**THAYSLAN RENATO ANCHIÊTA DE CARVALHO**

**ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EM CAATINGA PRESERVADA: AVALIAÇÃO *IN-SITU* E ATRAVÉS DA RESPOSTA ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO**

**FORTALEZA**

**2016**

THAYSLAN RENATO ANCHIÊTA DE CARVALHO

ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EM CAATINGA PRESERVADA: AVALIAÇÃO *IN-SITU* E  
ATRAVÉS DA RESPOSTA ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e conservação de bacias hidrográficas no semiárido.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Araújo

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

- 
- C329i Carvalho, Thayslan Renato Anchiêta de.  
Índice de área foliar em Caatinga preservada: avaliação *in-situ* e através da resposta espectral da vegetação / Thayslan Renato Anchiêta de Carvalho. – 2016.  
81f. : il., color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2016.  
Área de Concentração: Manejo e conservação de bacias hidrográficas no semiárido.  
Orientação: Prof. Dr. José Carlos de Araújo.
1. Caatinga. 2. Sensoriamento remoto. 3. Precipitação (Meteorologia). I. Título.

THAYSLAN RENATO ANCHIÊTA DE CARVALHO

ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EM CAATINGA PRESERVADA: AVALIAÇÃO *IN-SITU* E  
ATRAVÉS DA RESPOSTA ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e conservação de bacias hidrográficas no semiárido.

Aprovado em: 16/02/2016

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. José Carlos de Araújo (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão  
Universidade Federal de Campina Grade (UFCG)

---

Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes da Costa  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Fernando Bezerra Lopes  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A minha mãe, Edinalva.

A minha irmã, Thaís.

A minha família, avós, tios (as).

Ao professor José Carlos e ao grupo  
Hidrosed.

Ao Bioma Caatinga.

## AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho tornou-se possível somente devido ao apoio de diversas pessoas, às quais manifesto meus mais sinceros agradecimentos:

Primeiramente a DEUS, por me dar coragem, paciência, determinação tornando-me forte nos momentos mais difíceis e por colocar pessoas tão boas na minha vida.

A minha mãe, Edinalva por não medir esforços para que esse momento tão importante pra mim tornasse realidade. A toda a família Carvalho Duarte pelos ensinamentos do significado da vida, da humildade e de caráter. A minha amiga e irmã Thaís Ramonielly pelo apoio e incentivo.

Ao grande mestre, professor José Carlos, pela oportunidade, incentivo, ensinamentos tão grandiosos, que me ajudaram a crescer pessoalmente e profissionalmente, os quais levarei por toda minha vida. Agradeço também pela belíssima orientação que foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Alexandre Gomes, Fernando Lopes, Marcus Bezerra, Adunias Teixeira e Luiz Alberto, por contribuir de forma significativa compartilhando seus conhecimentos.

Aos meus amigos e amigas que fiz durante o curso: Christine Farias, Cicero Lima, Mário, Socorro, Ramon Costa, José Welington, Thiago, Luiz Carlos, Polyana, Alisson, Paulilo, Emanuel, Rafael, Elinalda por estarem sempre presente durante o curso, me ajudando a suportar os momentos difíceis.

Aos amigos e bolsistas de Aiuaba, Dona Socorro, pela simplicidade e alegria que nos contagia além da disposição para nos receberem sua residência, Cícero e Hosana pela ajuda nos trabalhos de campo. Aos funcionários do ICMBio de Aiuaba, Valdir, Márcia e Honório.

A Gleiciane pelo companheirismo, principalmente na etapa final deste trabalho, pessoa a qual tenho muito carinho e admiração.

A Universidade Federal do Ceará e ao Departamento de Engenharia Agrícola pela oportunidade oferecida.

A CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

“Seja a mudança que você tanto deseja”

## RESUMO

Estudos sobre a Caatinga se constituem em um desafio do conhecimento científico brasileiro, por diversos motivos, entre os quais o fato de a Caatinga se restringir ao território nacional. A Caatinga apresenta grande variação fisiológica devido ao déficit hídrico característico da região semiárida e o conhecimento dessa variação pode ser importante, por exemplo, no entendimento dos processos hidrológicos, já que a vegetação tem participação direta no ciclo hidrológico. Uma variável importante da vegetação a ser estudada é o índice de área foliar. Este índice é importante para o entendimento de processos biológicos e físicos da vegetação sobre a superfície da Terra, podendo ser avaliado por métodos diretos e indiretos. Entre os métodos diretos, o mais indicado para vegetação do tipo caducifólia como a Caatinga é o método da coleta de serrapilheira. Já entre os métodos indiretos destacam-se os índices espectrais de vegetação derivados do sensoriamento remoto, que se tornou importante ferramenta de auxílio no monitoramento ambiental. O objetivo deste estudo foi avaliar o índice de área foliar, em uma área de Caatinga preservada, medido *in situ* através da coleta de serrapilheira e avaliar sua correlação com índices espectrais de vegetação. Esses índices, derivados de imagens do sensor OLI do satélite Landsat8, foram NDVI, SAVI, EVI, EVI2 e ARVI. O estudo foi desenvolvido na Bacia Experimental de Aiuaba – BEA com área de 12 km<sup>2</sup> com vegetação predominante Caatinga preservada. A BEA foi dividida em três associações solo-vegetação (ASV). Os resultados mostram que é possível avaliar o índice de área foliar, em área de Caatinga preservada, utilizando o método da serrapilheira. O IAF médio da Caatinga variou entre 3,48 e 1,78 m<sup>2</sup>.m<sup>-2</sup> nas três ASVs presentes na BEA, sendo esses valores influenciados pelo tipo de solo e pela distribuição da precipitação. As maiores taxas de redução do IAF ocorreram entre Maio e Julho de 2014 com redução de 90%, 89% e 95% e entre Junho e Julho de 2015 com redução de 63%, 62% e 72% nas ASV1, ASV2 e ASV3 respectivamente. Estimar o IAF a partir de índices espectrais de vegetação foi possível, visto que os coeficientes estatísticos utilizados para calibrar e validar os modelos apresentaram bons valores. Os bons resultados são possivelmente devido ao fato de a Caatinga não atingir grandes valores de IAF, impossibilitando a saturação dos IEVs, indicando a viabilidade do uso de sensoriamento remoto para monitoramento do IAF na Caatinga.

**Palavras-chave:** Bacia experimental. Serrapilheira. Índices de vegetação. Reflectância. Landsat8 OLI/TIRS.

## ABSTRACT

Studies about the Caatinga biome constitute a challenge for the Brazilian scientific knowledge, for various reasons, including the fact that the Caatinga is limited to the national territory. The biome has great physiological variation due to drought characteristics of semiarid region. Therefore, the knowledge of this variation may be important, for example, the understanding of its hydrological processes, since the vegetation has direct participation in the hydrological cycle. An important parameter of the vegetation to be studied is the leaf area index. This index is important for the understanding of biological and physical processes of vegetation on the Earth surface and can be evaluated by direct or indirect methods. Among the direct methods, the most suitable for deciduous vegetation, such as Caatinga, is the litter collection method. Among the indirect methods, we highlight the spectral vegetation indices derived from remote sensing, which have become an important tool to help environmental monitoring. The aim of this study was to evaluate the leaf area index, in a Caatinga preserved area, measured *in situ* by litter collection; and to assess its correlation with spectral vegetation indices. These ratios derived from images of OLI sensor Landsat8 satellite were NDVI, SAVI, EVI, EVI2 and ARVI. The study was conducted at the Aiuaba Experimental Basin - AEB with 12 km<sup>2</sup> area, whose predominant vegetation is the preserved Caatinga. AEB was divided into three soil-vegetation associations (SVAs). The results show that it is possible to estimate the leaf area index in the Caatinga, using the litter method. The average Caatinga LAI ranged between 1.8 and 3.5 m<sup>2</sup>.m<sup>-2</sup> in the three SAVs. These values are influenced by the soil type and the annual distribution of rainfall. The high LAI reduction rates occurred between May and July 2014 with a reduction of 90%, 89% and 95% between June and July 2015 with a reduction of 63%, 62% and 72% in SAV1, SVA2 and SVA3, respectively. It was possible to estimate the LAI from spectral vegetation indices, since the statistical coefficients used to calibrate and validate the models showed good values. The good results are possibly due to the fact the Caatinga does not reach large values of LAI, making it impossible to saturate the IEVs, indicating the feasibility of the use of remote sensing for monitoring IAF in the Caatinga.

**Keywords:** Experimental basin. Leaf litter. Vegetation indexes. Reflectance. Landsat 8 OLI/TIRS.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Comportamento espectral da vegetação.....	27
Figura 2 -	Localização da BEA.....	32
Figura 3 -	Localização dos coletores e coleta de serapilheira.....	35
Figura 4 -	Medição da área foliar das amostras coletadas para determinação da área foliar específica.....	36
Figura 5 -	Taxa de decaimento do índice de área foliar da Caatinga nas três associações solo vegetação entre 2014 e 2015.....	46
Figura 6 -	Imagens Landsat8 OLI/TIRS referente a órbita 217 ponto 65, com cobertura de nuvens, em (A) imagem datada de 25/01/2014, (B) 10/02/2014, (C) 30/03/2014, (D) 01/03/2015 e (E) 28/01/2015.....	48
Figura 7 -	Curva espectral do pixel X: 359175,8; Y: 9255986,9, referente à imagem datada de 02/06/2015.....	50
Figura 8 -	Curva espectral do pixel X: 356993,4; Y: 9258600,4, referente à imagem datada de 04/07/2014.....	51
Figura 9 -	Curva espectral do pixel X: 357569,81e Y: 9258622,92, referente à imagem datada de 13/02/2015.....	51
Figura 10 -	Curva espectral do pixel X: 357569,81 e Y: 9258622,92 referente a imagem datada de 07/07/2015.....	52
Figura 11 -	Variabilidade dos IEVs para as quatro imagens Landsat 8 OLI utilizadas neste estudo.....	53
Figura 12 -	Regressão entre IAF e NDVI.....	54
Figura 13 -	Regressão entre IAF e SAVI.....	54
Figura 14 -	Regressão entre IAF e EVI.....	55
Figura 15 -	Regressão entre IAF e EVI2.....	55
Figura 16 -	Regressão entre IAF e ARVI.....	56
Figura 17 -	IAF medido e estimado pelos NDVI e os respectivos parâmetros estatísticos da calibração.....	57
Figura 18 -	IAF medido e estimado pelos NDVI e os respectivos parâmetros estatísticos da validação.....	57

Figura 19 - IAF medido e estimado pelos SAVI e os respectivos parâmetros estatísticos da calibração.....	58
Figura 20 - IAF medido e estimado pelo SAVI e os respectivos parâmetros estatísticos da validação.....	59
Figura 21 - IAF medido e estimado pelo EVI e os respectivos parâmetros estatísticos da calibração.....	60
Figura 22 - IAF medido e estimado pelo EVI e os respectivos parâmetros estatísticos da validação. ....	60
Figura 23 - IAF medido e estimado pelo EVI2 e os respectivos parâmetros estatísticos da calibração. ....	62
Figura 24 - IAF medido e estimado pelo EVI2 e os respectivos parâmetros estatísticos da validação.....	62
Figura 25 - IAF medido e estimado pelo ARVI e os respectivos parâmetros estatísticos da calibração.....	63
Figura 26 - IAF medido e estimado pelo ARVI e os respectivos parâmetros estatísticos da validação.....	64
Figura 27 - IEVs obtidos a partir da imagem Landsat 8 OLI, datada de 02/06/2014.....	65
Figura 28 - IEVs obtidos a partir da imagem Landsat 8 OLI, datada de 04/07/2014.....	65
Figura 29 - IEVs obtidos a partir da imagem Landsat 8 OLI, datada de 13/02/2015.....	66
Figura 30 - IEVs obtidos a partir da imagem Landsat 8 OLI, datada de 07/07/2015.....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização e distribuição das Associações Solo-Vegetação (ASV) na BEA.....	33
Tabela 2 - Principais características das imagens do satélite Landsat8 <i>Operational Land Imager</i> (OLI) e <i>Thermal Infrared Sensor</i> (TIRS) lançado em 11 de fevereiro de 2013.....	37
Tabela 3 - Critérios de interpretação do coeficiente “C”.....	41
Tabela 4 - Massa foliar específica das espécies avaliadas nas seis unidades fitossociológica.....	43
Tabela 5 - Apanhado do índice de área foliar em diferentes biomas.....	45
Tabela 6 - Teste de comparação de médias do índice de área foliar obtidos para as três Associações de Solo Vegetação na BEA.....	49

## LISTA SIGLAS

AFE	Área Foliar Específica
ARVI	Índice de Vegetação Resistente a Atmosfera
ASV	Associação Solo Vegetação
BEA	Bacia Experimental de Aiuaba
EVI	Índice de Vegetação Melhorado
EVI2	Índice de Vegetação Melhorado com duas bandas
IAF	Índice de Área Foliar
IEV	Índice Espectral de Vegetação
MFE	Massa Foliar Específica
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
SAVI	Índice de Vegetação Ajustado para o Solo
Landsat 8	Land Remote Sensing Satellite série 8, Operational Land Imager/Thermal
OLI/TIRS	Infrared Sensor
MODIS	MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	17
<b>2.1</b>	<b>O bioma Caatinga e sua Hidrologia</b> .....	17
<b>2.2</b>	<b>Índice de área foliar – IAF</b> .....	20
<b>2.2.1</b>	<i>Conceituação, importância e aplicação</i> .....	20
<b>2.2.2</b>	<i>Métodos de medida do IAF</i> .....	23
<b>2.3</b>	<b>Sensoriamento remoto da vegetação</b> .....	25
<b>2.4</b>	<b>Índices espectrais de vegetação</b> .....	27
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	32
<b>3.1</b>	<b>Área de estudo</b> .....	32
<b>3.2</b>	<b>Medidas <i>in-situ</i> do Índice de Área Foliar</b> .....	34
<b>3.3</b>	<b>Estimativa dos índices espectrais de vegetação</b> .....	36
<b>3.3.1</b>	<i>Correção das imagens Landsat</i> .....	38
<b>3.3.2</b>	<i>Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)</i> .....	38
<b>3.3.3</b>	<i>Índice de Vegetação Melhorado (EVI e EVI2)</i> .....	38
<b>3.3.4</b>	<i>Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI)</i> .....	39
<b>3.3.5</b>	<i>Índice de Vegetação Resistente a Atmosfera (ARVI)</i> .....	39
<b>3.4</b>	<b>Parâmetros estatísticos</b> .....	40
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	42
<b>4.1</b>	<b>Massa foliar específica ou área foliar específica</b> .....	42
<b>4.2</b>	<b>Índice de área foliar</b> .....	43
<b>4.3</b>	<b>Correção atmosférica das imagens</b> .....	50
<b>4.4</b>	<b>Estimativa dos índices espectrais de vegetação e sua correlação com o IAF</b> .....	52
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	68
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	69

## 1 INTRODUÇÃO

A vegetação e a forma como esta recobre a superfície é importante para entendimento de alguns fatores como o uso da água pelas plantas, produção de biomassa, ciclos de energia, ciclo hidrológico, entre outros. O conhecimento das características de um dossel vegetativo associado aos estímulos ambientais facilita na compreensão das inter-relações existentes entre vegetação e ambiente. Em ambientes semiáridos, essa inter-relação é mais complexa devido ao elevado déficit hídrico (BARBOSA *et al.*, 2006; COSTA *et al.*, 2007; VIEIRA *et al.*, 2009).

No Brasil, 12% de seu território são ocupados por uma região semiárida, onde predomina o bioma Caatinga. A Caatinga (ou "mata branca", no idioma Tupi) é o único bioma exclusivo do Brasil, ocupando uma área superior a 800.000 km<sup>2</sup>, fortemente degradada pela ação antrópica. A Caatinga é composta por uma mistura complexa de espécies lenhosas decíduas e herbáceas. Esse bioma tem um grande número de associações de plantas e complexos florísticas com diferentes fisionomias, incluindo xerófila, árvores de folha caduca, arbustos espinhosos, cactos e bromélias (BARBOSA *et al.*, 2006; ALVES *et al.*, 2009; MAIA, 2012).

As plantas da Caatinga apresentam diversas adaptações fisiológicas às condições estressantes, sendo o estudo dessas adaptações de vital importância para o entendimento dos ecossistemas do semiárido. O conhecimento dessas variáveis fisiológicas possibilita o entendimento de como as espécies vegetais conseguem se estabelecer neste ambiente, exteriorizando fenótipos condicionados pelo seu patrimônio genético, permitindo-lhes a permanência e, portanto, sua evolução nos diversos ambientes, muitas vezes considerados inhóspitos e inviáveis à sobrevivência (TROVÃO *et al.*, 2007; PINHEIRO *et al.*, 2013).

Uma variável importante a ser estudada não só na Caatinga, mas em outros biomas é o índice de área foliar (IAF). Este índice é importante para o entendimento de processos biológicos e físicos associados à vegetação sobre a superfície da Terra, como fotossíntese, respiração, transpiração, estoque de carbono, ciclo de nutrientes, interceptação da precipitação, entre outros. O IAF é também uma variável de entrada de modelos hidrológicos e ecológicos, permitindo avaliar a demanda hídrica de água de áreas florestais, seus impactos ambientais e sua sustentabilidade (WANG *et al.*, 2005; CHEN *et al.*, 2006; ERIKSSON *et al.*, 2005; RYU *et al.*, 2010).

Na avaliação do IAF podem ser usados métodos diretos e indiretos, destrutivos ou não. Os métodos diretos estão relacionados às medidas tomadas diretamente na planta, sendo

muito importantes para estimativa adequada e amostragem representativa, que será maior ou menor em função do tamanho e do tipo da vegetação. Os métodos diretos apresentam maior precisão quando bem aplicados, mas aumentam progressivamente o tempo de dedicação da análise à medida que aumentam a complexidade do dossel e a conformação do plantio. Dificuldades ocorrem nessa avaliação em espécies arbóreas, principalmente em função do porte e do número de folhas de árvores adultas (BRÉDA, 2003).

Os métodos indiretos se baseiam em medidas da transmissão da luz direta e/ou difusa no dossel vegetativo, com possibilidade de armazenamento dos dados em memória eletrônica e posterior utilização com tratamento informatizado. Tais métodos apresentam a vantagem de não serem destrutivos e de permitirem maior frequência de leituras pela rapidez de mensuração, utilizando apenas a informação da fração de radiação transmitida que não sofreu atenuação pela estrutura do dossel vegetativo (WANG *et al.*, 2005).

Atualmente o sensoriamento remoto tornou-se uma importante ferramenta que auxilia no monitoramento da vegetação através da utilização dos índices de vegetação. Os índices de vegetação foram desenvolvidos para avaliar a cobertura vegetal qualitativamente e quantitativamente, utilizando a resposta espectral da vegetação (OKIN, 2007; BEZERRA *et al.*, 2011). De acordo com Tucker (1979), os índices de vegetação podem ser usados como indicadores de crescimento e vigor da vegetação, assim como para diagnosticar vários parâmetros biofísicos com os quais apresentam altas correlações (índice de área foliar, biomassa, atividade fotossintética, porcentagem de cobertura do solo e produtividade). Uma grande variedade de índices de vegetação é proposta na literatura para estimar a biomassa e espacializar a sua distribuição na superfície terrestre.

Tendo em vista o apanhado acima, trabalhamos com a hipótese de que os índices espectrais de vegetação demonstram aplicabilidade para avaliação do índice de área foliar – IAF do bioma Caatinga.

Dessa forma, este estudo foi conduzido com o objetivo geral de avaliar o IAF de uma área de Caatinga preservada e avaliar o desempenho dos índices espectrais de vegetação para estimar IAF a partir da comparação com dados de IAF obtido através da medição *in situ*.

Para tal foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- i) Medir, *in-situ*, o IAF, através de um método direto, em uma área de Caatinga preservada em região semiárida.
- ii) Estimar, com base em sensoriamento remoto, índices espectrais de vegetação e avaliar sua correlação com o IAF.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 O bioma Caatinga e sua Hidrologia

A Caatinga ou "mata branca", no idioma Tupi-Guarani, recebe esse nome em virtude do aspecto da vegetação na estação seca, quando as folhas caem, e apenas os troncos brancos e brilhosos das árvores e arbustos permanecem (LEAL *et al.*, 2003). É o único bioma exclusivo do Brasil (MAIA, 2012) e, segundo Alves *et al.* (2009), ocupa uma área superior a 800.000 km<sup>2</sup> e vem sendo fortemente degradada pela ação antrópica. No Brasil, 12% de seu território é ocupado pela região semiárida, onde predomina o bioma Caatinga.

Estudos sobre a Caatinga se constituem em um relevante desafio do conhecimento científico brasileiro, por diversos motivos, entre os quais o fato de a Caatinga se restringir ao território nacional. Além disso, o bioma é o menos estudado e, também, o menos protegido (apenas 1% do seu território) e, sobretudo, vítima de um extenso processo de alteração e deterioração ambiental provocado pelo uso insustentável dos seus recursos (LEAL *et al.*, 2005). Suas espécies apresentam características fisiológicas que refletem adaptações complexas e peculiares às condições ambientais únicas.

Andrade- Lima (1989); Trovão *et al.* (2007); Oliveira *et al.* (2012); Pinheiro *et al.* (2013), em seus trabalhos, chamam atenção para a riqueza da flora da Caatinga e destacam exemplos fascinantes das adaptações das plantas ao ambiente semiárido. Dessa forma, a Caatinga demonstra conter grande diversidade de espécies vegetais, que podem exemplificar relações biogeográficas que ajudem a esclarecer a dinâmica histórica vegetacional da própria Caatinga.

A Caatinga apresenta grandes variações fisiológicas, podendo destacar, por exemplo, a densidade e o porte das plantas. Podendo haver mudanças na vegetação tanto em grandes escalas, como em pequenas escalas, onde o padrão de vegetação muda em pouco espaço, sendo facilmente reconhecíveis e geralmente ligadas a uma alteração ambiental claramente identificável. É o caso do maior porte das plantas em solos mais profundos e menor porte sobre solos rasos, sendo isso somado a maior ou menor disponibilidade hídrica (precipitação pluviométrica) (CALIXTO JUNIOR; DRUMOND, 2011; TROVÃO *et al.*, 2007).

A disponibilidade hídrica no semiárido tem um papel importante nos padrões espaciais das espécies da Caatinga (OLIVEIRA; DINIZ-FILHO 2010; SILVA, 2004) e no entendimento dos processos hidrológicos dominante, sendo fundamental para a quantificação e avaliação dos impactos das ações antrópicas sobre a mesma (MEDEIROS *et al.*, 2009). Sabe-

se que a Caatinga tem sido historicamente devastada para ceder lugar a atividades agropecuárias, que ocupam vastas extensões. Uma vez abandonada à exploração dessas áreas, tem início processo de sucessão ecológica, quase sempre interrompida por novas intervenções, assim, a vegetação da Caatinga apresenta-se como um mosaico formado por variados estágios, resultantes dos usos ali imputados (ANDRADE *et al.*, 2007). Entretanto, os aspectos hidrológicos oriundos dessas alterações não foram ainda totalmente mensurados.

A interferência da cobertura vegetal no ciclo hidrológico é indiscutível, a vegetação interfere no movimento da água em todos os espaços do sistema, porém há grandes controvérsias quanto ao impacto exercido pela vegetação no regime hidrológico (TANG *et al.*, 2011; PEEL *et al.*, 2010). Vários estudos têm demonstrado a relação entre a vegetação e o ciclo hidrológico (CHENG, 1989; WRIGHT *et al.*, 1990; CÂMARA, 1999; BALBINOT *et al.*, 2008). Nesses estudos, a análise anterior e posterior a uma determinada interferência na vegetação, como corte raso, desbaste e reflorestamento, mostram como a vegetação arbórea influencia a produção e a qualidade de água, o processo de erosão e a proteção dos mananciais. A retirada da vegetação acarreta uma série de alterações no meio físico, sendo uma delas a diminuição nas taxas fotossintéticas e de evapotranspiração, esta última podendo modificar as taxas de precipitação, se ocorridas em larga escala. Contudo, alguns estudos relatam que o desmatamento pode aumentar as vazões nos períodos de estiagem e até mesmo as vazões médias anuais (BOSCH; HEWLETT 1982, MCCULLOCH; ROBINSON 1993). Tais controvérsias se devem à complexidade do tema, pois as variáveis que controlam o comportamento hidrológico numa bacia hidrográfica são muitas e frequentemente interdependentes.

Estudos que avaliam os processos que acontecem quando ocorre um evento chuvoso sobre uma área vegetada relatam que apenas parte da precipitação atinge a superfície do solo, pois uma fração considerável da mesma será retida na copa das árvores ou na serrapilheira (interceptação vegetal). A evapotranspiração real engloba a transpiração e a evaporação (pelas plantas, serrapilheira e solo). A precipitação que excede a capacidade de interceptação da vegetação pode ficar temporariamente armazenada no perfil do solo, retornar por evapotranspiração para a atmosfera ou escoar, compondo a vazão dos rios (GRANIER *et al.*, 2000).

Em se tratando de interceptação vegetal, podemos dizer que é uma das principais influências da vegetação, pois já no recebimento das chuvas pelas copas das árvores é quando

se dá o primeiro fracionamento da água. Uma parte é temporariamente retida pela massa vegetal e em seguida evaporada para a atmosfera ou reprecipitada para o solo (ARCOVA *et al.*, 2003).

A cobertura vegetal, através da interceptação, influencia a redistribuição da água da chuva, em que as copas das árvores formam um sistema de amortecimento, direcionamento e retenção das gotas que chegam ao solo, afetando a dinâmica do escoamento superficial e o processo de infiltração. Alguns pesquisadores afirmam que a floresta nativa, entre os ecossistemas vegetais, atua no ciclo hidrológico de maneira mais significativa, pois proporciona melhores condições de infiltração da água da chuva (OLIVEIRA JR; DIAS, 2005).

Crockford e Richardson (2000) afirmam que características da floresta que afetam as perdas por interceptação nem sempre são fáceis de identificar e quantificar. Algumas dessas características são: capacidade de armazenamento das folhas e sua variação entre estações do ano e espécies; proporção de área foliar (índice de área foliar); capacidade de armazenamento de arbustos e da serrapilheira.

Segundo Silans *et al.* (2001), em regiões semiáridas, onde a vegetação é mais espaçada, há menor proporção de área foliar, sendo a interceptação da chuva muitas vezes desprezada. Porém, estudos apontam que mesmo em áreas semiáridas a área foliar exerce grande influência na interceptação da precipitação (CARLYLE-MOSES, 2004; NÁVAR *et al.*, 1999). Medeiros *et al.* (2009), realizando estudo da interceptação vegetal em área de Caatinga preservada em região semiárida, observou que 14% da precipitação pluviométrica é interceptada pela vegetação. O mesmo autor atribui isso às altas taxas de evaporação na região semiárida, o que possibilita a rápida evaporação da água armazenada e o novo armazenamento de água na vegetação, criando um ciclo curto, que favorece as perdas.

O formato da cobertura vegetal e a área foliar são importantes no entendimento da dinâmica dos processos que ocorrem após o contato da chuva com a vegetação e no ciclo hidrológico, sendo o estudo da área foliar ou do índice de área foliar fundamental para ajudar a esclarecer questionamentos feitos sobre a Caatinga (ARCOVA *et al.*, 2003; FERREIRA *et al.*, 2005; MOURA *et al.*, 2009).

Ante o exposto, é evidente a importância da Caatinga no ciclo hidrológico e nos processos de uso e ocupação. Contudo, ainda são poucos os estudos envolvendo o comportamento das espécies da Caatinga face às condições de estresse a que são continuamente submetidas, fazendo-se necessárias pesquisas envolvendo aspectos fisiológicos associados à ação antrópica que permita o entendimento das estratégias evolutivas plantas desse bioma.

## 2.2 Índice de área foliar – IAF

### 2.2.1 Conceituação, importância e aplicação

O índice de área foliar é definido como sendo área total da face das folhas por unidade de área da sombra da copa projetada, de forma perpendicular, na superfície do solo (WATSON 1947; ASNER *et al.*, 2003). Por esta definição o IAF é uma medida adimensional (também expressa em  $m^2 \cdot m^{-2}$ ). O índice de área foliar controla o regime de radiação no interior da cobertura, rege o microclima tanto dentro como abaixo da copa e está diretamente relacionado com a evapotranspiração e a produtividade das plantas. É, portanto, fundamental no estudo de processos biológicos das plantas, sendo também uma variável de entrada em muitos modelos ecológicos que avaliam a estrutura do dossel, tornando-se assim importante em estudos no âmbito hidrológico, biogeoquímico e ecológico em diferentes escalas (WANG *et al.*, 2005; CHEN *et al.*, 2006; ERIKSSON *et al.*, 2005; RYU *et al.*, 2010).

A quantidade de radiação solar absorvida por um dossel depende do seu IAF. Dosséis densos, com elevado IAF, podem bloquear mais de 95% da luz visível e isso mantém o ar do solo sob o dossel mais frio durante o dia (BONAN, 2008). Em florestas densas, este efeito desempenha um papel importante na proteção de espécies sensíveis a grandes variações de temperatura. O mesmo efeito não ocorre em florestas esparsas (HARDWICK *et al.*, 2015).

IAF é uma métrica física da estrutura da vegetação que é relevante para os processos microclimáticos. IAF é normalmente medido no campo, usando técnicas de amostragem destrutiva, alométricas, óptico – tais como a fotografia hemisférica – e através da coleta de serrapilheira (RYU *et al.*, 2010; PUESCHEL *et al.*, 2012; LIU *et al.*, 2015). Nos últimos anos, estimativa de IAF tem sido realizada a partir de técnicas de sensoriamento remoto. Se for possível estabelecer correlações entre sensoriamento remoto e IAF, será possível reduzir a resolução espacial da escala de previsões climáticas com base em dados de IAF, sem dados que precisem ser medidos fisicamente em *in situ*. Isto poderia ser extremamente útil no desenvolvimento de modelos climáticos de alta resolução.

Tendo em vista essa perspectiva, a avaliação da variação sazonal do IAF é fundamental para a caracterização funcional dos ecossistemas florestais, pois a superfície das folhas é a superfície de permuta entre os componentes fotossinteticamente ativos da vegetação e a atmosfera (COHEN *et al.*, 2003; CHEN *et al.*, 1997). No entanto, o IAF é influenciado por fatores como condições climáticas, disponibilidade de água, fertilidade do solo, topografia e uso e ocupação do solo (LEUSCHNER *et al.*, 2007).

A avaliação do comportamento do IAF, considerando-se as variações temporais e ambientais, é de fundamental importância para o entendimento da dinâmica da vegetação em ambientes florestais, caracterizando alterações causadas pela intervenção humana nos ecossistemas florestais. Isso pode ser feito em pequenas e grandes escalas (ARAGÃO *et al.*, 2005; SPRINTSIN *et al.*, 2011). Shabanov *et al.* (2003) afirmaram que medidas extensas e estudos de IAF foram feitas para a pequena estatura de vegetação (culturas agrícolas e plantações), mas medições e estudos para os ecossistemas naturais (florestas e savanas) em escala global permanecem escassas.

Asner *et al.* (2003), fazendo um apanhado sobre o IAF de diferentes biomas do globo, concluíram que, em geral, os maiores valores para IAF são para copas de coníferas, em alguns casos IAF maior que 15, embora esses valores sejam, em parte, uma função de como IAF é definido e medido. Beadle (1993) observou IAF variando de 6 a 8 em floresta decídua e de 2 a 4 para as culturas anuais. Já Schulze (1982) sugeriu que os valores do IAF típico para a maioria dos biomas variam de 3 a 19, sendo os valores máximos encontrados em florestas de coníferas. Asner *et al.* (2003) relatam ainda que os biomas que possuem maior número de informação sobre IAF são florestas de clima temperado e florestas caducifólias sempre verdes. Necessita-se, assim, de mais estudos sobre IAF em biomas de outros climas como, por exemplo, zonas úmidas, semiáridas e áridas.

Sprintsin *et al.* (2011) investigaram o IAF em uma vegetação localizada entre as zonas áridas e semiáridas do Mediterrâneo oriental, perceberam que o IAF para este tipo de floresta não foi maior que 2. Huang *et al.* (2014) avaliaram a variabilidade anual no índice de área foliar e de durante os anos de seca no Texas constataram baixos valores de IAF e reduções o IAF durante períodos de seca nas regiões de menor precipitação.

Aragão *et al.* (2005), estudando padrões de paisagem na Amazônia, avaliaram o IAF para diferentes classes de vegetação, tendo encontrado valores de IAF de até 8; e afirmaram que valores de IAF não dependem somente do bioma e dos padrões climáticos, mas também do tipo, uso e ocupação do solo, assim como da topografia.

Dada à importância do IAF, diversos estudos têm usado o índice para subsidiar estudos de outras variáveis. Hardwick *et al.* (2015) utilizaram o IAF como parâmetro para avaliar mudanças no microclima em diferentes áreas vegetadas e encontraram uma forte ligação entre IAF e cinco variáveis climáticas ecologicamente importantes em uma floresta tropical. Isso oferece um grande potencial para melhorar a modelagem do microclima em paisagens heterogêneas. Os mesmos autores afirmam ainda que a perturbação humana em sistemas

florestais leva a mudanças significativas na IAF, que alteram o microclima, e essas mudanças provavelmente vão ter repercussões sobre o funcionamento do ecossistema.

Tesemma *et al.* (2015) avaliaram o efeito da variabilidade anual do IAF no desempenho de um modelo para simular escoamento superficial e afirmaram que a calibração do modelo usando IAF observado mensalmente e anualmente é importante em bacias hidrográficas onde predomina alta cobertura vegetal. Isso implica a necessidade de avaliar as mudanças na vegetação em resposta às mudanças climáticas e à ação antrópica quando se busca otimizar modelos que pretendam simular escoamento superficial.

Jiapaer *et al.* (2015) utilizaram o IAF como principal indicador para avaliar as características da vegetação em diferentes escalas e suas respostas às mudanças climáticas (mudanças de precipitação e temperatura), em uma área de clima árido na China. Os autores verificaram que a relação entre o IAF e a precipitação era mais forte do que entre o IAF e a temperatura, confirmando que a precipitação é um fator dominante. No entanto, devido à precisão limitada de IAF para vegetação de zonas áridas, os autores perceberam que há necessidade de uma avaliação do IAF *in situ* para se obter melhores resultados.

Cao *et al.* (2015) inseriram o IAF em um modelo que simula trocas vertical de água, Carbono e energia em áreas vegetadas e avaliaram o desempenho e observaram que o modelo obteve melhora significativa na simulação da temperatura do solo principalmente na fase de queda das folhas, melhorou a simulação na evapotranspiração e da produtividade primária bruta da vegetação.

Hu *et al.* (1982) e Xie *et al.* (2010) incorporaram IAF como parâmetro importante para modelar a fotossíntese, respiração e acúmulo de matéria seca em seringueiras. Observaram que os modelos estabelecidos nessas pesquisas podem ser utilizados para previsão sobre potencial produtivo e rendimento. Além disso, verificaram que o IAF possui boa correlação com a produção de borracha seca. Chen *et al.* (2015) afirmam que agricultores podem se beneficiar diretamente através do monitoramento da IAF sobre uma grande área, sendo particularmente importante na gestão da produção.

Ata-Ul-Karim *et al.* (2014) buscaram avaliar a absorção de nitrogênio baseado no IAF da cultura do arroz, buscando uma estimativa indireta dos níveis de nitrogênio principalmente no período de crescimento. Os autores perceberam que as relações entre a absorção de Nitrogênio e o IAF são proporcionais, implicando dizer que o IAF pode ser utilizado como *feedback* para avaliar a absorção e necessidade de Nitrogênio pela cultura de arroz, podendo ser útil, por exemplo, na correção do solo.

Apesar da importância amplamente reconhecida do IAF em um leque de investigação físicas e ecológicas, estudos sobre IAF em biomas como a Caatinga ainda são limitados na literatura, tornando-se necessários estudos mais aprofundados que permitam entender a dinâmica deste tipo de vegetação típica do semiárido brasileiro.

### **2.2.2 Métodos de medida do IAF**

Existem vários métodos e técnicas utilizadas para estimativa do IAF, geralmente classificadas quanto à forma de medição em métodos diretos e indiretos. Os trabalhos de Jonckheere *et al.* (2004) e Bréda (2003) fazem uma revisão sobre os principais métodos diretos e indiretos para obtenção do IAF apontando suas vantagens e desvantagens.

Os métodos diretos estão relacionados às medidas tomadas diretamente na planta, sendo muito importantes para estimativa adequada e amostragem representativa, que será maior ou menor em função do tamanho e do tipo da cultura (COELHO FILHO *et al.*, 2012). Várias dificuldades ocorrem na avaliação de IAF em espécies arbóreas, principalmente em função do porte e do número de folhas de árvores adultas (GOWER *et al.*, 1999). Dificuldades adicionais podem ser observadas nos trabalhos realizados em condições de sistemas agroflorestais ou florestas (MACFARLANE *et al.*, 2007; WELLES; COHEN, 1996), quando a cobertura é heterogênea, dificultando a amostragem.

Os métodos diretos ou semidiretos para obtenção do IAF envolvem coleta de folhas a medição da área foliar (método destrutivo) das diferentes espécies de um determinado dossel, alometria e coleta de serrapilheira.

O método destrutivo consiste na retirada das folhas para medição da área de todas as folhas dentro de uma área delimitada, esse método é amplamente utilizado em culturas e pastagens, sendo também adaptado para vegetações de pequena estrutura. Porém, é destrutivo, sendo sua aplicação limitada à aplicação em grandes áreas e para vegetação de grande porte devido ao elevado esforço de trabalho e ao tempo demandado para execução. Além do mais, em algumas áreas, é proibido o corte das árvores (GOWER *et al.*, 1999).

Em alguns estudos foi desenvolvido um método menos destrutivo que busca relacionar a área de folhagem com o diâmetro da área de alburno à altura do peito ou na base da coroa das árvores (GOWER *et al.*, 1997). Existem hipóteses de que a área foliar possui relação com tecidos condutores, portanto, tais relações alométricas são dependentes do local e das espécies (GHOLZ *et al.*, 1979). Alguns autores (BIDLAK; BLACK, 1989; MAGUIRE;

BENNETT, 1996) apontam que a estimativa de relações alométricas através de amostragem destrutiva é um método confiável de avaliar IAF.

Desenvolver equações alométricas específicas do local é trabalhoso, portanto, os pesquisadores costumam usar equações alométricas já existentes. Numerosas publicações entre relações alométricas que relacionam a área foliar e diâmetro do caule são encontradas, porém, equações alométricas gerais para estimar IAF para uma área específica podem resultar em grandes erros (GRIER *et al.*, 1984).

Já o método da coleta de serrapilheira é comumente utilizado em florestas caducifólias. É um método não destrutivo usado para obtenção do IAF, que consiste na coleta de folhas em armadilhas distribuídas abaixo do dossel durante a queda das folhas (serrapilheira) no período de senescência. A queda de serrapilheira é diferente em cada espécie. No entanto, a triagem de serrapilheira requer habilidade substancial na identificação e é moroso, especialmente em uma floresta natural, com alta diversidade de espécies (GOWER *et al.*, 1999).

A serrapilheira deve ser recolhida em uma série de armadilhas com área de coleta conhecida, com intervalo de coleta curto (duas ou três semanas) para evitar perdas de material por decomposição. Neste método é necessário obter a área foliar específica de cada planta que compõe o dossel e a massa seca da serrapilheira coletada (ISHIHARA; HIURA 2011; KALÁCSKA *et al.*, 2005).

Nasahara *et al.*, (2008) sugeriram que a coleta de serrapilheira poderia ser substituída por uma estimativa da quantidade de serrapilheira de cada espécie e, se isso fosse possível, o método da serrapilheira seria bem mais preciso e eficiente, porém este trabalho torna-se impraticável em florestas com grande número de espécies, como é o caso da Caatinga.

Uma vantagem do método da serrapilheira é que o mesmo pode fornecer a taxa de decaimento do IAF durante a queda das folhas e a contribuição de cada espécie para o total do índice de área foliar. Há, porém, uma limitação: esse método não permite avaliar o período de ascendência do IAF sendo necessário utilizar outros métodos para esta avaliação, por exemplo, método da coleta destrutiva (BRÉDA, 2003; JONCKHEERE *et al.*, 2004).

Quanto aos métodos indiretos a área foliar é inferida a partir de observações de outras variáveis. Esses métodos são geralmente mais rápidos que os métodos diretos, podendo ser automatizados, bem como aplicáveis para maiores escalas e quando validados a partir dos métodos diretos, eles têm-se tornado mais confiáveis (JONCKHEERE *et al.*, 2004).

Existem vários métodos indiretos de avaliação do IAF. Os equipamentos são instalados abaixo da copa das árvores e o seu funcionamento baseia-se na medida de transmissão da luz através copa das plantas (CHEN *et al.*, 1997; WANG *et al.*, 2005).

Outra forma de estimar o IAF é por meio dos índices espectrais de vegetação. Os índices espectrais são construídos a partir de medidas de reflectância em dois ou mais comprimentos de onda comumente usados em uma ampla variedade de aplicações que visam monitorar e caracterizar a cobertura vegetal da Terra a partir do espaço. As características da vegetação que podem ser analisadas são: clorofila das folhas, índice de área foliar, conteúdo de água nas folhas etc. (MYNENI *et al.*, 1997; SALESKA *et al.*, 2007). Quando se trata de recursos naturais, um pixel das imagens geradas pode ser composto por três elementos principais, tais como solo, água e vegetação, que apresentam comportamentos distintos quanto à sua resposta espectral para os diferentes comprimentos de ondas. Isso pode ser um fator limitante do método (WULDER *et al.*, 1998; PONZONI *et al.*, 2012).

Song *et al.* (2013) apontaram os índices espectrais de vegetação como uma das principais abordagens para estimativa da produtividade primária dos ecossistemas terrestres. Estudos têm apresentado uma boa correlação entre os índices de espectral vegetação para diferentes coberturas do solo e em diferentes regiões hidrográfica (GONSAMO; PELLIKKA 2012; KALACSKA *et al.*, 2005; XAVIER; VETTORAZZI, 2004).

### **2.3 Sensoriamento remoto da vegetação**

O sensoriamento remoto é uma ciência que utiliza sensores para aquisição de informações sobre um objeto ou fenômenos sem que haja o contato físico entre eles. Os sensores são os equipamentos capazes de coletar energia proveniente do objeto, convertê-la em sinal passível de ser registrado e apresentá-lo em forma adequada à extração de informações (NOVO, 1989). A utilização do sensoriamento remoto associado as medições hidrológicas tomadas direto no campo, possibilita avanços no desenvolvimento de novos métodos necessários que irão auxiliar no monitoramento e gestão dos recursos naturais (LOPES *et al.*, 2014)

As técnicas utilizadas no sensoriamento remoto servem como ferramentas para estudos nas diversas áreas de conhecimento, fornecendo informações significativas na obtenção de dados relacionados a áreas florestais (intactas, exploradas, desmatadas, fragmentadas ou em regeneração), gerenciamento costeiro, corpos hídricos, usos do solo, entre outros. Fundamentam-se em um processo de interação entre a radiação eletromagnética e os diferentes alvos que se pretende estudar. Sua aplicação torna-se viável através do cumprimento de etapas

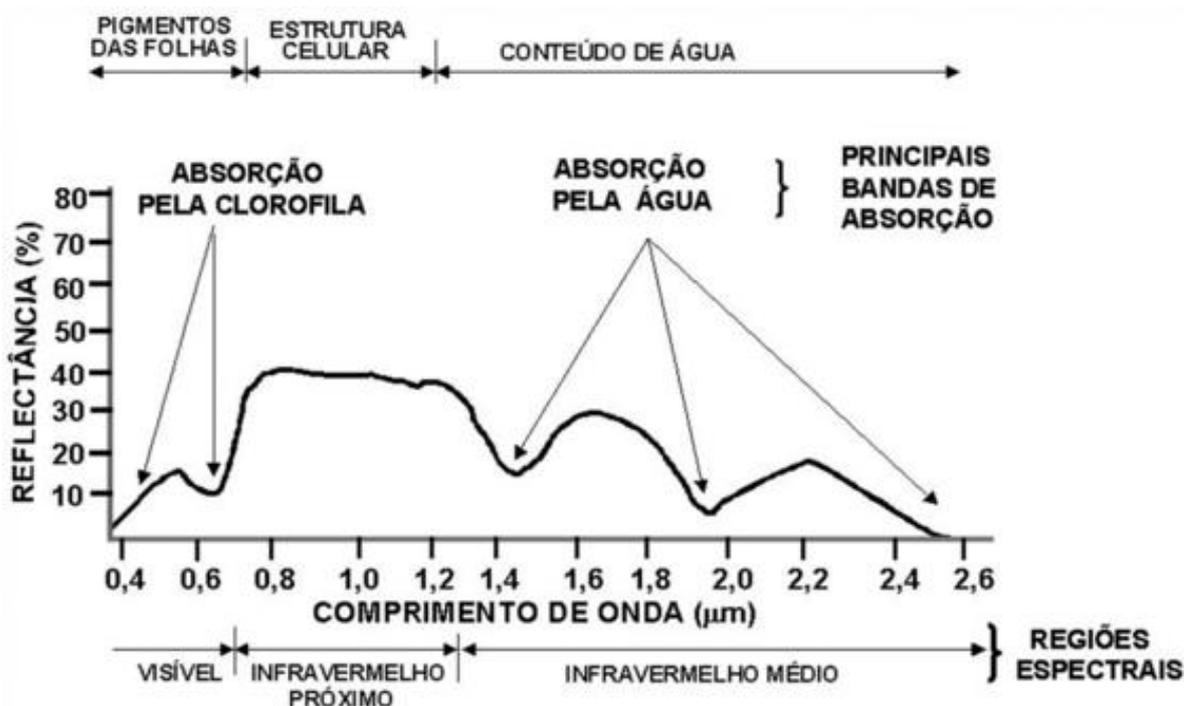
que incluem a caracterização do fenômeno de reflexão da radiação, a coleta de dados e seu registro através de um sensor e a análise desses dados com o objetivo de extrair as informações pretendidas de um determinado alvo (PONZONI *et al.*, 2012).

Assim como para o estudo da maioria dos recursos naturais, a aplicação das técnicas de sensoriamento remoto para o estudo da vegetação envolve duas abordagens principais, sendo uma relacionada ao estudo de dosséis e outra ao estudo de folhas isoladas. Nos dosséis são observados seus parâmetros biofísicos, relacionados às geometrias de iluminação e os parâmetros espectrais dos constituintes da vegetação. Quanto às folhas isoladas, realizam-se coletas de dados nos níveis de laboratório e de campo, como forma de se buscar a caracterização espectral de fenômenos relacionados à fisiologia e à morfologia da planta (SOUSA *et al.*, 1996).

Segundo Guyot *et al.* (1989) existem três regiões espectrais distintas, nas quais as propriedades óticas da folha são afetadas por alguns fatores, por exemplo, na faixa espectral do visível (0,40 – 0,70  $\mu\text{m}$ ), há uma baixa reflectância das folhas. A maior parte da radiação incidente é absorvida por pigmentos relacionados a clorofila, xantofilas e carotenos; Na faixa espectral do infravermelho próximo (0,70 – 1,30  $\mu\text{m}$ ), os pigmentos e as células das paredes das folhas são transparentes. Assim, a radiação eletromagnética é pouco absorvida pela folha, e a reflectância na faixa espectral do infravermelho é maior entorno de 50%. Este nível depende da estrutura interna da folha. O aumento deste nível está relacionado com o número de camadas de células, com o tamanho das células e a orientação das paredes da folha; já na faixa espectral do infravermelho médio (1,30 – 2,50  $\mu\text{m}$ ), as propriedades óticas das folhas são afetadas principalmente pelo seu conteúdo de água. Após 1,30  $\mu\text{m}$  ocorrem fortes bandas de absorção pela água (1,45, 1,95, e 2,50  $\mu\text{m}$ ), originando reflectâncias mínimas na folha.

O mesmo comportamento de resposta espectral da folha pode ser válido para os dosséis. Dessa forma, visando utilização de imagens de satélites derivadas dos diversos sensores disponíveis para caracterização da vegetação, é de se esperar que – em imagens da região do visível – os dosséis apresentem tonalidade escura devido à baixa reflectância. Isso se dá em função da ação dos pigmentos fotossintetizantes. Em imagens da região do infravermelho próximo, estes mesmos dosséis deverão apresentar-se com tonalidade clara e em imagens do infravermelho médio esperam-se tons de cinza intermediários entre o escuro das imagens do visível e o claro daquelas do infravermelho próximo (PONZONI *et al.*, 2012). A Figura 1 apresenta uma típica curva de reflectância da vegetação verde, identificando as regiões de resposta espectral de maior significância.

Figura 1 - Comportamento espectral da vegetação



Fonte: Adaptado de Ponzoni *et al.* (2012).

## 2.4 Índices espectrais de vegetação

Entre os índices espectrais de vegetação mais utilizados para monitoramento da vegetação, destaca-se o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). É também um dos mais antigos, sendo bastante utilizado ainda hoje. O índice foi proposto por Rouse *et al.* (1973), trata da normalização dos dados espectrais das bandas do infravermelho próximo e do vermelho. O índice de vegetação melhorado (EVI), proposto por Huete *et al.* (1997) e Justice *et al.* (1998), busca otimizar o sinal da vegetação usando a refletância do azul para corrigir os sinais de fundo do solo e reduzir as influências atmosféricas, intensificando a resposta em regiões de elevada concentração de biomassa. Mais recentemente, Jiang *et al.* (2008) propuseram um novo índice (EVI2), baseado no EVI, porém com retirada da banda azul, pois, segundo os autores, a banda azul não fornece informações adicionais sobre as propriedades biofísicas da vegetação. O índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) surgiu como alternativa ao NDVI, buscando minimizar o efeito do solo no seu valor final, pois as características do solo têm considerável influência no espectro de radiação proveniente de dosséis espaçados (HUETE, 1988). O ARVI busca minimizar os efeitos atmosféricos. Esse índice usa a refletância do azul para corrigir a refletância do vermelho para dispersão atmosférica, sendo mais útil em regiões com elevado teor de aerossóis. Outros índices vêm sendo criados a partir da evolução dos sensores (multiespectrais para hiperspectrais) a fim de encontrar melhor correlação entre os parâmetros biofísicos da paisagem e a resposta espectral nos diferentes comprimentos de ondas

captados pelos sensores (GONSAMO; PELLIKKA 2012; KALACSKA *et al.*, 2005; WANG *et al.*, 2005).

- Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI

O NDVI é um importante parâmetro para vários tipos de modelos de escala local, regional e global (MASCOVÁ *et al.*, 2008) e tem sido usados na estimativa de diversos parâmetros da vegetação, tornando possível a avaliação das variações espaciais, temporais e fenológicas de dosséis dos diversos biomas do planeta, como, por exemplo, quantidade de biomassa verde (TUCKER, 1979), parâmetros de crescimento e desenvolvimento fenológico da vegetação e índice de área foliar (MYNENI *et al.*, 2002; WANG *et al.*, 2005).

Estudos sobre vários tipos de vegetação, por exemplo, pastagem (FRIEDL *et al.*, 1994 ), Cerrados (LAW; WARING, 1994), florestas de coníferas (COHEN *et al.*, 2003 ), florestas caducifólias (FASSNACHT *et al.*, 1997; WANG *et al.*, 2005), Caatinga (COSTA *et al.*, 2002) e culturas agrícolas (SUGAWARA *et al.*, 2009) levaram à conclusão geral de que o NDVI tem relação significativa com o IAF.

Porém, devem-se tomar alguns cuidados ao utilizar este índice, pois o NDVI aumenta com o aumento do IAF, mas depois entra em uma fase assintótica em que o NDVI aumenta muito lentamente com o aumento da IAF. Diversos estudos demonstraram que essa região assintótica refere-se a uma superfície quase completamente coberta pelas folhas (CARLSON; RIPLEY, 1997; HUETE *et al.*, 1985). Sobre superfícies densamente cobertas de vegetação, o NDVI responde principalmente à reflectância vermelha e é relativamente insensível a variações do infravermelho próximo e, portanto, incapaz de descrever variações do IAF (HUETE *et al.*, 1997).

De acordo com medições experimentais com diferentes coberturas do solo, o NDVI aproxima-se dos máximos quando a vegetação cobre entre 80% e 90% da superfície do solo (HUETE *et al.*, 1985). Experiências semelhantes realizados por Díaz e Blackburn (2003) mostraram NDVI atingindo valores assintóticos em coberturas vegetais acima de 60%.

De acordo com Ponzoni *et al.* (2012) para uma melhor avaliação do NDVI ou de qualquer IEV devemos atentar para alguns fatores limitantes, por exemplo, ponto de saturação, onde através do IEV não é possível avaliar o incremento de biomassa, distribuição espacial da vegetação, densidade e orientação que definem a arquitetura do dossel, presença de nuvens, efeito atmosférico oriundo de gases, poeira, umidade etc., características das bandas espectrais do sensor utilizado.

- Índice de vegetação melhorado – EVI e EVI2

O EVI foi desenvolvido para se trabalhar com dados obtidos a partir do sensor MODIS dos satélites Terra e Acqua (HUETE *et al.*, 1997). Esse índice é mais sensível ao sinal da vegetação com elevada biomassa, minimizando os efeitos do solo e da atmosfera, isso em relação ao NDVI (JUSTICE *et al.*, 1998).

O EVI utiliza uma banda azul, além das bandas vermelho e infravermelho próximo. Em comparação com NDVI, EVI pode ser mais linearmente correlacionados com o IAF em campos de cultivo (BOEGH *et al.*, 2002), menos propenso à saturação em florestas temperadas e tropicais (HUETE *et al.*, 2006; XIÃO *et al.*, 2004) e minimamente sensível à presença de aerossóis presentes na atmosfera (MIURA *et al.*, 1998; XIAO *et al.*, 2003). Wardlow *et al.* (2007) constataram que o EVI exibiu mais sensibilidade durante o aumento do IAF diferente do NDVI.

Wang *et al.* (2005) encontraram boas correlações lineares entre IAF e NDVI e entre IAF e EVI, sendo o NDVI derivado de imagens do satélite MODIS. Os bons resultados foram encontrados durante o período de produção da folha. No entanto, os mesmos autores não encontraram boa correlação para o período em que a área foliar era constante. A maior discrepância foi encontrada durante o período de senescência foliar.

Embora existam muitos estudos sobre a utilização do EVI, as investigações sobre a utilização do EVI derivados de outros sensores, por exemplo, o Landsat, ainda é limitada. Fensholt *et al.* (2006) sugeriram que a consistência dos valores de EVI obtidos através de diferentes sensores pode ser limitada, pois impede a utilização de imagens de sensores que não possui a banda azul, além de ser difícil gerar longas séries de dados, quando comparado com índices que usam apenas duas bandas.

Além dessa limitação, Jiang *et al.* (2008) verificaram que banda azul no EVI não fornece informações adicionais sobre as propriedades biofísica da vegetação e que uma adaptação com apenas duas bandas poderia ser sugerida para melhorar o EVI. Dessa forma, os autores propuseram o índice de vegetação melhorado EVI2, utilizando apenas as bandas infravermelho próximo e vermelho. Um conjunto de dados de imagens do sensor MODIS foi usado para desenvolver e validar a equação do EVI2 e alcançar melhor semelhança entre EVI e EVI2. A semelhança entre os dois índices foi avaliada e demonstrou a dinâmica da vegetação em escalas local e global. Nos resultados, demonstram que as diferenças entre EVI e EVI2 são insignificantes ao longo de uma amostra muito grande para diferentes coberturas do solo. Isso indica o índice EVI2 como um substituto aceitável do índice EVI.

Mondal (2011) quantificou gradientes de superfície com EVI2 e mostrou em seus resultados forte correlação entre EVI2 e classes de cobertura terrestre, sugerindo que o índice pode ser utilizado, por exemplo, para monitoramento ambiental da atividade fenológica da vegetação em diferentes ecossistemas. Além disso, o EVI2 tem a capacidade de capturar mudanças sutis na condição da vegetação e é menos sensível a variações de reflectância de fundo referente a diferentes tonalidades de solo (ROCHA; SHAVER, 2009).

- Índice de vegetação ajustado ao solo - SAVI

As características do solo têm uma considerável influência no espectro de radiação proveniente de dosséis vegetais esparsos e, conseqüentemente, no cálculo dos índices de vegetação. A diferença na resposta do vermelho e do infravermelho próximo em um dossel faz com que seja difícil corrigir influências do fundo do solo e, nesse sentido, numerosos estudos vêm sendo desenvolvidos para diminuir problemas deste tipo. A reflectância do solo, principalmente em solos mais escuros, interfere nos valores dos índices de vegetação, por exemplo, verifica-se o aumento nos valores de NDVI (HUETE, 1988).

Huete (1988) verificou que a sensibilidade dos índices de vegetação em relação ao material de fundo (solo) é maior em dosséis com níveis médios de cobertura vegetal (50% de cobertura verde). Com baixa densidade de vegetação, a reflectância do solo se sobressai enquanto, em vegetação muito densa, a reflectância do solo é pouco significativa. Entretanto, nos níveis intermediários de vegetação (vegetação espaçadas), a dispersão e transmissão de infravermelho próximo são significativas através do dossel, produzindo uma assinatura espectral difícil de identificar se é solo ou vegetação.

Por isso, no SAVI introduz-se uma constante “L” que tem a função de minimizar o efeito do solo no resultado final do índice. Esta constante foi estimada a partir de considerações feitas por Huete (1988) e introduzidas nas medições experimentais da reflectância, calculada para as bandas do infravermelho próximo e do vermelho em duas culturas agrícolas: algodão e pastagem.

Gao *et al.* (2000) analisaram a precisão dos Índices Espectrais de Vegetação - IEVs na estimativa de parâmetros biofísicos da vegetação e obtiveram melhores desempenhos do SAVI em relação ao NDVI, em áreas com diferentes tipos de solos e diferentes densidades de vegetação. Rodrigues *et al.* (2013) verificaram em seus estudos que os índices NDVI, EVI e SAVI apresentaram desempenhos semelhantes, porém, o SAVI foi o mais adequado, já que distingue melhor áreas com pouca vegetação, como era o caso da área de estudo. Resultados

semelhantes foram observados por Boratto e Gomide (2013), que utilizaram IEVs para estudar caracterização da cobertura vegetativa da região Norte de Minas Gerais.

- Índice de Vegetação Resistente a Atmosfera – ARVI

Aerossóis dispersam a radiação solar antes de atingir a superfície e se dispersa ou absorve mesmo depois de ser refletida pela superfície impedindo que a resposta espectral seja captada pelos sensores. Porém, existem dois tipos de correção: a direta, em que a carga de aerossóis é corrigida na própria imagem; e a indireta, obtida através da definição de funções de sensoriamento remoto, que são menos dependente da carga de aerossóis (KAUFMAN; TANRÉ, 1996).

O ARVI foi proposto e desenvolvido para ser usado no monitoramento da vegetação com imagens do MODIS, mas pode também pode ser utilizado a partir de imagens do Landsat. Buscou-se nesse índice a melhora dos resultados através da inserção da banda azul, além do vermelho e do infravermelho.

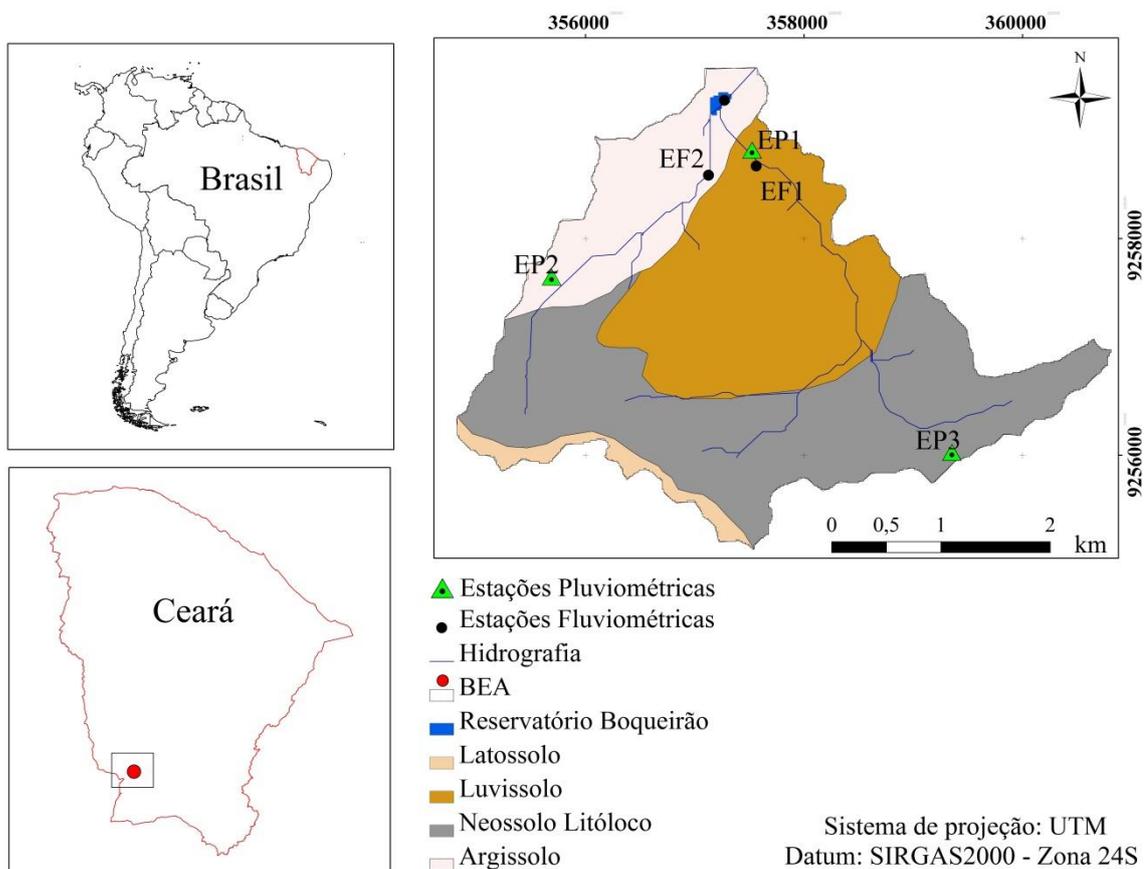
O ARVI é, em média, quatro vezes menos sensível aos efeitos atmosféricos que o NDVI, sendo mais favorável para superfícies totalmente cobertas pela vegetação, para as quais a influência do efeito atmosférico é maior do que para os solos. O índice é melhor para partículas de aerossol de tamanho pequeno ou médio (KAUFMAN *et al.*, 1992).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Área de estudo

O estudo foi realizado na Bacia Experimental de Aiuaba – BEA (Figura 2), com área total de 12 km<sup>2</sup>, controlada, em seu exutório, por um reservatório com capacidade para armazenar 0,06 , localizada no município de Aiuaba, Estado do Ceará, Brasil, coordenadas 6°42' S e 40°17' W. A BEA é totalmente preservada, localizada integralmente dentro da Estação Ecologia – ESEC de Aiuaba, a maior unidade de conservação federal do bioma Caatinga, administrada pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente – IBAMA (DE ARAÚJO; PIEDRA, 2009). O clima é BSh de acordo com a classificação de Köppen, apresentando precipitação média de 560 mm.ano<sup>-1</sup>, evaporação do tanque classe A de 2500 mm.ano<sup>-1</sup> e coeficiente de escoamento superficial mediano inferior a 1% (FIGUEIREDO *et al.*, no prelo). No que diz respeito a suas variáveis hidrológicas, a bacia vem sendo monitorada continuamente pelo Grupo de Pesquisa Hidrossedimentológica do Semiárido – Hidrosed (<http://www.hidrosed.ufc.br>) desde janeiro de 2003.

Figura 2 – Localização da BEA



Fonte: Elaborada pelo autor.

A BEA apresenta boa instrumentação em relação à realidade do monitoramento climatológico na maioria dos países em desenvolvimento contando com três estações pluviométricas distribuídas na bacia conforme a Figura 2. A região é caracterizada por precipitações com alta variabilidade espacial e temporal. Em casos de falha de dados da Estação Climatológica da BEA, variáveis climatológicas como radiação, temperatura e umidade relativa do ar podem ser obtidas a partir de estações relativamente próximas à área de estudo (Campos Sales, Assaré e Tauá) (COSTA, 2012).

O regime pluviométrico da área de estudo, assim como a região nordeste do Brasil, apresenta forte variabilidade inter e intra-anual, com período chuvoso bem definido (entre os meses de janeiro e maio), responsável por mais de 80% da precipitação anual. Quarenta e seis por cento da precipitação anual ocorrem durante os meses de março e abril. As chuvas têm caráter convectivo, concentradas em poucos eventos de elevada intensidade (MEDEIROS, 2009; GALVÃO *et al.*, 2005).

- **Vegetação**

A vegetação presente na BEA é Caatinga tipicamente caducifólia. Segundo Lemos (2006), o termo Caatinga é utilizado no Nordeste Brasileiro para designar qualquer comunidade vegetal padronizada pelo seu aspecto fisionômico, resultante da caducifólia de suas espécies no período seco, assumindo caráter tropofítico e refletindo a semiaridez no chamado Polígono das Secas. A Caatinga apresenta exuberância arbórea no período em que as plantas apresentam o ápice vegetativo (período chuvoso) e perda total das folhas da maioria das plantas como forma adaptativa ao período de estiagem, característico da região semiárida.

- **Associação solo vegetação**

A BEA é dividida em três principais Associações Solo Vegetação (ASV), as três ASVs (Tabela 1) foram definidas por Pinheiro *et al.* (2013).

Tabela 1 – Caracterização e distribuição das Associações Solo-Vegetação (ASV) na BEA

ASV	Espécie representativa da vegetação	Classe de solo	Ocupação na BEA (km <sup>2</sup> /%)
ASV1	Catingueira ( <i>Caesalpinia pyramidalis</i> Tul)	Luvissolo Crômico	6,84 / 57
ASV2	Angelim ( <i>Piptadenia obliqua</i> )	Argissolo Vermelho-Amarelo	1,32 / 11
ASV3	Jurema-preta <i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) Poir	Neossolo Litólico	3,84 / 32

### 3.2 Medidas *in-situ* do Índice de Área Foliar

Neste estudo a estimativa do IAF foi realizada pela forma direta utilizando o método da coleta de serrapilheira, método mais indicado para vegetação do tipo caducifólia.

Inicialmente foram demarcadas duas unidades fitossociológicas em cada ASV com as dimensões de 10 metros de largura por 20 metros de comprimento com o propósito de avaliar a diversidade de espécies dentro de cada associação ASV. Dessa forma, a área foliar específica média de cada ASV foi obtida de acordo com as médias das espécies presentes nas unidades fitossociológicas.

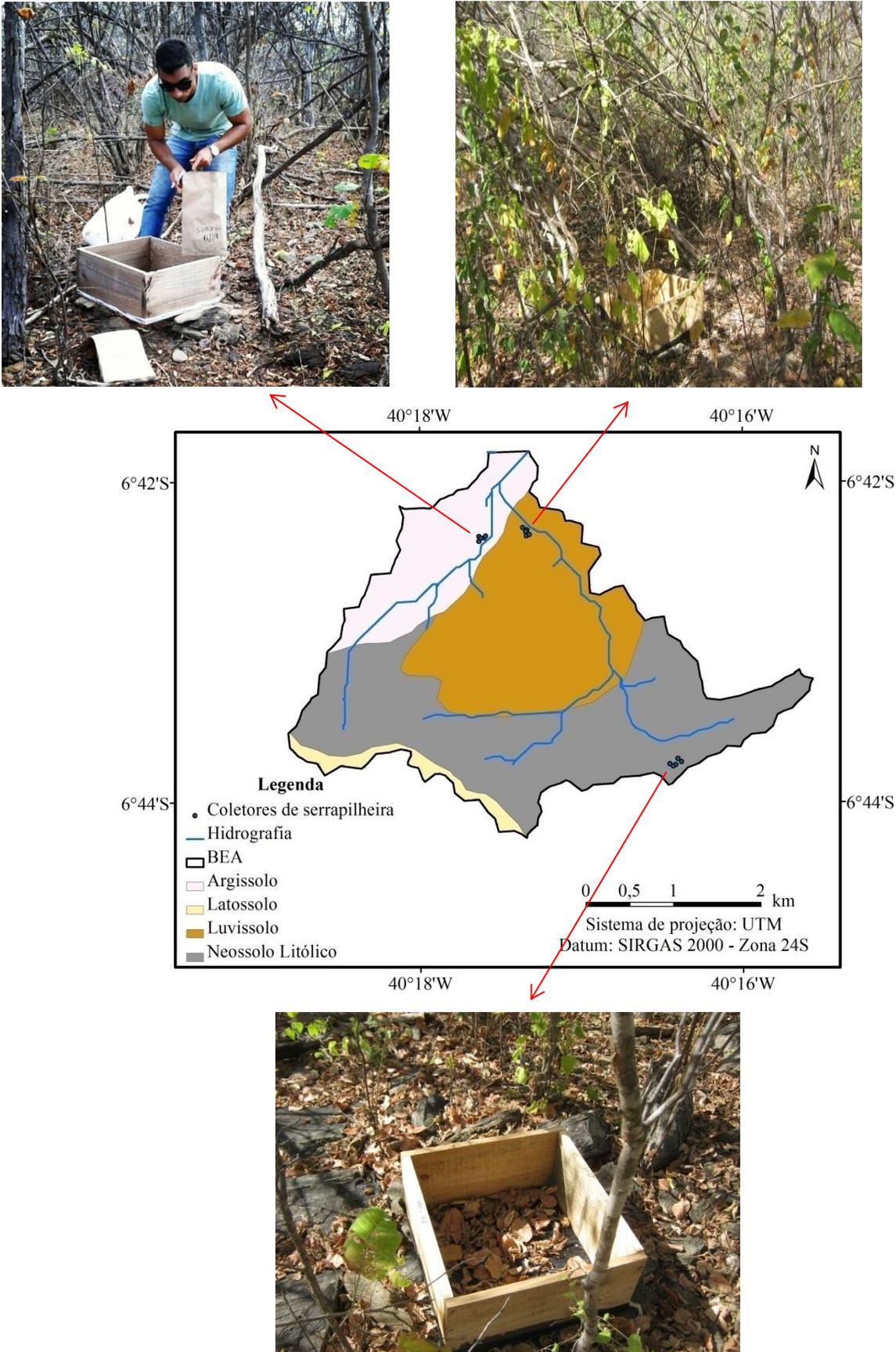
Para estimativa do IAF pelo método da coleta de serrapilheira foram dispostos cinco coletores de serrapilheira em cada ASV, os coletores foram feitos de madeira e possuíam uma área de coleta de 0,25 m<sup>2</sup> (Figura 3). Os coletores ficavam a uma distância maior que 30 metros um do outro, evitando assim problemas na hora de correlacionar o IAF com os Índices Espectrais de Vegetação – IEVs, visto que a resolução espacial do satélite Landsat8 é de 30 metros. As coletas (Figura 3) foram realizadas periodicamente, o que possibilitou fazer o acompanhamento da taxa de decaimento do IAF durante o período de queda das folhas que ocorre após o encerramento da estação chuvosa, as datas das coletas da serrapilheira foram feitas sempre buscando combinar com as datas de passagem do satélite Landsat8 sobre a área de estudo.

A estimativa do IAF por meio do método da coleta de serrapilheira seguiu a metodologia sugerida por Ishihara e Hiura (2011). O método utilizado assume que o total da biomassa das folhas caídas no coletor pode ser dividido igualmente por cada uma das espécies que compõem a associação fitossociológica. Dessa forma, o IAF do coletor de serrapilheira foi estimado pela Equação 1.

$$IAF = AFE_m \times \frac{P_s}{A} \text{ ou } IAF = MFE_m \times \frac{A}{P_s} \quad (1)$$

Em que:  $AFE_m$  é a área foliar específica média (m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>),  $MFE_m$  é a massa foliar específica média (g.m<sup>-2</sup>),  $P_s$  é a massa da serrapilheira coletada (g) e  $A$  é a área do coletor de serrapilheira (m<sup>2</sup>).

Figura 3 – Localização dos coletores e coleta de serrapilheira



Fonte: Elaborada pelo autor.

A área foliar específica (*AFE*) de cada espécie foi estimada utilizando amostra de folhas coletadas em diferentes posições da copa, folhas do topo que recebem maior incidência de raios solares e folha das partes sombreada da copa. A área das folhas amostradas foi obtida por meio de um integrador de área foliar modelo LI-3100 LICOR (Figura 4) e, em seguida, as folhas foram secadas em estufa durante 48 horas a uma temperatura de 65°C e posteriormente pesadas. A *AFE* para cada espécie foi obtida dividindo-se a sua área foliar (m<sup>2</sup>) das folhas amostras pela respectiva massa (g).

Figura 4 – Medição da área foliar das amostras coletadas para determinação da área foliar específica



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.3 Estimativa dos índices espectrais de vegetação

Com o avanço do sensoriamento remoto, principalmente por satélites, e das técnicas de geoprocessamento é possível calcular diversos índices de vegetação por meio da combinação das diferentes bandas espectrais acopladas aos sensores dos satélites. Entre os satélites disponíveis o Landsat8 se destaca por disponibilizar livremente suas imagens possuindo boa resolução espacial e temporal. As imagens utilizadas para obter os diferentes IEVs foram obtidas do satélite Landsat8, cujas características estão apresentadas na Tabela 2. Por meio da

utilização das bandas do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (RED) é possível obter o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI). Somando as outras duas bandas (NIR e RED) com a banda azul (BLUE), podem ser calculados mais dois índices de vegetação: o Índice de Vegetação Melhorado (EVI) e o Índice de Vegetação Resistente a Atmosfera (ARVI).

Tabela 2 – Principais características das imagens do satélite Landsat8 *Operational Land Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS)

<b>Bandas</b>	<b>Comprimento de onda (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Resolução espacial (m)</b>
Band 1 – Coastal aerosol	0,43 – 0,45	30
Band 2 – Blue	0,45 – 0,51	30
Band 3 – Green	0,53 – 0,59	30
Band 4 – Red	0,64 – 0,67	30
Band 5 – Near Infrared (NIR)	0,85 – 0,88	30
Band 6 - SWIR 1	1,57 – 1,65	30
Band 7 - SWIR 2	2,11 – 2,29	30
Band 8 – Panchromatic	0,50 – 0,68	15
Band 9 – Cirrus	1,36 – 1,38	30
Band 10 – Thermal Infrared (TIRS) 1	10,60 – 11,19	100
Band 11 – Thermal Infrared (TIRS) 2	11,50 – 12,51	100

Fonte: <http://landsat.usgs.gov/landsat8.php>

As imagens consistem de nove bandas espectrais com resolução espacial de 30 metros para as Bandas 1 a 7 e 9. Uma nova banda 1 (ultra - azul) é útil para estudos e locais com elevada presença de aerossóis. A nova banda 9 é útil para detecção de nuvens. A resolução espacial da banda 8 (panchromatica) é de 15 metros. As bandas termais 10 e 11 são úteis no fornecimento de temperaturas de superfície mais precisos e são coletados em 100 metros. O tamanho das cenas é aproximadamente de 170 km Norte-Sul por 183 km Leste-Oeste.

### 3.3.1 Correção das imagens Landsat

Para o cálculo adequado dos índices de vegetação realizou-se inicialmente a conversão dos valores de número digital (*Digital Number - ND*), das imagens, para valores físicos de radiância. Posteriormente, obteve-se reflectância, no topo da atmosfera e, em seguida, obteve-se a reflectância de superfície. Para realizar os cálculos de calibração das bandas e correção atmosférica das imagens Landsat8 OLI utilizou-se a ferramenta FLAASH do *software* ENVI 5.1. O ENVI 5.1 tem um módulo de correção atmosférica para a recuperação de reflectância espectral. FLAASH incorpora a resolução de transmissão de transferência radiativa moderado. Os parâmetros do modelo para correção atmosférica seguiram as recomendações de Li *et al.* (2014). Segundo essas recomendações, para áreas rurais com características semelhantes às da BEA, os autores recomendam, normalmente, utilizar “Atmosfera Tropical e Aerossóis Rurais”.

### 3.3.2 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

O NDVI é um dos primeiros utilizados e conhecidos dentre os índices de vegetação. Conforme proposição de Rouse *et al.* (1973) o NDVI normaliza a razão simples para o intervalo de -1 a +1, no qual as áreas de vegetação mais intensa aproximam-se dos patamares superiores e corpos hídricos, do limite inferior. Constitui-se em um dos índices de vegetação de maior difusão, com larga aplicabilidade em estudos de culturas agrícolas, florestais e climáticos (Equação 4).

$$NDVI = \frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{\rho_{IVP} + \rho_V} \quad (4)$$

em que:  $\rho_{IVP}$  é a reflectância da banda 5 (infravermelho próximo) e  $\rho_V$  é a reflectância da banda 4 (vermelho)

### 3.3.3 Índice de Vegetação Melhorado (EVI e EVI2)

O Índice de Vegetação Melhorado (EVI) busca otimizar o sinal da vegetação usando a refletância do azul para corrigir os sinais de fundo do solo e reduzir as influências atmosféricas, intensificando a resposta em regiões de elevada concentração de biomassa (Equação 5). Os valores desse índice variam de -1 a +1 sendo a faixa comum para vegetação verde de 0,2 a 0,8 (HUETE *et al.*, 1997; JUSTICE *et al.*, 1998).

$$EVI = G \left( \frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{L + \rho_{IVP} + C1 \times \rho_V - C2 \times \rho_A} \right) \quad (5)$$

em que:  $\rho_A$  é a reflectância no azul; L é o fator de ajuste para o solo (1,0); G é o fator de ganho (2,5); C1 e C2 são coeficientes de ajuste para o efeito de aerossóis da atmosfera (6,0 e 7,5).

Já o EVI2 com apenas duas bandas proposto por Jiang *et al.* (2008) é obtido sem a utilização da banda azul (Equação 6).

$$EVI2 = 2,5 \left( \frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{\rho_{IVP} + 2,4 \times \rho_V + 1} \right) \quad (6)$$

### 3.3.4 Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI)

O SAVI surgiu como alternativa ao NDVI buscando minimizar o efeito do solo no seu valor final, pois as características do solo tem considerável influência no espectro de radiação proveniente de dosséis esparsos (HUETE, 1988). O SAVI introduziu um fator “L” que tem a função de minimizar o efeito do solo, sendo ele estimado a partir de considerações feitas por Huete (1988) (Equação 7).

$$SAVI = \left[ \frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{\rho_{IVP} + \rho_V + L} \right] \times (1 + L) \quad (7)$$

em que: L é a constante que inimizava o efeito do solo e pode variar de 0 a 1. Segundo Huete (1988) os valores recomendados de L são: L=1 para densidades baixas de vegetação; L=0,5 para densidades médias; e L=0,25 para altas densidades de vegetação.

### 3.3.5 Índice de Vegetação Resistente a Atmosfera (ARVI)

O ARVI é foi proposto como substituto do NDVI que é relativamente resistente a fatores atmosféricos. Ele usa a reflectância no azul para corrigir a reflectância no vermelho para dispersão atmosférica. É mais útil em regiões com elevado teor de aerossóis atmosféricos, incluindo as regiões tropicais (Equação 8).

$$ARVI = \frac{\rho_{IVP} - (2\rho_V - \rho_A)}{\rho_{IVP} + (2\rho_V - \rho_A)} \quad (8)$$

Os IEVs foram obtidos a partir de quatro imagens do satélite Landsat8 OLI/TIRS disponibilizada pela plataforma do USGS (United States Geological Survey - <http://www.usgs.gov>) as imagens correspondem à órbita 217, ponto 65, adquiridas sob a condição de céu claro, datadas de 02/06/2014, 04/07/2014, 13/02/2015 e 07/07/2015. Estas foram às datas mais próximas das datas de obtenção do IAF. Maior número de imagens não foi utilizado para obtenção dos IEVs devido à presença de nuvens cobrindo a área de interesse, principalmente nos primeiros seis meses do ano, período que coincide com a presença de folhas na vegetação.

### 3.4 Parâmetros estatísticos

Obtidos os índices IAF e IEVs, foram gerados modelos de regressão linear entre os mesmos, afim de testar a possibilidade de avaliar o IAF através dos diferentes IVEs. Para as quatro imagens utilizadas nesse estudo obteve-se um total de quarenta e nove pontos de IEVs possíveis de comparar com o IAF. Desse modo, foram utilizados vinte e nove pontos, 60% dos dados, para calibrar os modelos e vinte pontos, 40% dos dados, para validação dos modelos.

Para avaliar o desempenho das equações geradas na calibração e validação dos modelos de regressão linear para estimar IAF a partir dos IEVs foram utilizados os seguintes critérios: coeficiente de Nash e Sutcliffe (1970) – NSE (Equação 9), este coeficiente pode variar de  $-\infty$  até 1, sendo 1 ajuste perfeito. O desempenho de um modelo é considerado adequado e bom se o valor de NSE superar 0,75 e considerado aceitável se o valor de NSE estiver entre 0,36-0,75; coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que indica o grau de correlação entre as variáveis; índice de concordância ( $d$ ), proposto por Willmott (1981), que indica o grau de precisão da equação de regressão (Equação 10), podendo assumir valores que variam de zero (nenhuma concordância) a um (concordância perfeita); o índice de confiança do modelo ( $C$ ), obtido pelo produto entre o coeficiente de correlação ( $R$ ) e o índice  $d$ , também podendo assumir valores de zero a um, sendo seu desempenho interpretado de acordo com a Tabela 3 (CAMARG; SENTELHAS, 1997); além da raiz quadrada do erro quadrado médio (RMSE) obtido pela Equação 11 .

$$NSE = 1 - \left[ \frac{(\sum Y_m - Y_c)^2}{(\sum Y_m - \bar{Y}_m)^2} \right] \quad (9)$$

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum (Y_c - Y_m)^2}{\sum (|Y_c - \bar{Y}_m| + |Y_m - \bar{Y}_m|)^2} \right] \quad (10)$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum (Y_c - Y_m)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

Em que:  $Y_m$  é o valor medido,  $Y_c$  é o valor calculado,  $\bar{Y}_m$  é a média dos valores medidos e  $N$  o número de pares de dados.

Tabela 3 – Critérios de interpretação do coeficiente “C”.

<b>Valor de C</b>	<b>Desempenho</b>
$> 0,85$	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Ruim
$\leq 0,40$	Péssimo

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, serão apresentados os resultados de monitoramento e avaliação do IAF para a Caatinga na Bacia Experimental de Aiuaba, assim como sua correlação com os índices espectrais de vegetação para os dois anos de monitoramento. Apresentam-se tabelas da área foliar específica, decaimento do IAF, IAF medido e estimado assim como os parâmetros estatísticos de calibração e validação, além de mapas temáticos com os cinco IEVs avaliados neste estudo.

### 4.1 Massa foliar específica ou área foliar específica

A Tabela 4 apresenta a massa foliar específica (*MFE*) das espécies encontradas nas unidades fitossociológicas. Não foi possível identificar as espécies marcadas com asterisco durante o período de monitoramento, pois para identificação é necessário a presença de partes reprodutivas da planta, flor ou fruto, sendo possível apenas a coleta de folhas para avaliação da *MFE*. A *MFE* média neste estudo foi de 76,76 g.m<sup>-2</sup> para vinte e duas espécies avaliadas. A *MFE* mínima foi de 46,06 g.m<sup>-2</sup> e a máxima de 122,49 g.m<sup>-2</sup>, levando em consideração as folhas de topo que recebem maior radiação e folhas de sombra. Assim como os resultados encontrados por Ishihara e Hiura (2011), foi possível avaliar o IAF através da utilização da *MFE* ou *AFE*. Na ocasião, os autores encontraram a massa foliar específica média de 56,6 g.m<sup>-2</sup> para 17 espécies avaliadas, sendo a mínima de 38,9 g.m<sup>-2</sup> e a máxima de 73,5 g.m<sup>-2</sup>. O IAF médio encontrado neste estudo foi pouco inferior a 3 (2,98) para os dois anos avaliados, enquanto que o IAF médio encontrado por Ishihara e Hiura (2011) foi pouco superior a 4 (4,05).

Bréda (2003) encontrou *MFE* variando entre 26,3 g.m<sup>-2</sup> e 83,3 g.m<sup>-2</sup> para espécies de folha larga. Segundo ele, a estimativa da massa foliar específica ou a área foliar específica é o ponto mais crítico quando se utiliza o método de coleta de serrapilheira, pois o índice varia de acordo com as diferentes espécies, tipo e fertilidade do solo e época do ano.

Eriksson *et al.* (2005) encontrou em uma floresta caducifolia temperada, *MFE* variando entre 32,4 g.m<sup>-2</sup> e 104,2 g.m<sup>-2</sup> e verificou que a *MFE* foi 67% mais baixa para folhas de topo do que a *MFE* para folhas de sombra, destacando a importância da coletas de folhas de diferentes posições da copa para evitar erro na estimativa do IAF. Em seu trabalho, Eriksson *et al.* (2005) encontraram IAF variando entre 2 e 5, nesse caso, observa-se que tanto os valores de *MFE* quando de IAF encontrados pelos referentes autores assemelham-se aos da Caatinga.

Tabela 4 – Massa foliar específica das espécies avaliadas nas seis unidades fitossociológica em Aiuaba – CE, entre 2013 e 2015

Identificação	Nome popular	Espécie	Massa foliar por área (g/m <sup>2</sup> )
Espécie1	Marmeleiro	<i>Euphorbiaceae Crotonblanchetianus</i>	46,06
Espécie2	-	<i>Poincianella bracteosa</i> (Tul.) L. P. Queiroz	75,96
Espécie3	-	<i>Cordia trichotoma</i> (Vell.) Arráb. ex Steud.	94,56
Espécie4	Juazeiro	<i>Ziziphus joazeiro</i> Mart.	74,00
Espécie5	-	*	54,95
Espécie6	Angico	<i>Anadenanthera colubrina</i>	99,45
Espécie7	-	*	60,75
Espécie8	Cipaúba	*	63,85
Espécie9	-	*	117,35
Espécie10	-	*	86,61
Espécie11	-	*	89,29
Espécie12	-	*	90,33
Espécie13	Pereiro	<i>Aspidosperma pyrifolium</i>	122,49
Espécie14	Fruta de pombo	<i>Erythroxylum caatingae</i> Plowman	63,34
Espécie15	Imburana	<i>Commiphora leptophloeos</i> (Mart.) J.B Gillett	62,77
Espécie16	Jurema branca	<i>Piptadenia stipulacea</i> (Benth.) Ducke	90,72
Espécie17	Jurema preta	<i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) Poir.	54,94
Espécie18	Caatingueira	<i>Fabaceae-Caes. Poincianella bracteosa</i>	102,51
Espécie19	Pinhão	<i>Euphorbiaceae Jatropha curcas</i> L.	66,36
Espécie20	Mucunã	<i>Dioclea grandiflora</i>	46,92
Espécie21	Unha de gato	<i>Fabaceae-Mim. Senegaliatenuifolia</i>	50,98
Espécie22	Guachumba	<i>Boraginaceae Varronia leucocephala</i>	74,64
<b>Média ± desvio padrão</b>			<b>76,76 ± 22,08</b>

## 4.2 Índice de área foliar

A avaliação do IAF da Caatinga pode ser relacionada com o clima, pois esse bioma encontra-se sob condições de clima semiárido, que certamente reflete nas suas singularidades adaptativas e na biodiversidade, conduzindo as espécies a evoluções fisiológicas específicas e comportamentos que garantam sua sobrevivência (COSTA *et al.*, 2007; VIEIRA *et al.*, 2009). No entanto, o fator climático não pode ser o único fator considerado para avaliar o IAF, sendo importante considerar as unidades de paisagem buscando relacionar com fatores como tipo de solo, uso e ocupação do solo e relevo (ARAGÃO *et al.*, 2005).

A análise dos valores de IAF obtidos na Caatinga (Figura 5), durante dois anos de monitoramento, nota-se que há uma variação nas diferentes ASVs, dependendo do tipo de solo os valores máximos podem variar de 1,70 a 3,62. Esses valores são considerados baixos quando comparados como o IAF de outros biomas. Por exemplo, Lui *et al.* (2015) avaliaram o IAF de uma floresta mista com árvores perenefólias e caducifólias e encontraram valores entre 3,5 a 8,5, sendo o IAF máximo encontrado entre os meses de julho e agosto. No entanto, a área de

estudo dos autores é uma reserva encontrada no nordeste da China e o clima é do tipo continental úmido, o que pode favorecer o desenvolvimento da vegetação, gerando conseqüentemente maior IAF. Aragão *et al.* (2005) avaliaram o IAF e sua variabilidade de acordo com padrões de paisagem na Amazônia Oriental. Os autores encontraram que o IAF médio variou de 3,25 a 5,10 para floresta primária, sendo os menores valores encontrados em áreas com relevo acentuado próximo aos rios, onde se desenvolve um dossel mais aberto. Porém, os autores ressaltam que o IAF pode chegar até 8 naquela região. Ishihara e Hiura (2011) encontraram, em floresta temperada decídua, IAF médio de 4,05, variando entre 2,59 a 5,51, porém fazem apenas uma abordagem sobre os métodos de determinação do IAF. Os resultados de IAF encontrados por Ishihara e Hiura (2011) não são muito diferentes dos encontrados na Caatinga, isso reforça a ideia de que a variabilidade do IAF de um bioma para outro deve ser analisada comparando-se variáveis climáticas e ambientais. Tillack *et al.* (2014) avaliaram o IAF em florestas aluviais no nordeste da Alemanha. Os autores obtiveram valores de IAF de 4,63, porém o clima da região é moderado, com temperatura média anual de 8,5 °C e a precipitação anual varia de 550 a 600 mm. Bréda (2003), fazendo uma revisão sobre os métodos de estimativa do índice de área foliar, verificou que o IAF pode variar entre 2,5 e 7 para florestas de coníferas; e de 4,5 a 6,5 para florestas de folhas largas.

Sprintsin *et al.* (2011), ao avaliarem uma floresta com 40 anos de idade localizada em região de clima árido na Judéia, observaram que o IAF foi sempre inferior a 2. Os autores atribuem os baixos valores de IAF à baixa densidade de árvores associada às condições climáticas desfavoráveis, pois o déficit hídrico, comum em regiões de clima árido e semiárido, proporciona um crescimento limitado da vegetação. Os autores afirmam ainda que o IAF pode ser útil em modelos que avaliam a transpiração da vegetação para estimar a disponibilidade hídrica. Huang *et al.* (2014) avaliaram a variabilidade anual IAF em anos de seca no Texas, EUA, e observaram que, na região de clima semiárido com vegetação de baixo crescimento, o IAF está entre 0,5 e 2. Segundo os autores, há redução de  $0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ , em média, nos valores de IAF durante os anos de seca; enquanto que em anos mais chuvosos ocorre aumento do IAF. Costa *et al.* (2002) avaliaram o índice de área da planta, que considera folhas, tronco e galhos, em área de Caatinga na região do Seridó, no Rio Grande do Norte, e observaram e o índice da área da planta variou de 0,3 a 3,2. Qi *et al.* (2000) avaliaram IAF em região semiárida do Estado do Arizona, EUA, e verificaram que o IAF máximo foi de 3,2.

Os valores de IAF encontrados por Qi *et al.* (2000), Costa *et al.* (2002), Sprintsin *et al.* (2011) e Huang *et al.* (2014) são semelhantes aos valores encontrados na Caatinga. Isso

pode ser um indicativo de que, em geral, vegetações que se desenvolvem sobre clima árido ou semiárido tendem a ter IAF mais reduzido sem relação à vegetação que se desenvolve em climas temperados ou úmidos, por exemplo. Diniz (1999 *apud* Silva *et al.*, 2004) afirma que, entre as adaptações da Caatinga relacionada ao déficit hídrico, pode se destacar o fechamento estomático e a redução da área foliar.

A título de comparação, a Tabela 5 apresenta uma síntese dos valores de IAF monitorados em diferentes biomas de diversas regiões do globo, de acordo com a revisão de literatura feita por Asner *et al.* (2003).

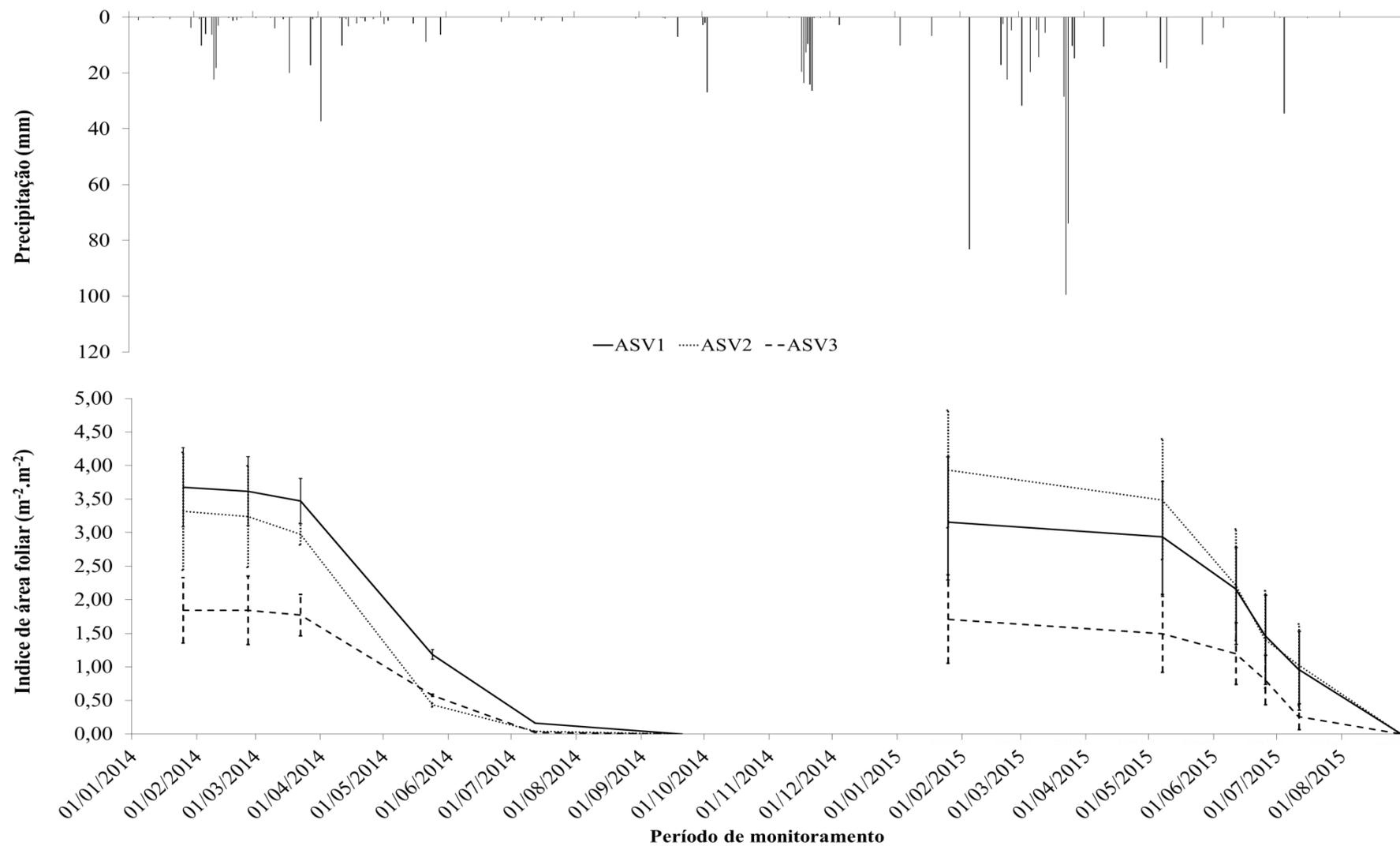
Tabela 5 – Apanhado do índice de área foliar em diferentes biomas

<b>Bioma</b>	<b>IAF médio (m<sup>2</sup>.m<sup>-2</sup>)</b>	<b>Min.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Locais Investigados no mundo</b>
Floresta caducifólia de folha larga	2,60	0,30	6,00	58
Floresta sempre verde folha estreita	3,50	0,50	21,60	94
Floresta temp. caducifólia de folha estreita	4,60	0,50	8,50	17
Floresta temp. caducifólia de folha larga	5,10	0,40	16,00	187
Floresta temp. sempre verdes de folha estreita	6,70	0,01	47,00	58
Floresta temp. sempre verdes de folha larga	5,80	0,80	12,50	215
Floresta tropical caducifólia de folha larga	3,90	0,60	8,90	18
Floresta tropical sempre verde de folha larga	4,90	1,50	12,30	61
Plantações	8,70	1,60	18,00	77
Cerrados	2,10	0,40	4,50	5
Tundra	2,70	0,20	7,20	13
Caatinga*	2,60	0,3	3,62	2

Fonte: Asner *et al.* (2003).

\*Não consta na revisão feita por Asner *et al.* (2003). Valores obtidos do trabalho de Costa *et al.*, (2002) e neste estudo.

Figura 5 – Taxa de decaimento do índice de área foliar da Caatinga nas três associações solo vegetação entre 2014 e 2015



Fonte: Elaborada pelo autor

Avaliando-se a Figura 5, observamos que, entre os meses de janeiro e abril de 2014, a curva de diminuição do IAF foi suave, ocorrendo redução de 6%, 10% e 4% no IAF das ASV1, ASV2 e ASV3, respectivamente. Isso pode ser justificado devido à constante renovação das mesmas em virtude das chuvas ocorridas nesse período. Em 2014, a precipitação na BEA foi de 364 mm; sendo 49% precipitados entre janeiro e abril. Medeiros (2009) também observou a mesma tendência, afirmando que as maiores porcentagens das chuvas ocorrem entre março e abril. Quando avaliamos o gráfico no período entre maio e julho de 2014, percebemos que a maioria das folhas havia caído, ocorrendo uma redução no IAF de 90%, 89% e 95% nas ASV1, ASV2 e ASV3, respectivamente. Nesse período o total precipitado foi de 27,2 mm.

Observamos a mesma tendência para decaimento do IAF em 2015. Neste caso, porém, nota-se retardamento no início da queda das folhas em relação a 2014, pois em 2015 a redução do IAF intensificou-se a partir de maio. Isso pode ser explicado pela maior precipitação no período de janeiro a maio, que foi de 505,4 mm. A redução do IAF nesse período foi de 7%, 11% e 12%, já entre os meses de junho e julho (que choveu apenas 39 mm) houve redução de 63%, 62% e 72% no IAF das ASV1, ASV2 e ASV3, respectivamente.

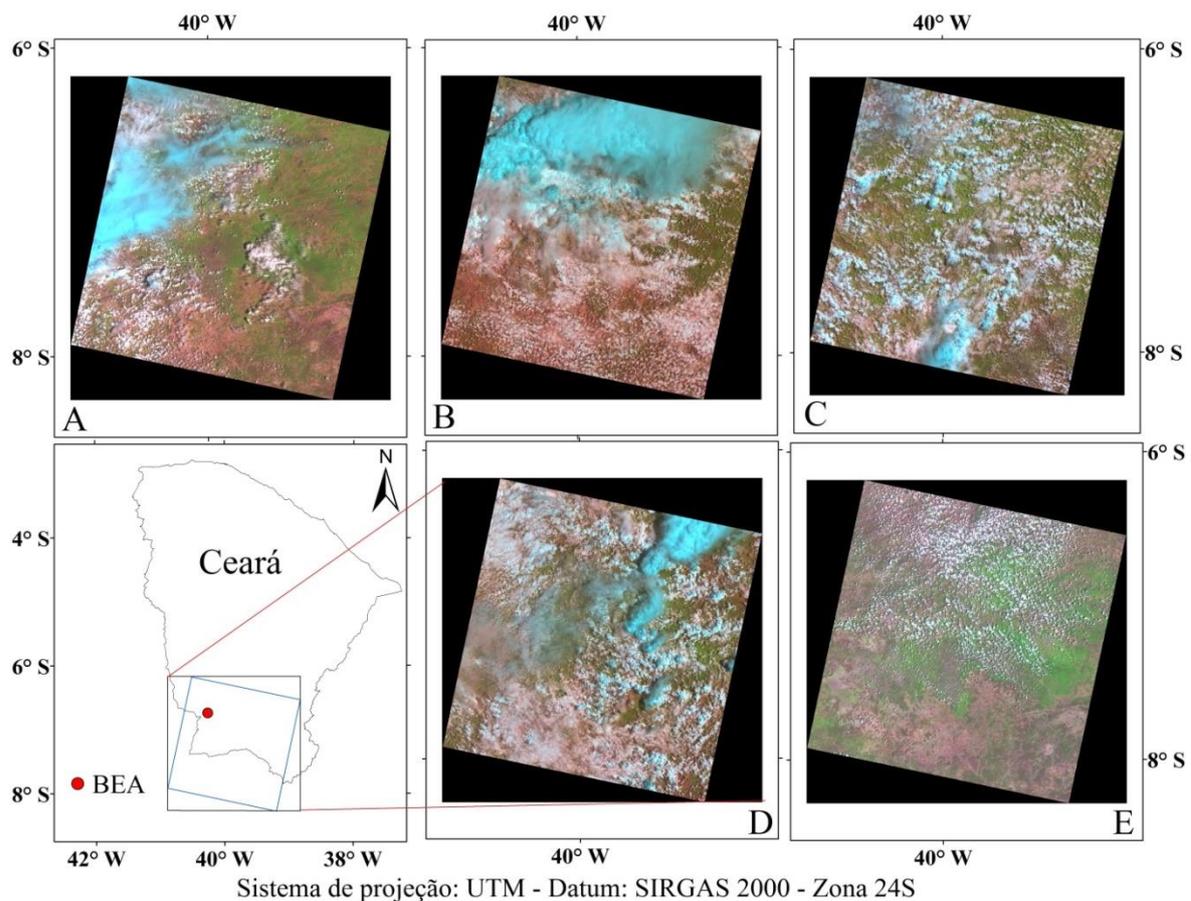
Observa-se também a inversão dos valores de IAF entre ASV1 e ASV2, ainda na Figura 5. Em 2014, ASV1 apresentou maior IAF, mas em 2015 os maiores valores foram encontrados em ASV2. Isso pode se dar devido à diferente distribuição das chuvas na BEA nos dois anos, o que não pode ser constatado devido a falhas na estação pluviométrica 1 (EP1), que foi depredada durante o período de monitoramento.

Outro fato relevante a ser destacado é que a precipitação anual não influencia significativamente no IAF médio, pois a precipitação total em 2014 foi de 364 mm e o IAF médio foi 2,94; enquanto que em 2015 a precipitação total foi de 544,3 mm – 67% maior que 2014 – e o IAF médio foi praticamente igual (3,02). Resultado semelhante foi encontrado por Le Dantec *et al.* (2000) e Barr *et al.* (2004), que observaram em seus estudos que em florestas bem desenvolvidas e sem perturbação antrópica, o IAF é relativamente estável entre anos. Porém a distribuição da precipitação ao longo do tempo influencia o comportamento do IAF.

A informação do comportamento do IAF para o período de crescimento das folhas, entre novembro de 2014 e fevereiro de 2015 (Figura 5) não é possível ser obtida pelo método da serrapilheira. Existem duas possibilidades para obter essa informação de ascendência. A primeira é através do método destrutivo. Pode-se fazer medições no local de estudo coletando árvores ou arbustos representativos da Caatinga, o que demanda muito trabalho e tempo para execução. A outra possibilidade seria utilizar valores de IEVs obtido de imagens de satélite

referentes ao período de produção de folhas e aplicar nos modelos, calibrados e validados, gerados no período de queda de folhas e assim estimar o IAF. Porém, um fator que limita a utilização dos IEVs é que o período de produção de folhas coincide com a estação chuvosa e, conseqüentemente, há presença de grande quantidade de nuvens, o que impossibilita a utilização de grande parte das imagens disponibilizadas. Esse aspecto é mostrado na Figura 6, que apresenta algumas imagens Landsat 8 OLI/TIRS da área de estudo no período de chuvoso. Neste caso, vale ressaltar que utilizar os IEVs para estimar o IAF durante a fase de ascensão (isto é, durante a fase de regeneração das folhas) seria apenas uma aproximação, visto que, de acordo com observações de campo, o período de crescimento das folhas se dá de forma muito mais rápida quando comparado com o período de queda.

Figura 6 – Imagens Landsat8 OLI/TIRS referentes à órbita 217, ponto 65, com cobertura de nuvens, imagens datadas de: 25/01/2014 (A), 10/02/2014 (B), 30/03/2014 (C), 01/03/2015 (D) e 28/01/2015 (E)



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 6 apresenta a análise estatística para as médias do IAF. Os resultados mostraram que a média do IAF para a ASV1 e ASV2 não diferiram estatisticamente entre si ( $P=0,59027$ ) pelo teste Tukey ( $\alpha = 5\%$ ). Houve, porém, diferença estatística entre ASV1 e

ASV3 ( $P=0,00008$ ) e entre ASV2 e ASV3 ( $P = 0,00006$ ). Isso ocorre tanto para a 2014 quanto para 2015. Os maiores valores de IAF para as ASV1 e ASV2 podem ser explicado pelo tipo de solo que predomina nas associações: Luvissole e Argissolo, respectivamente. Estes são solos mais profundos, permitindo maior desenvolvimento da vegetação.

O mesmo não se aplica à ASV3, que apresenta menor IAF. Na ASV3 predomina o Neossolo Litólico, que tem menor profundidade que em relação a ASV1 ou em ASV2. Isso proporciona limitação física ao desenvolvimento da vegetação, caracterizando o desenvolvimento de uma vegetação mais espaçada.

Tabela 6 – Teste de comparação de médias do índice de área foliar obtidos para as três Associações de Solo Vegetação na BEA

	IAF		
	ASV1	ASV2	ASV3
Média* $\pm$ Desvio padrão	3,42 a $\pm$ 0,56	3,62 a $\pm$ 0,79	1,78 b $\pm$ 0,44
Máximo	4,67	5,42	2,66
Mínimo	2,00	1,91	1,15

\* Médias seguidas de mesma letra entre as associações solo vegetação, não diferem pelo teste Tukey a 5% de significância. Médias seguidas de letras diferentes apresentam diferença estatística.

O comportamento do IAF nas três associações solo vegetação segue a mesma tendência dos resultados encontrados nos estudos realizado por Pinheiro *et al.* (2013), que avaliaram a profundidade efetiva das raízes da Caatinga na BEA. Nesse estudo os autores verificaram que a SAV1 apresentou raízes mais profundas (0,73 m), seguida pela SVA2 (0,63 m) e por fim a ASV3 com menor profundidade efetiva (0,36 m), atribuíram, também, o menor desenvolvimento das raízes na SVA3, ao solo que possui uma camada impermeável superficial, localizado a menos de 40 cm abaixo da superfície, o que é fortemente impeditivo de penetração das raízes.

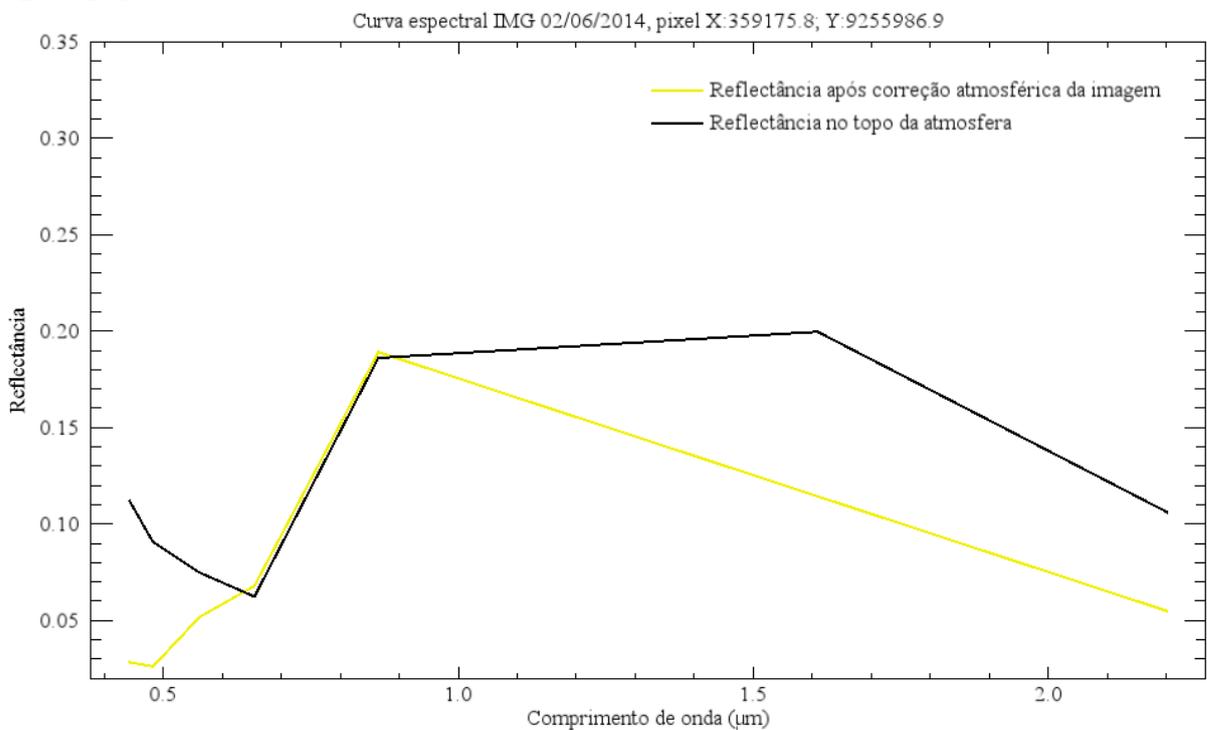
Outro fator relevante que justifica essa diferença do IAF entre as ASVs é a umidade do solo. De acordo com o estudo realizado por Costa *et al.* (2012), que avaliaram o comportamento da umidade do solo na BEA durante oito anos, o conteúdo de água no solo na ASV3 não ultrapassa 100 mm, permitindo que apenas espécies adaptadas ao estresse hídrico sobrevivam. Já nas associações ASV1 e ASV2, foram registrados valores de até 250 mm de conteúdo de água no solo no mesmo período de monitoramento. Essa discrepância explica em grande parte das diferenças observadas no IAF nas três sub-regiões da BEA.

### 4.3 Correção atmosférica das imagens

A seguir apresentam-se os gráficos mostrando a curva espectral característica para a vegetação antes e após correção atmosférica, sendo essa curva espectral obtida para um pixel da cada imagem utilizada neste estudo.

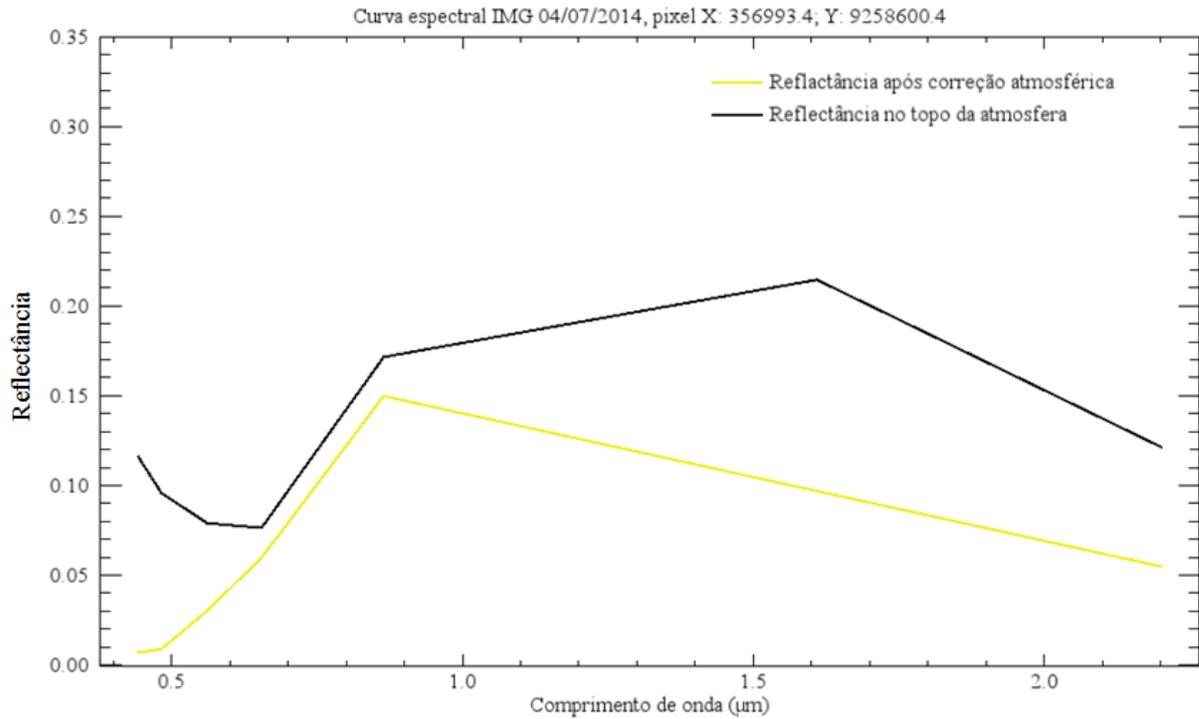
A Figura 7 apresenta a curva espectral para o pixel de coordenadas X: 359175,8; Y: 9255986,9 da imagem do dia 02/06/2014, este pixel está localizado na ASV3, já a Figura 8 apresenta os resultados da correção atmosférica para a imagem do dia 04/07/2014, o pixel utilizado para obter a curva espectral para essa figura possui coordenadas X: 356993,4; Y: 9258600,4, este pixel está localizado na ASV2.

Figura 7 – Curva espectral do pixel X: 359175,8; Y: 9255986,9, referente à imagem datada de 02/06/2015



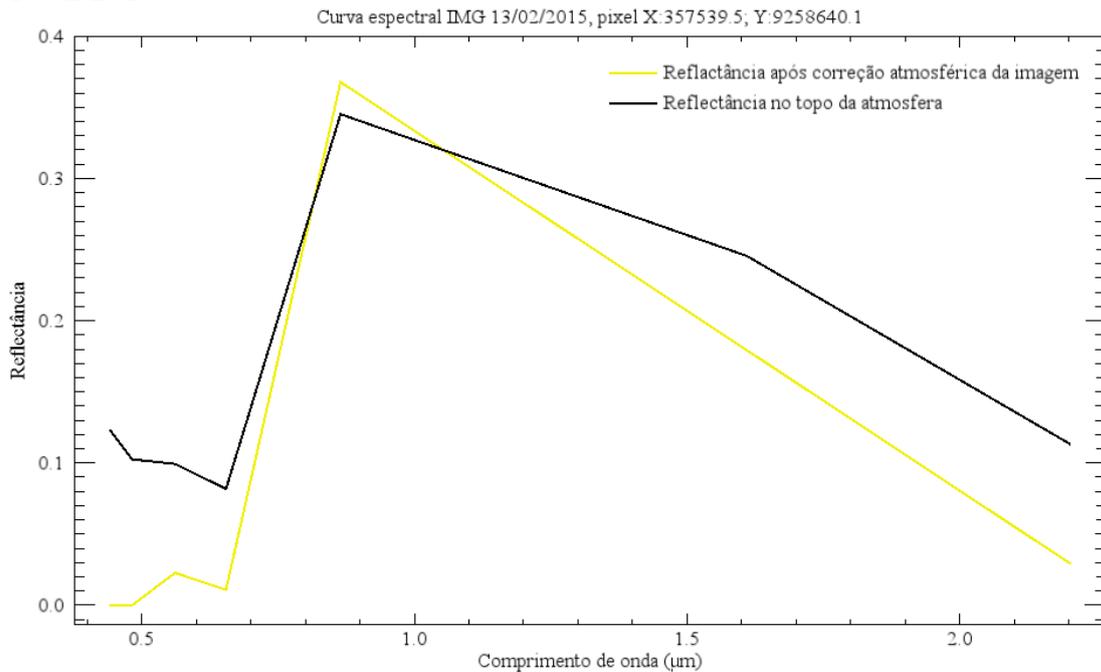
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 8 – Curva espectral do pixel X: 356993,4; Y: 9258600,4, referente à imagem datada de 04/07/2014



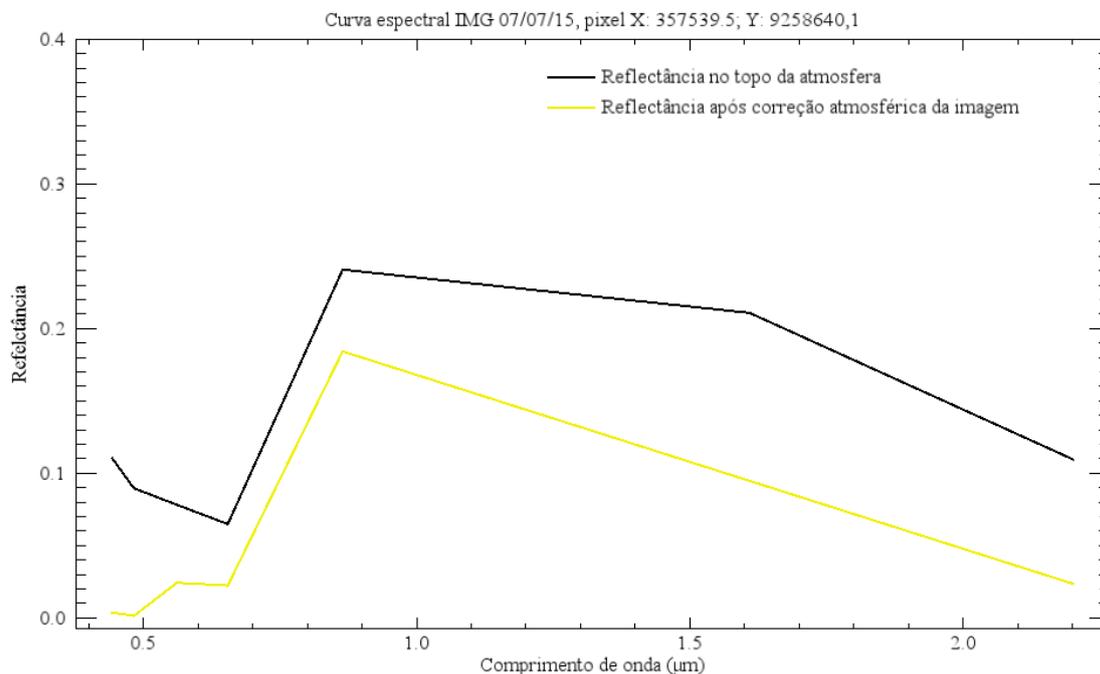
A Figura 9 e Figura 10 apresentam os resultados da correção atmosférica para as imagens do 13/02/2015 e 07/07/2015, o pixel utilizado para obter a curva espectral para essas duas imagens tem coordenadas X: 357539,5e Y: 9258640,1, este pixel está localizado na ASV1.

Figura 9 – Curva espectral do pixel X: 357539,5e Y: 9258640,1, referente à imagem datada de 13/02/2015



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 10 – Curva espectral do pixel X: 357539,5e Y: 9258640,1 referente à imagem datada de 07/07/2015



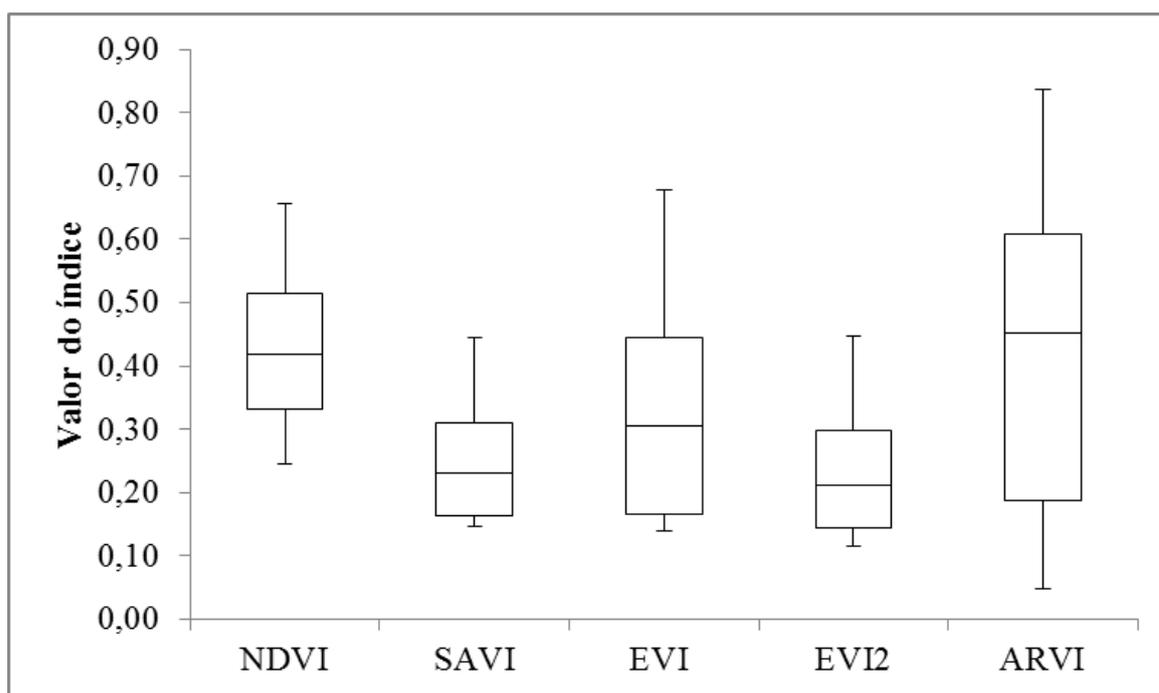
Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.4 Estimativa dos índices espectrais de vegetação e sua correlação com o IAF

A Figura 11 apresenta a variação dos índices espectrais de vegetação para quatro imagens avaliadas neste estudo. O ARVI foi o índice que apresentou maior variação inter e intra-anual do IAF. Este índice foi desenvolvido com o intuito de reduzir os efeitos atmosféricos (KAUFMAN *et al.*, 1992). Dessa forma, o uso do ARVI após realização de correção atmosférica da imagem pode ampliar o coeficiente de variação. Pode-se perceber também que o índice apresentou os menores e os maiores valores de IAF (0,048 -0,837). Índices de vegetação que tendam a apresentar valores altos podem formar pontos de saturação, que não são desejáveis quando se deseja avaliar IAF em dosséis. Para os outros três índices, os valores máximos de saturação não ultrapassaram 0,70. Isso ocorreu mesmo quando utilizamos uma imagem de fevereiro de 2015, período que corresponde à época chuvosa e o IAF atinge valores máximos. Esse aspecto mostra vantagem na utilização de NDVI, EVI, EVI2 e SAVI para avaliar IAF na Caatinga, evitando assim a formação de curvas assintótica devido a pontos de saturação, como ocorrem em outros biomas (por exemplo, CARLSON; RIPLEY, 1997; HUETE *et al.*, 1985; LÜDEKE *et al.*, 1991; BIRKY, 2001; WARDLOW *et al.*, 2007). De acordo com alguns autores (HUETE *et al.*, 1985; DÍAZ; BLACKBURN, 2003) a partir de 60% de cobertura vegetal, a utilização do NDVI não é recomendada, pois aproxima-se da saturação; não sendo útil para avaliar o IAF. No entanto, sabe-se que a área de estudo, por tratar-se de uma

área com 37 anos de preservação, tem praticamente toda a superfície do solo recoberta por vegetação. Mesmo assim, os valores máximos de NDVI não chegaram à saturação de 0,70 nos pontos analisados. Isso mostra uma vantagem na utilização do NDVI biomás com baixa densidade de folhas.

Figura 11 – Variabilidade dos IEVs para as quatro imagens Landsat 8 OLI utilizadas neste estudo



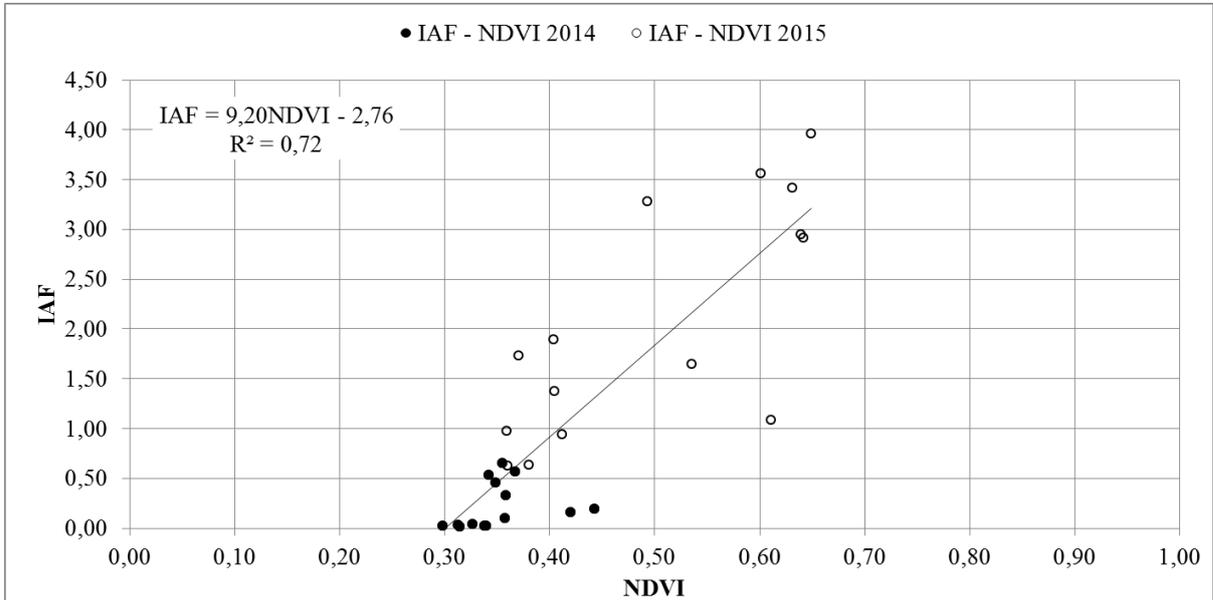
Fonte: Elaborada pelo autor.

O EVI2 apresenta valores máximos inferiores aos valores máximos do EVI. Isso pode ser associado ao uso da banda azul no EVI, pois a banda azul foi utilizada neste índice também com a intenção de minimizar os efeitos causados pelos aerossóis presentes na atmosfera. Porém, esse fator associado à correção atmosférica das imagens pode gerar valores mais altos no EVI (MIURA *et al.*, 1998 e XIAO *et al.*, 2003). Nota-se uma semelhança entre EVI2 e SAVI. Segundo Jiang *et al.* (2008), o EVI2 herda características do SAVI, quando insere alguns fatores de ajustes pra remover a banda azul. Por exemplo, o EVI2 minimiza influências da reflectância do solo, no entanto, o EVI2 tem maior sensibilidade quando utilizado para avaliar áreas com elevada biomassa quando comparado com o SAVI.

A Figura 12, Figura 13, Figura 14, Figura 15 e Figura 16 mostram os gráficos de regressão, com 29 pontos, de IAF e IEVs, obtidos entre 2014 e 2015, que foram utilizados para gerar as equações lineares, que estimaram o IAF a partir dos IEVs. O EVI foi o que apresentou melhor desempenho, com coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,86; seguido por EVI2, com  $R^2$

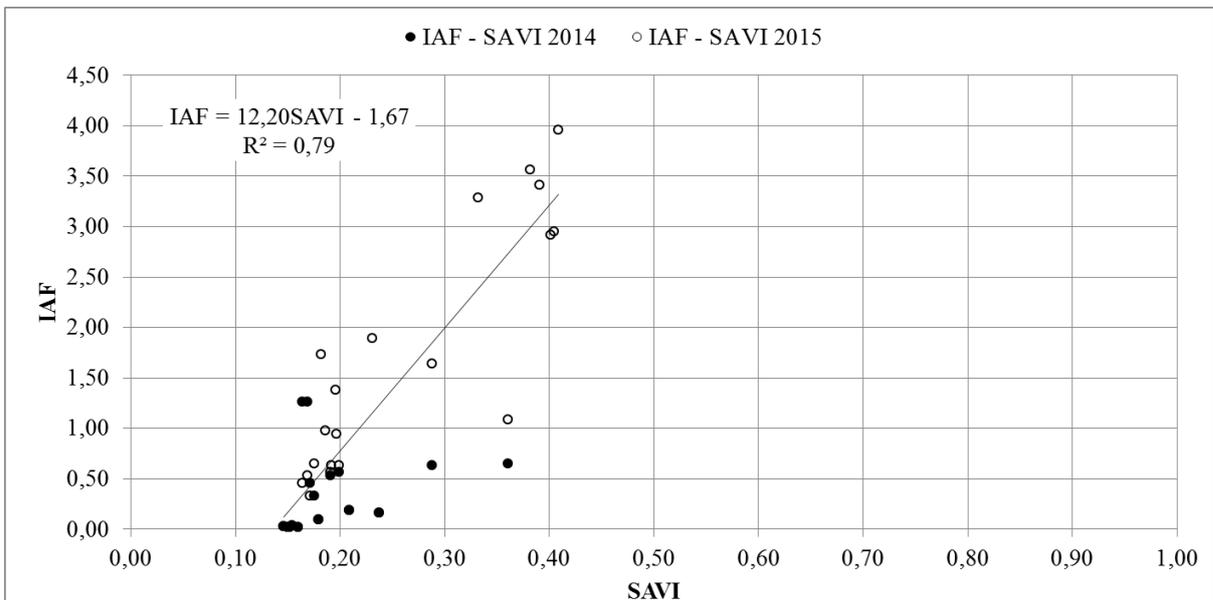
de 0,82; SAVI, com  $R^2$  de 0,79; NDVI, com  $R^2$  de 0,72; e, por último, o ARVI, que apresentou  $R^2$  de 0,68.

Figura 12 – Regressão entre IAF e NDVI para os dados da Bacia Experimental de Aiuaba (2014 – 2015)



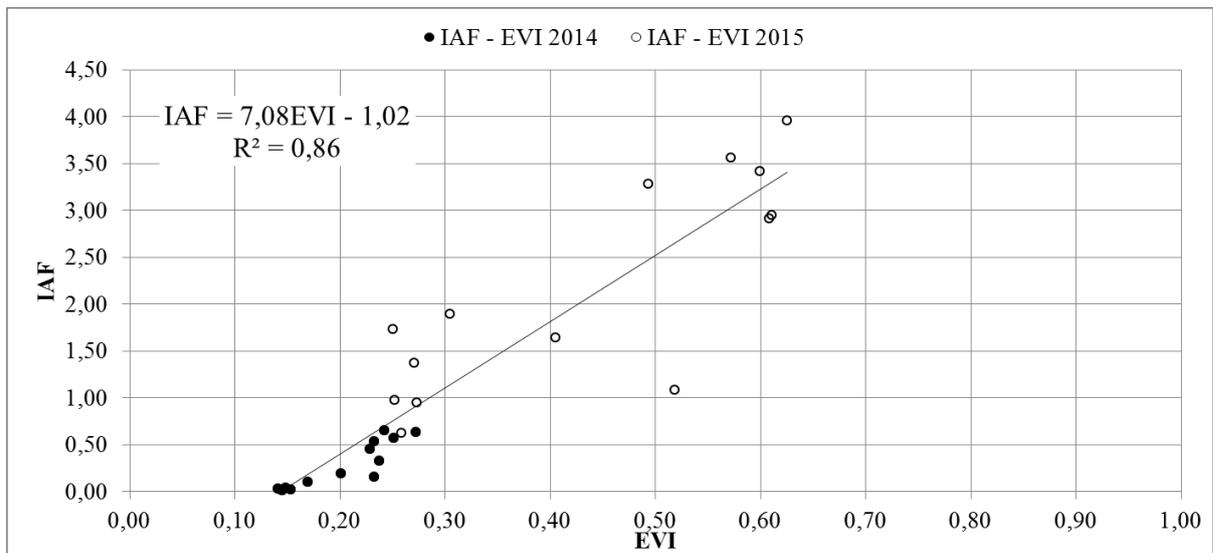
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 13 – Regressão entre IAF e SAVI para os dados da Bacia Experimental de Aiuaba (2014 – 2015)



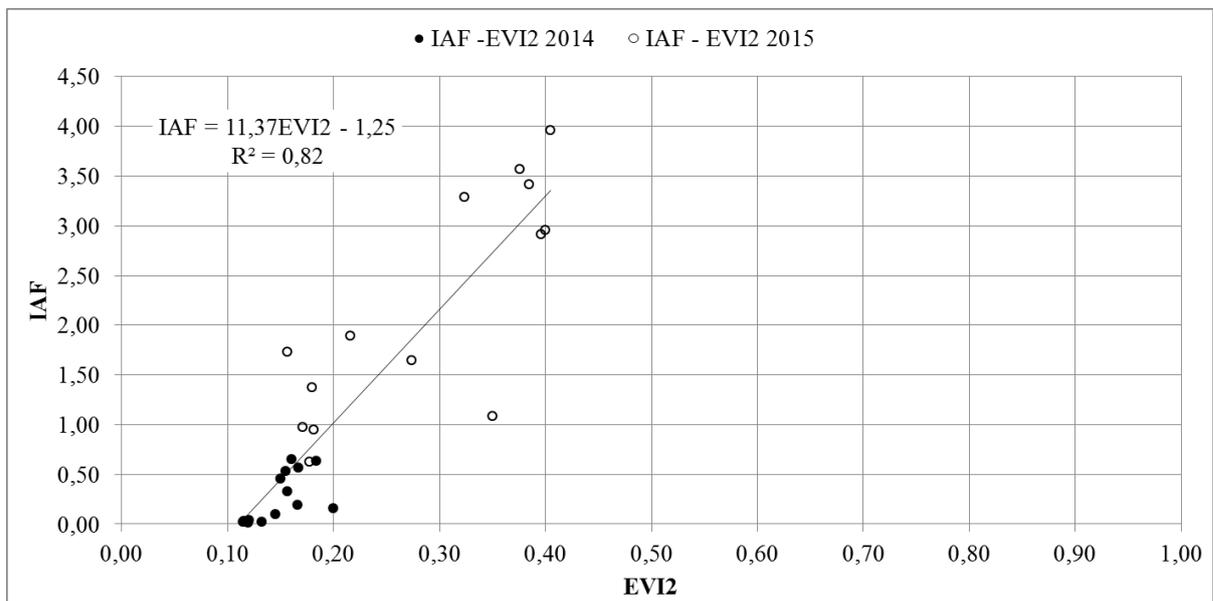
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 14 – Regressão entre IAF e EVI para os dados da Bacia Experimental de Aiuaba (2014 – 2015)



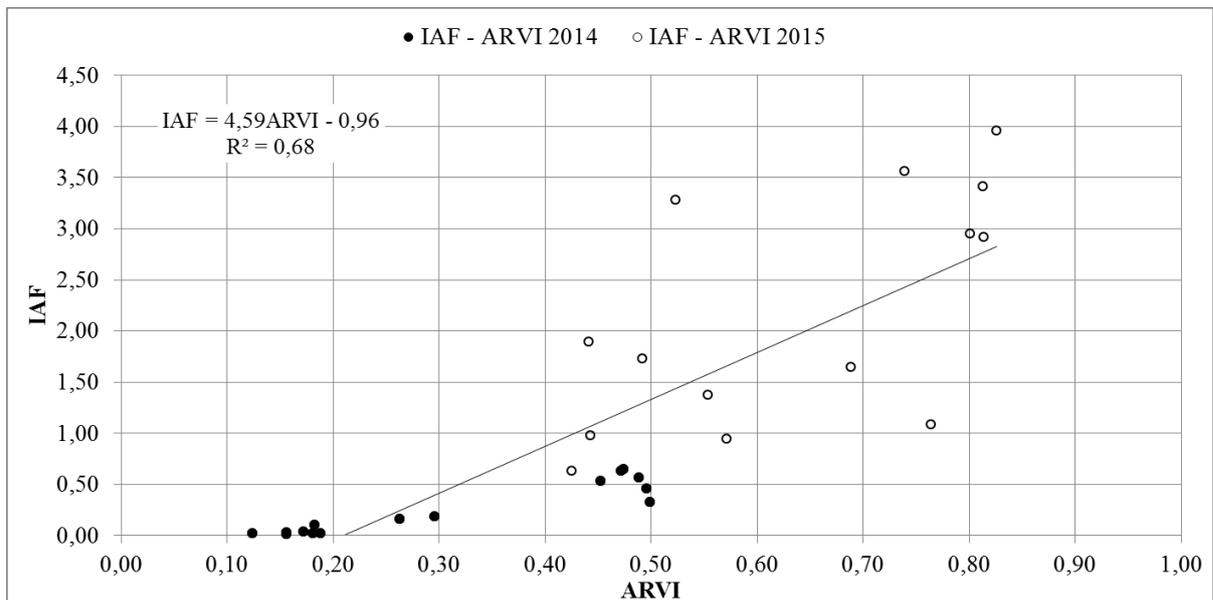
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 15 – Regressão entre IAF e EVI2 para os dados da Bacia Experimental de Aiuaba (2014 – 2015)



Fonte: Elaborada pelo autor.

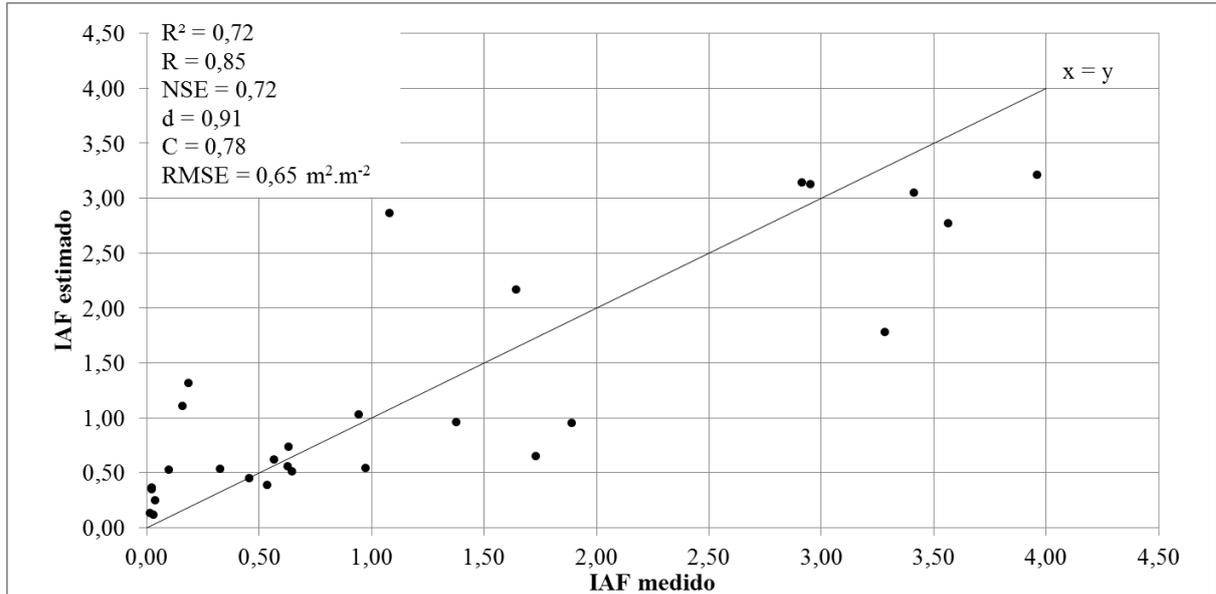
Figura 16 – Regressão entre IAF e ARVI para os dados da Bacia Experimental de Aiuaba (2014 – 2015)



Fonte: Elaborada pelo autor.

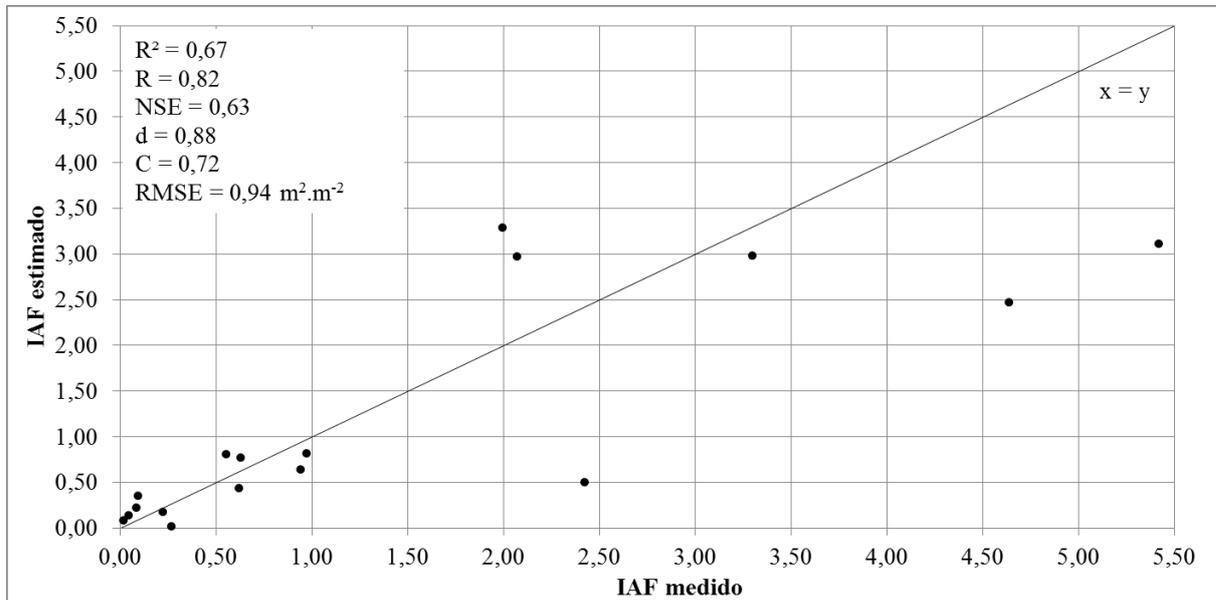
A Figura 17 e Figura 18 mostram os resultados de calibração e validação do NDVI, respectivamente, obtidos através da resposta de reflectância da Caatinga. De acordo com os parâmetros estatísticos analisados, o NDVI apresentou desempenho aceitável, com NSE de 0,72 na calibração e 0,63 na validação, apresentando boa concordância tanto na calibração quanto na validação ( $d = 0,91$  e  $0,88$ , respectivamente). Quanto ao índice de confiança do modelo, o NDVI apresentou desempenho muito bom para calibração ( $C = 0,78$ ) e bom para a validação ( $C = 0,72$ ), apresentou RMSE de  $0,65 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$  na calibração e RMSE de  $0,94 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ .

Figura 17 – IAF medido e estimado pelo NDVI e os respectivos parâmetros estatísticos da calibração.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 18 – IAF medido e estimado pelo NDVI e os respectivos parâmetros estatísticos da validação



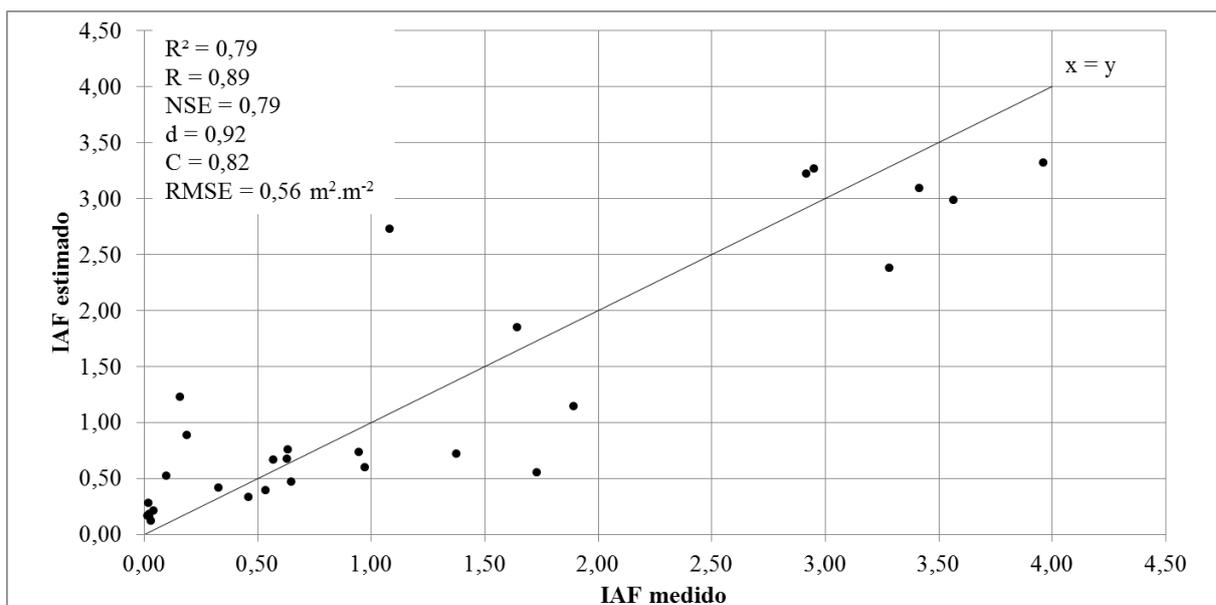
Fonte: Elaborada pelo autor

Fassnacht *et al.* (1997), estudando a relação entre NDVI e IAF para diferentes tipos de vegetação, encontraram baixa correlação para florestas caducifólias, embora em áreas de coníferas tenham encontrado resultados promissores ( $R^2 = 0,70$ ). A baixa correlação no caso de floresta caducifólia de clima temperado é possivelmente devido ao fato de o IAF atingir grandes valores, saturando assim o NDVI (BIRKY, 2001). Lüdeke *et al.* (1991) afirmaram que, para um pixel com total cobertura florestal, os valores de NDVI chegam ao máximo de 0,8 e IAF

próximo de 3. Para IAF maiores, não são distinguíveis dados de NDVI devido à saturação. Porém, Wang *et al.* (2005) encontraram uma relação clara entre NDVI e IAF durante o período de produção de folha e de senescência foliar, com valores de IAF maiores que 3. Amaral *et al.* (1996) afirmaram que NDVI e IAF correlacionam-se melhor quando obtidos em áreas no estágios iniciais de sucessão em florestas densas, onde ocorrem valores baixos valores de fitomassa, assemelhando-se com a baixa densidade de folha da Caatinga. Qi *et al.* (2000) ajustaram um modelo polinomial para dados de IAF de uma região semiárida dos Estados Unidos, e obtiveram  $R^2 = 0,94$  para valores de IAF menor que 1,2. Costa *et al.* (2002), ao realizarem mapeamento da fitomassa da Caatinga do Seridó, encontraram boa correlação ( $R^2 = 0,78$ ) entre NDVI e o índice de área foliar da planta.

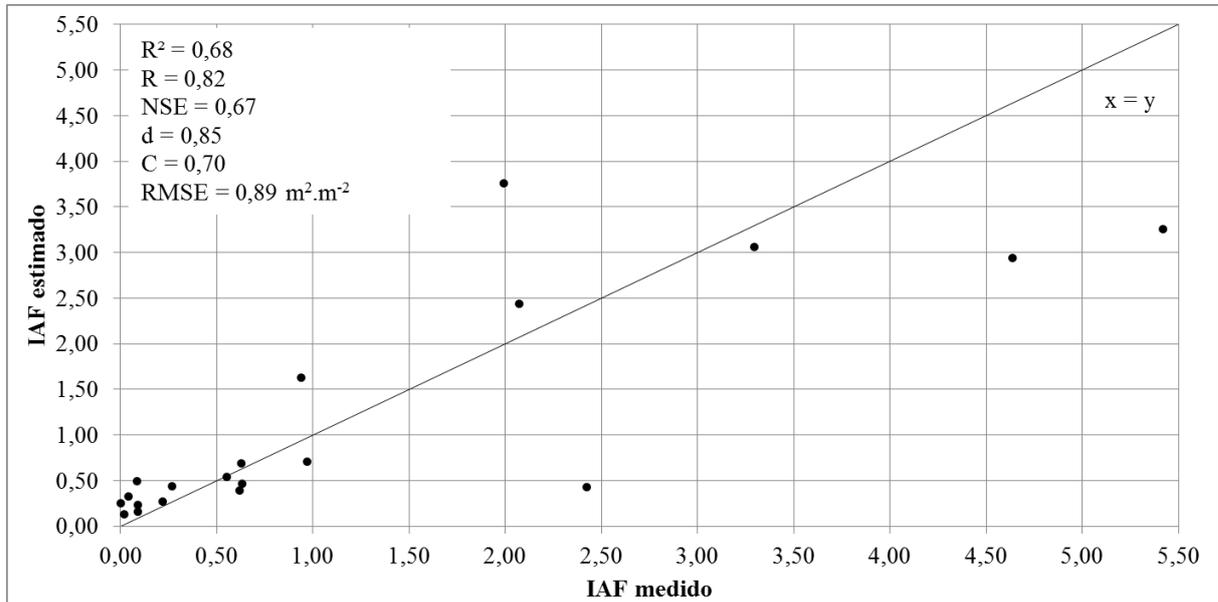
Na Figura 19 e Figura 20 são apresentados os resultados da calibração e validação do SAVI, respectivamente. Os parâmetros estatísticos analisados mostraram que o SAVI apresentou desempenho adequado ou bom na calibração, apresentando coeficiente de eficiência  $NSE = 0,79$ ; e desempenho aceitável na validação com  $NSE = 0,67$ . De acordo com o índice d, a regressão apresentou boa concordância tanto na calibração ( $d = 0,92$ ) quanto na validação ( $d = 0,85$ ). Avaliando-se o índice de confiança do modelo o SAVI, seu desempenho foi muito bom na calibração ( $C = 0,82$ ) e bom na validação ( $C = 0,70$ ), apresentou RMSE de  $0,56 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$ , e  $0,89 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$ , na calibração e validação respectivamente.

Figura 19 – IAF medido e estimado pelo SAVI e os respectivos parâmetros estatísticos da calibração



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 20 – IAF medido e estimado pelo SAVI e os respectivos parâmetros estatísticos da validação.



Fonte: Elaborada pelo autor

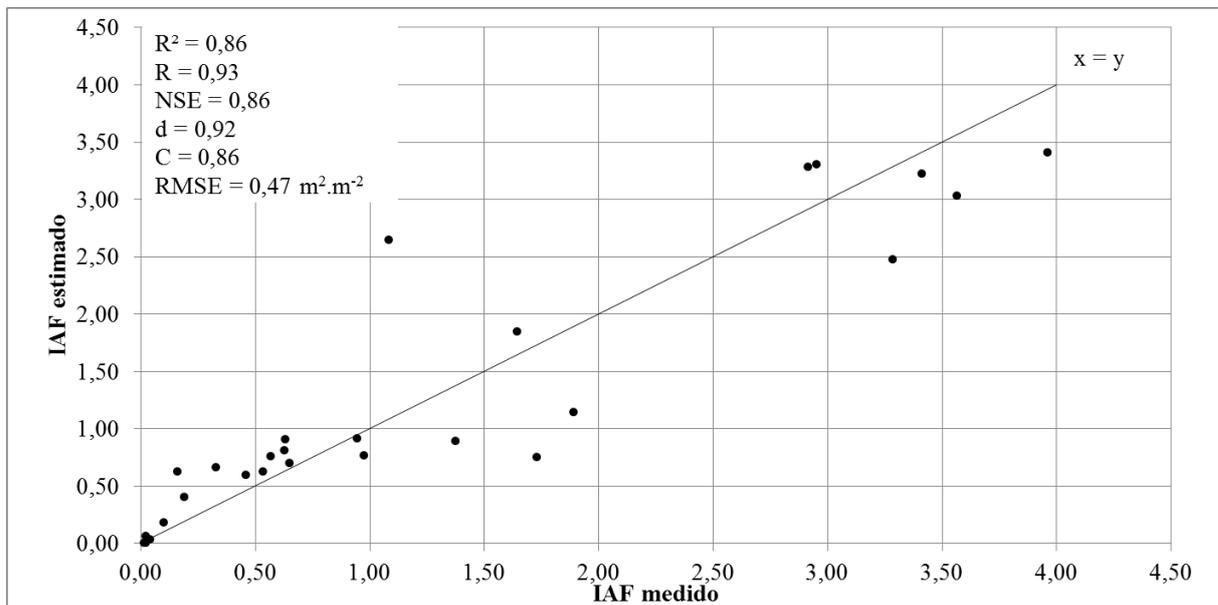
Gao *et al.* (2000) obtiveram, em seus resultados, baixa influência do tipo de solo sobre o SAVI (solos claros e escuros), apresentando boa correlação do índice com o IAF. Os autores afirmaram que o SAVI pode fornecer boas informações sobre parâmetros biofísicos da vegetação, principalmente em locais com baixa densidade de vegetação, onde a reflectância do solo pode superar a reflectância da vegetação. No entanto, os mesmos autores verificaram formação de curva assintótica quando o SAVI variou de 0,45 a 0,65 para a cultura do cereal (gramíneas) e para florestas de folhas largas, respectivamente.

Rodrigues *et al.* (2013) fizeram uma avaliação da cobertura vegetal por meio dos índices de vegetação e obtiveram melhores resultados com o SAVI. Os autores atribuem a melhor desenvoltura do SAVI, em relação aos outros índices, às condições da área de estudo que apresentava locais com baixa densidade de vegetação, visto que o SAVI distingue melhor áreas com pouca vegetação. Boratto e Gomide (2013) mostraram em seus estudos que os resultados do SAVI foram similares aos resultados de NDVI. Porém, o SAVI destacou mais a influência do solo exposto, principalmente no início do desenvolvimento da vegetação.

O SAVI pode ser útil em florestas como a Caatinga que apresentam vegetação com baixa densidade de folhas, pois pode corrigir os efeitos de reflectância do solo, porém o fator de ajuste do solo (L) pode levar a erros na estimativa do índice, pois a avaliação de vegetação com baixa, média e alta densidade é feita de forma subjetiva para diferentes áreas e pode ter interferência do avaliador.

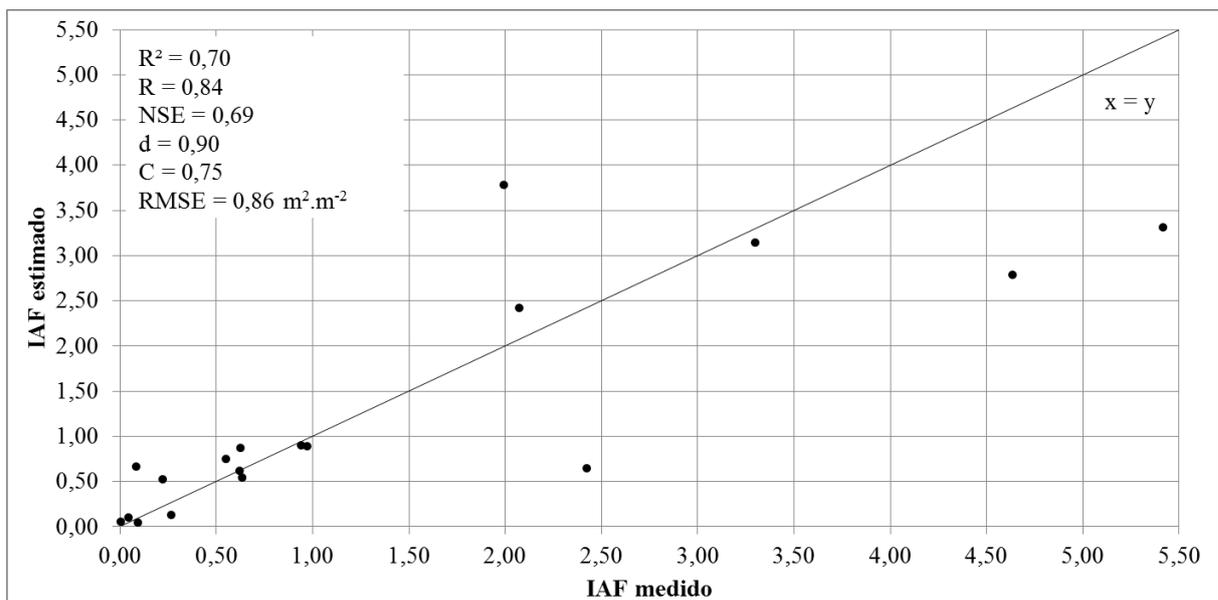
Os resultados dos parâmetros estatísticos da calibração e validação do EVI estão apresentados nas Figuras 21 e 22 respectivamente. O EVI apresentou os melhores parâmetros estatísticos, com desempenho bom na calibração ( $NSE = 0,86$ ) e aceitável na validação ( $NSE = 0,69$ ). Quanto ao índice de concordância, a regressão apresentou bom desempenho tanto na calibração ( $d = 0,92$ ), quanto na validação ( $d = 0,90$ ). Quanto ao índice C, o EVI apresentou desempenho ótimo na calibração ( $C = 0,86$ ) e bom na validação ( $C = 0,75$ ) apresentou o menor RMSE de  $0,47 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ , e  $0,86 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ , na calibração e validação respectivamente.

Figura 21 – IAF medido e estimado pelo EVI e os respectivos parâmetros estatísticos da calibração.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 22 – IAF medido e estimado pelo EVI e os respectivos parâmetros estatísticos da validação.



Fonte: Elaborada pelo autor

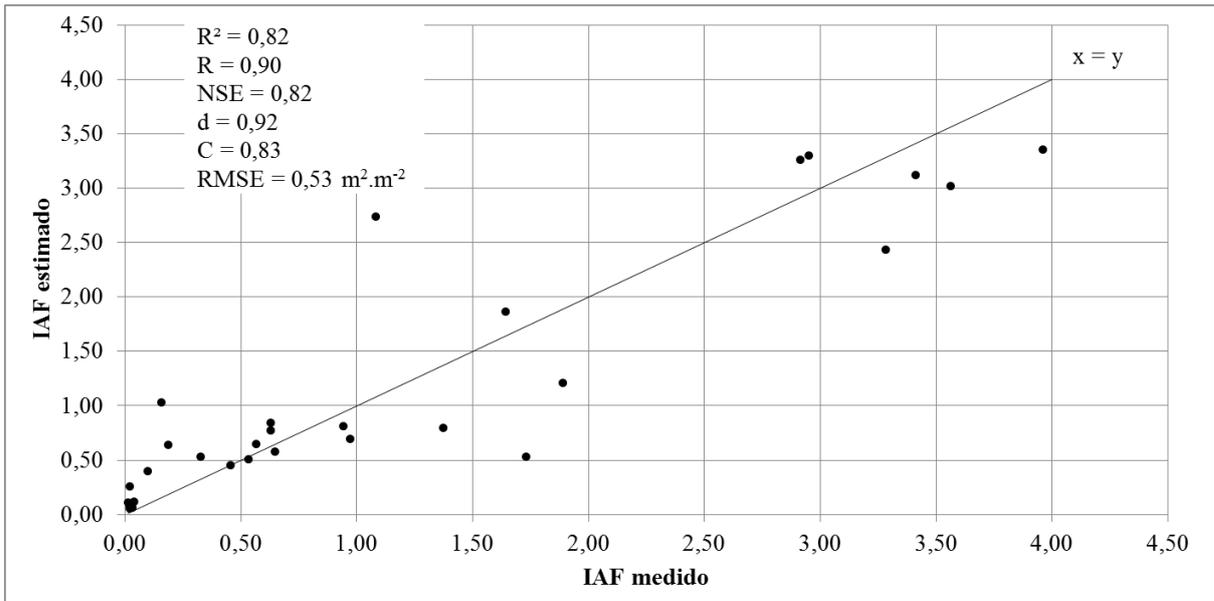
O bom desempenho do EVI para estimar IAF também foi encontrado em outros estudos. Segundo Boegh *et al.* (2002), isso pode ser um efeito da introdução da banda azul para cálculo deste índice. Wang *et al.* (2005) encontraram  $R^2 = 0,92$  quando correlacionaram EVI e IAF. Esses bons resultados foram encontrados para o período de produção de folhas, porém o mesmo resultado não foi obtido para o período de área foliar máxima ou para o período de senescência das folhas. No período de área foliar máxima, o IAF chegou a atingir 7,4 e o EVI não apresentou nenhuma correlação, mostrando que este índice também pode não funcionar quando há elevada biomassa. Os mesmos autores também não encontraram boa correlação durante o período de queda de folhas ( $R^2 = 0,38$ ). Wang *et al.* (2005) afirmaram que o EVI derivado do MODIS não demonstrou qualquer vantagem sobre os outros índices (NDVI-MODIS e NDVI-AVHRR) em relação ao IAF. Já neste estudo, o EVI apresentou bom desempenho para o período de senescência foliar utilizando imagens derivadas do Landsat 8 OLI/TIRS.

Os resultados de Jiang *et al.* (2008) demonstram que o EVI2 apresenta desempenho semelhante ao EVI, mostrando ser útil para estimar IAF. Quando avaliamos seus parâmetros estatísticos, o EVI2 apresentou  $R^2 = 0,82$  (calibração) e  $R^2 = 0,70$  (validação). Seu coeficiente de eficiência foi considerado adequado. Já o coeficiente de Nash e Sutcliffe (NSE) foi bom na calibração (0,82) e aceitável na validação (0,69). O índice de concordância foi de 0,92 e 0,89 na calibração e validação, respectivamente. O índice C também confirma o bom desempenho do EVI2 com  $C = 0,83$  na calibração (muito bom), e  $C = 0,75$  na validação, sendo considerado bom (Figura 23 calibração e 24 validação), quanto ao RMSE foi de  $0,53 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ , e  $0,87 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ , na calibração e validação respectivamente.

Esses resultados são similares aos encontrados por Mondal (2011), mostrando que o EVI2 foi fortemente correlacionado com a cobertura vegetal.

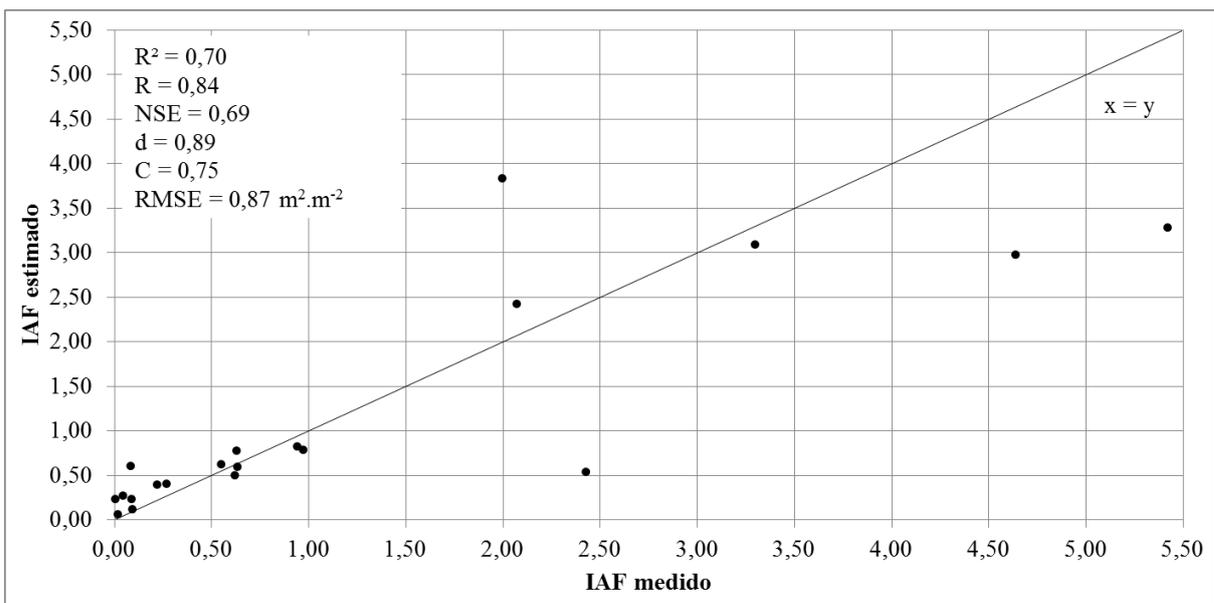
O EVI2 também mostrou vantagem sobre o NDVI em regiões tropicais com alta biomassa. Rocha e Shaver (2009) também obtiveram melhores resultados do EVI2 quando comparado com o NDVI e afirmam que o EVI2 tem capacidade de capturar mudanças sutis na condição da vegetação e estrutura, especialmente para avaliar índice de área foliar em áreas vegetadas com diferentes refletâncias de fundo do solo. Os autores ainda salientam que, embora o EVI2 utilize a mesma informação que NDVI, o peso adicional na refletância vermelho no denominador de sua equação permite que o EVI2 seja menos sensível ao escurecimento do solo.

Figura 23 – IAF medido e estimado pelo EVI2 e os respectivos parâmetros estatísticos da calibração



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 24 – IAF medido e estimado pelo EVI2 e os respectivos parâmetros estatísticos da validação.

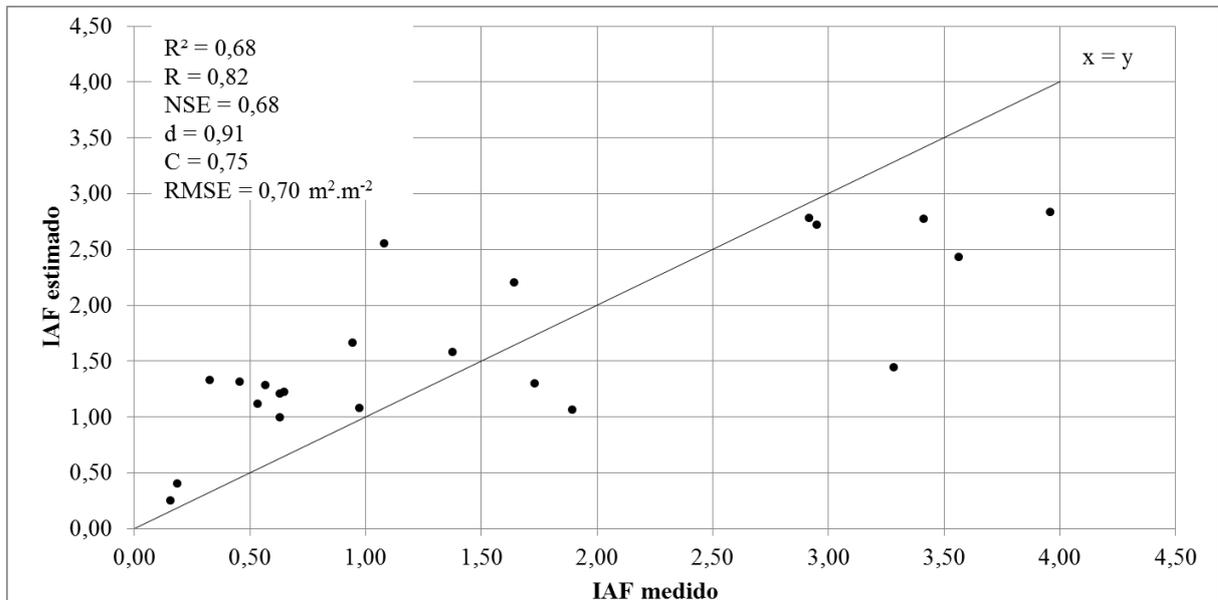


Fonte: Elaborada pelo autor

O ARVI apresentou o pior desempenho dentre os índices utilizados para estimar IAF neste estudo. De acordo com os parâmetros estatísticos, o índice apresenta desempenho razoável, com  $R^2 = 0,68$  na calibração e  $R^2 = 0,57$  na validação;  $NSE = 0,68$  na calibração e  $NSE = 0,54$  na validação; índice de concordância bom na calibração ( $C = 0,75$ ) e mediano na validação ( $C = 0,62$ ), o ARVI apresentou maior RMSE, sendo de  $0,70 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ , e  $1,05 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ , na calibração e validação respectivamente. As Figuras 25 e 26, respectivamente, mostram os resultados da calibração e validação do ARVI.

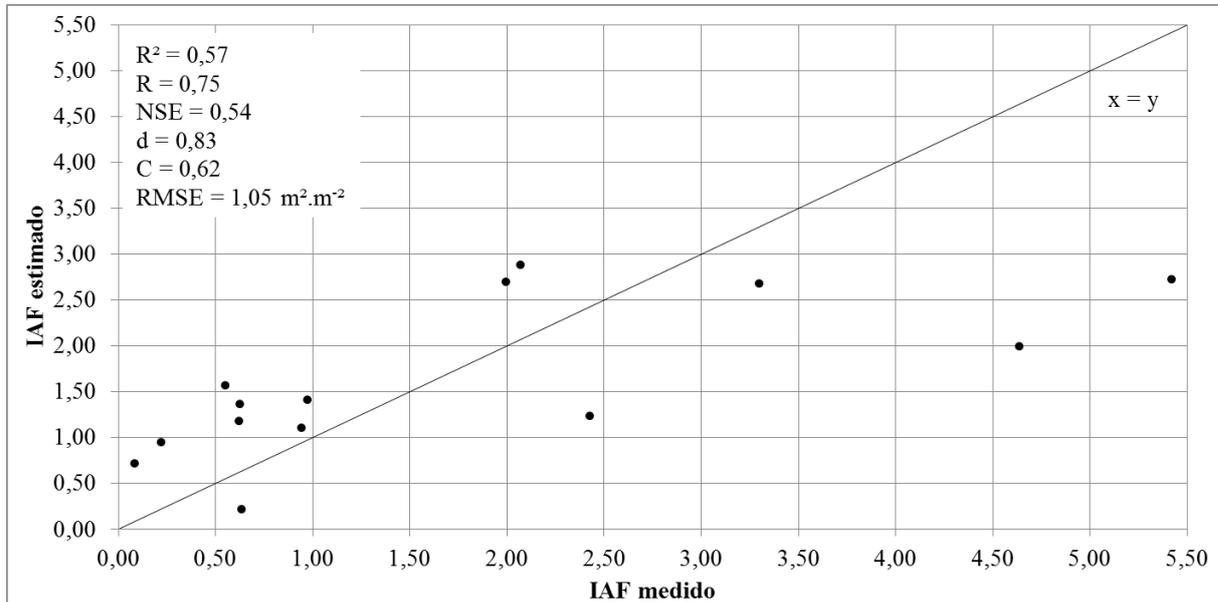
O ARVI foi desenvolvido com o objetivo de reduzir as distorções causadas por aerossóis na reflectância dos alvos (KAUFMAN; TANRÉ, 1996). Miura *et al.* (2001) avaliaram o erro na obtenção do ARVI a partir de imagens com e sem correção atmosférica e perceberam que este índice apresentava maior erro quando era obtido a partir de imagens com correção atmosférica, sugerindo que para utilização deste índice a correção atmosférica só seria necessária para áreas onde houvesse fumaça de queima de biomassa, fumaça de poluição urbana ou tempestades de poeira, caso contrário a correção atmosférica não se faz necessária. Neste estudo, os valores do ARVI foram obtidos a partir de imagens com correção atmosférica. Isso pode explicar o baixo desempenho obtido pelo ARVI em relação aos outros índices utilizados neste estudo.

Figura 25 – IAF medido e estimado pelo ARVI e os respectivos parâmetros estatísticos da calibração



Fonte: Elaborada pelo autor

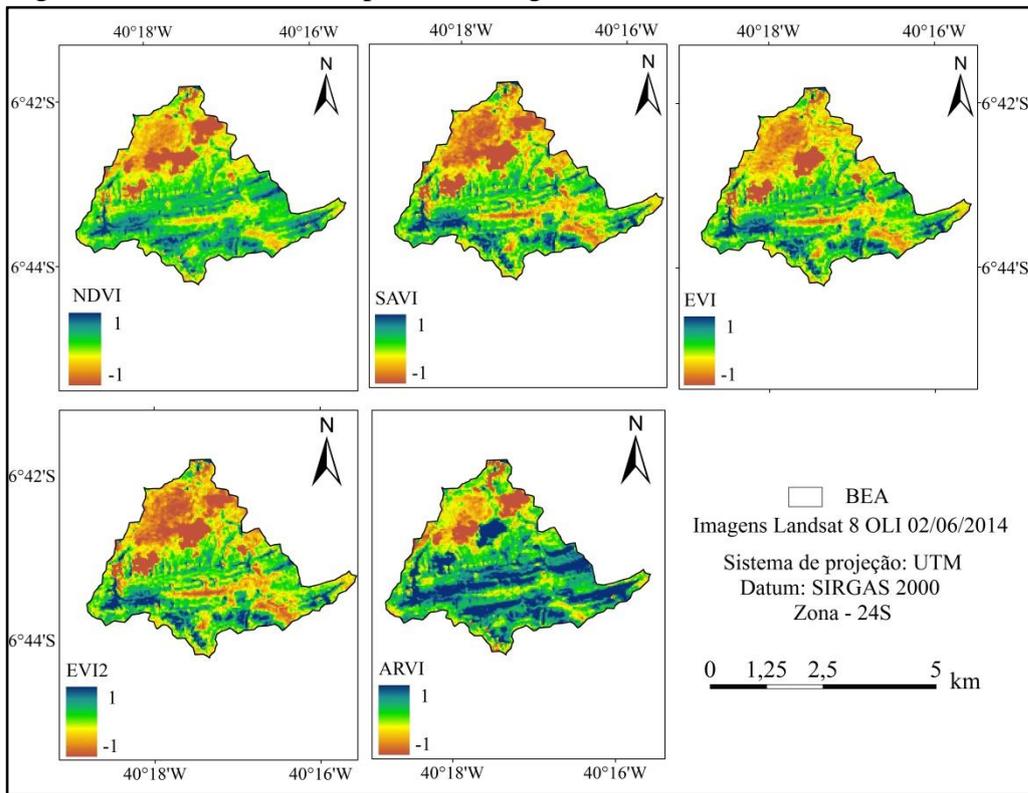
Figura 26 – IAF medido e estimado pelo ARVI e os respectivos parâmetros estatísticos da validação



Fonte: Elaborada pelo autor

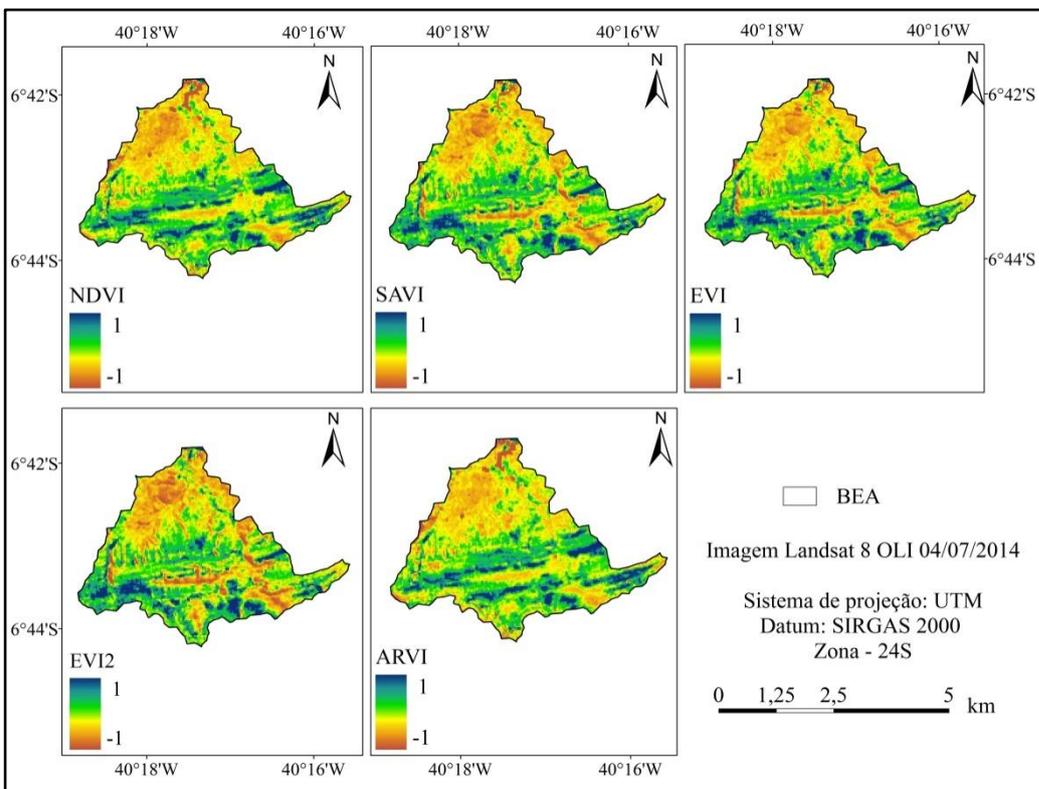
A Figura 27 apresenta o mapa temático da BEA para os cinco IEVs obtidos da imagem Landsat 8 OLI datada de 02/06/2014. Observam-se na Figura 14 manchas vermelhas proeminentes na parte central da BEA isso acontece devido à presença de algumas nuvens, o que reduz significativamente o valor dos IEVs nessa região. Vale ressaltar que algumas nuvens recobriam os pontos de coleta de serrapilheira da ASV1, impossibilitando a utilização dos dados de IEVs com IAF para essa associação solo vegetação. Entretanto, para ASV2 e ASV3 não havia cobertura de nuvens e os dados de IEVs e IAF foram adquiridos normalmente. É notável também uma suave redução nos valores máximos dos cinco IEVs entre as imagens do dia 02/06/2014 e do dia 04/07/2014 (Figura 28). Isso pode ser atribuído à queda das folhas nesse intervalo.

Figura 27 – IEVs obtidos a partir da imagem Landsat8 OLI, datada de 02/06/2014



Fonte: Elaborada pelo autor.

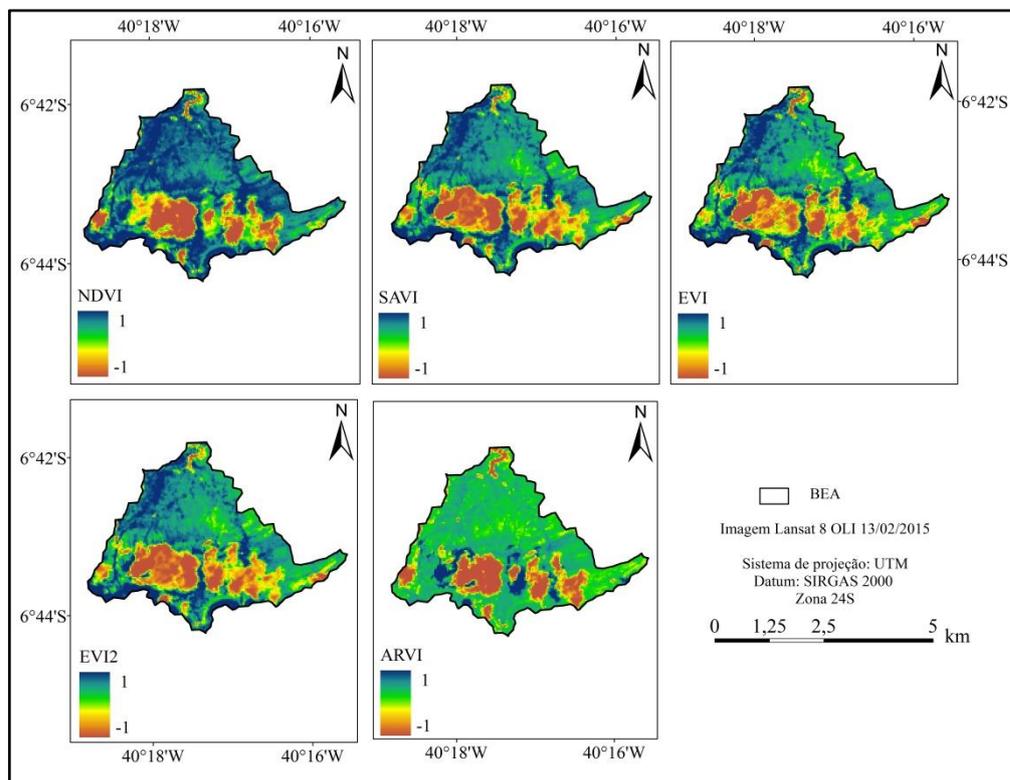
Figura 28 – IEVs obtidos a partir da imagem Landsat8 OLI, datada de 04/07/2014



Fonte: Elaborada pelo autor.

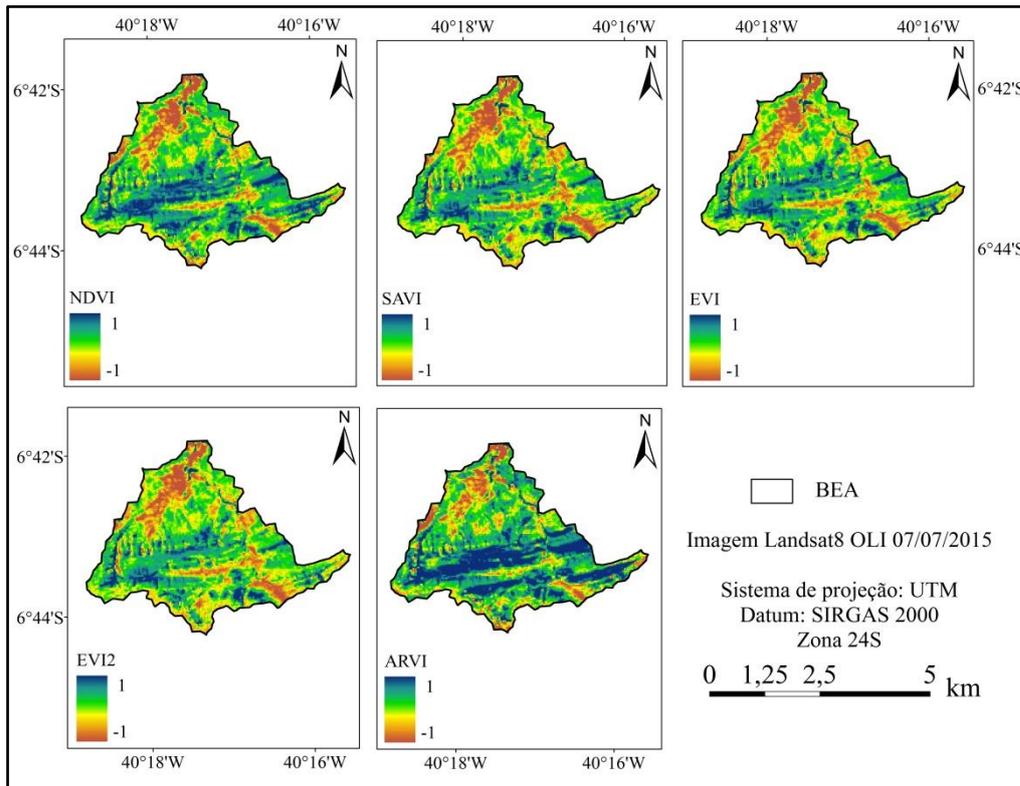
A Figura 29 mostra os IEVs obtidos a partir da imagem do Landsat8 OLI para o dia 13/02/2015. Nessa imagem, percebe-se uma grande quantidade de pixels com valores próximos do máximo, o que é esperado, pois essa imagem corresponde ao período chuvoso. A precipitação antecedente a essa imagem foi de 100,15 mm, suficiente para completo desenvolvimento vegetativo da Caatinga. Ainda na Figura 16, observa-se a uma faixa vermelha na região sul da BEA. Isso ocorre devido à presença de nuvens nessa região, inclusive recobrando a área de coleta de serrapilheira na ASV3. Dessa forma, os dados de IVEs dessa área não foram utilizados para comparar com o IAF, sendo utilizados apenas os dados de ASV1 e ASV2. Olhando para a Figura 30 observa-se uma significativa redução no número de pixels com valores máximos de IEVs. Isso se deve à caducifolia característica da Caatinga. No intervalo decorrido entre as duas imagens, o IAF foi reduzido de 3,16 em 13/02/2015 para 0,96 em 07/07/2015, reforçando mais uma vez a relação entre o IAF e os IEVs.

Figura 29 – IEVs obtidos a partir da imagem Landsat8 OLI, datada de 13/02/2015



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 30 – IEVs obtidos a partir da imagem Landsat8 OLI, datada de 07/07/2015



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 5 CONCLUSÃO

Concluimos que foi possível avaliar o índice de área foliar, em área preservada de Caatinga (bioma de vegetação caducifólia), utilizando o método da serrapilheira. O IAF médio da Caatinga variou entre 1,8 e 3,5  $m^2 \cdot m^{-2}$  nas três Associações de Solo Vegetação presentes na Bacia Experimental de Aiuaba. Esses valores, inferiores aos da maioria dos biomas do globo, podem ter sido influenciados por fatores como tipo de solo e distribuição temporal da precipitação. Portanto, valores baixos de IAF podem ser uma característica comum a regiões áridas e semiáridas.

A coleta periódica de serrapilheira durante a estação seca possibilitou avaliar a taxa de decaimento do IAF no bioma Caatinga, porém o método não permite a avaliar a taxa de crescimento do IAF.

Foi possível avaliar o IAF da Caatinga a partir de Índices Espectrais de Vegetação. Os coeficientes estatísticos de correlação entre valores de IAF modelados e medidos apresentaram boa concordância. Isso se deve possivelmente ao fato de a Caatinga não atingir grandes valores de IAF, reduzindo a ocorrência de saturação dos índices (NDVI, SAVI, EVI, EVI2 e ARVI), ao contrário do observado em florestas caducifólias temperadas. O índice EVI2 apresentou melhor desempenho. Essa informação é de grande relevância, pois torna promissor o uso de sensoriamento remoto para monitoramento do Índice de Área Foliar na região, já que a saturação dos IEVs é uma limitação do uso da técnica sensoriamento remoto para avaliar dosséis. No entanto, vale ressaltar que o uso da técnica de sensoriamento remoto através da obtenção do IEVs pode ser limitado nessa região devido à elevada presença de nuvens nas imagens de satélite entre os meses de janeiro e maio (período chuvoso). Nesse período, ocorre o desenvolvimento das folhas da Caatinga, não sendo possível avaliar como se comporta a evolução do IAF através do método da serrapilheira.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, J. J. A.; ARAÚJO, M. A.; NASCIMENTO, S. S. Degradação da caatinga: uma investigação ecogeográfica. **Caatinga**, v.22, p. 126-135, 2009.
- ANDRADE LIMA, D. **Plantas das Caatingas**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências. 243 p. 1989.
- ANDRADE, L. A. et al. Análise da vegetação sucessional em campos abandonados no agreste paraibano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 2, n. 2, p. 135-142, 2007.
- AMARAL, S.; SOARES, J. V.; ALVES, D. S.; MELLO, E. M. K.; ALMEIDA, S. A.S.; SILVA, O. F.; SILVEIRA, A.M. Relações entre Índice de Área Foliar (LAI), Área Basal e Índice de Vegetação (NDVI) em relação a diferentes estágios de crescimento secundário na Floresta Amazônica em Rondônia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7, 1996, Salvador. **Anais...** Salvador, 1996. p. 485-489.
- ARAGÃO L. E. O. C., SHIMABUKURO, Y. E., SANTO, F. D. B. E, WILLIAMS, M. Landscape pattern and spatial variability of leaf area index in Eastern Amazonia. **Forest Ecology and Management**. v. 211, p. 240–256, 2005.
- ARCOVA, F.C.S.; CICCIO, V.; ROCHA, P.A.B. Precipitação efetiva e interceptação das chuvas por floresta de Mata Atlântica em uma microbacia experimental em Cunha – São Paulo. **Revista Árvore**, v. 27, n.2, 2003.
- ARAÚJO, J. C.; PIEDRA J. I. G. Comparative hydrology: analysis of a semiarid and a humid tropical watershed. **Hydrological Processes**, v.23, p.1169 – 1178, 2009.
- ASNER, G. P., SCURLOCK, J. M. O., JEFFREY A. HICKE. Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. **Global Ecology & Biogeography**. v.12, p.191–205, 2003.
- ATA-UL-KARIM, S. T.; ZHU, Y.; YAO, X.; CAO, W. Determination of critical nitrogen dilution curve based on leaf area index in rice. **Field Crops Research**. v. 167, p. 76–85, 2014.
- BALBINOT, R.; OLIVEIRA, N. K.; VANZETTO, S. C.; PEDROSO, K. VALERIO, A. F. O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. **Ambiência**.v.4, n.1, p.131-149, 2008.
- BARBOSA,H. A.; HUETE, A.R.; BAETHGEN, W.E.A 20-year studyof NDVI variability over the Northeast Region of Brazil. **Journal of Arid Environments**.v. 67, p. 288–307, 2006.
- BARR, A. G. BLACK, T.A.;HOGG, E.H.; KLJUN, N. MORGENSTERN, K. NESIC, Z. Inter-annual variability in the leaf area index of a boreal aspen-hazelnut forest in relation to net ecosystem production. **Agricultura land Forest Meteorology**. v. 126, p. 237–255, 2004.
- BEADLE, C. L. Growth analysis. Photosynthesis and production in a changing environment: a field and laboratory manual (ed. by D.O. Hall), **Chapman & Hall**, p. 36–46. 1993.

- BEZERRA, M. V. C., SILVA, B. B., BEZERRA, B. G. Avaliação dos efeitos atmosféricos no albedo e NDVI obtidos com imagens de satélite. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.709–717, 2011.
- BIDLAKE W. R., BLACK R. A. Vertical distribution of leaf area in *Larix occidentalis*: a comparison of two estimation methods. **Canadian Journal of Forest Research**. v.19, p. 1131-1136, 1989.
- BIRKY, A. K. NDVI and a simple model of deciduous forest seasonal dynamics. **Ecological Modelling**. v. 143, p. 43– 58, 2001.
- BOEGH, E., SOEGAARD, H., BROGE, N., HASAGER, C. B., JENSEN, N. O., SCHELDE, K., Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. **Remote Sensing of Environment**. v. 81, p. 179–193, 2002.
- BONAN, G., *Ecological Climatology*, Cambridge University Press, Cambridge, UK. 2008.
- BORATTO, I. M. P., GOMIDE, R. L. Aplicação dos índices de vegetação NDVI, SAVI e IAF na caracterização da cobertura vegetativa da região Norte de Minas Gerais. **Anais. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2013.
- BOSCH, J. M.; HEWLETT, J. D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. **Journal Hydrology**, v. 55, p. 3-23, 1982.
- BOURIAUD, O.; SOUDANI, K.; BRÉDA, N. Leaf area index from litter collection: impact of specific leaf area variability within a beech stand. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 3, p. 371–380, 2003.
- BRÉDA, N. J. J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. **Journal of Experimental Botany**, v. 54, n. 392, p. 2403-2417, 2003.
- BURTON, A. J., PREGITZER, K.S., REED, D.D. Leaf area and foliar biomass relationships in northern hardwood forests located along an 800 km acid deposition gradient. **Forest Science**, v. 37, p. 1041-1059, 1991.
- CAO, X.; ZHOUB, Z.; CHENB, X.; SHAOB, W.; WANG, Z. Improving leaf area index simulation of IBIS model and its effect on water carbon and energy: A case study in Chang bai Mountain broad leaved forest of China. **Ecological Modelling**. v. 303, p. 97–104, 2015.
- CALIXTO JÚNIOR, J.T., DRUMOND, M. A. Estrutura fitossociológica de um fragmento de Caatinga *sensu stricto* 30 anos após corte raso, Petrolina – PE, Brasil. **Revista Caatinga**, v. 24, n. 2, p. 67-74, 2011.
- CÂMARA, C.D. **Efeitos do corte raso do eucalipto sobre o balanço hídrico e a ciclagem de nutrientes em uma microbacia experimental**. 1999. 76f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Piracicaba, 1999.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CARLSON, T. N., RIPLEY, D. A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. **Remote Sensing of Environment**. v. 62, p. 241–252, 1997.

CARLYLE-MOSES, D.E. Throughfall, stem flow and canopy interception loss fluxes in A semi-arid Sierra Madre Oriental matorral community. **Journal of Arid Environments**, v.58, p. 181-202, 2004.

CHÁVEZ JUNIOR, P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**.v. 24, p. 459-479, 1988.

CHASON J, BALDOCCHI D, HUTSON M. A comparison of direct and indirect methods for estimating forest leaf area. *Agricultural and Forest Meteorology* 57, 107-128, 1991.

CHEN, B.; WU, Z. WANG, J. DONG, J. GUAN, L. CHEN, J. YANG, K. XIE, G. Spatio-temporal prediction of leaf area index of rubber plantation using HJ-1A/1B CCD images and recurrent neural network. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. v.102, p. 148–160, 2015.

CHEN, J.M., GOVIND, A., SONNENTAG, O., ZHANG, Y., BARR, A., AMIRO B. Leaf area index measurements at Fluxnet-Canada forest sites. **Agricultural and Forest Meteorology** v.140, p. 257–268, 2006.

CHEN, W., LI, J., ZHANG, Y., ZHOU, F., KOEHLER, K., LEBLANC, S., FRASER, R., OLTHOF, I., ZHANG, Y., WANG, J. Relating biomass and leaf area index to non-destructive measurements in order to monitor changes in arctic vegetation. **Arctic**. v. 62, p. 281–294, 2009.

CHENG, J.D. Stream flow changes after clear-cutlogging of a Pine beetle-infested watershed in Southern British Columbia, Canada. **Water Resources Research**, v.25, n.3, p.449-456, 1989.

COELHO FILHO, M. A., VILLA-NOVA, N. A., ANGELOCCI, L. R., MARIN, F. R., RIGHI, C. A. Método para estimativa do IAF de árvores isoladas ou de plantações com dossel fechado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.16, n.5, p.529–538, 2012.

COHEN, W. B., MAIERSPERGER, T. K., GOWER, S. T., & TURNER, D. P..An improved strategy for regression of biophysical variables and Landsat ETM+data. **Remote Sensing of Environment**.v.84, p.561–57, 2003.

COSTA, C. A. G., **Umidade do solo e disponibilidade hídrica na zona das raízes em condições naturais de Caatinga preservada**. Tese (Doutorado). 182f. Universidade Federal do Ceará. Doutorado em Engenharia Agrícola. Fortaleza, 2012.

COSTA, R.C.; ARAÚJO, F.S.; LIMA-VERDE, L.W. Flora and life-form spectrum in an area of deciduous thorn woodland (caatinga) in northeastern, Brazil. **Journal of Arid Environments**. v.68, p. 237 – 247, 2007.

COSTA, T. C.C.; ACCIOLY, L. J. O.; OLIVEIRA, M. A. J.; BURGOS, N.; SILVA, F. H. B. B. Phytomass mapping of the “seridócaatinga” vegetation by the plant area and the normalized difference vegetation indices. **Scientia Agricola**, v.59, p.707-715, 2002.

CROCKFORD, R.H., RICHARDSON, D.P. Partitioning of rainfall into through fall, Stem flow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. **Hydrological Processes**, v. 14, p. 2903-2920, 2000.

DE ARAÚJO, J. C.; PIEDRA J. I. G. Comparative hydrology: analysis of a semiarid and a humid tropical watershed. **Hydrological Processes**, v.23, p.1169 – 1178, 2009.

DÍAZ, B. M., & BLACKBURN, G. A. Remote sensing of mangrove biophysical properties: From a laboratory simulation of the possible effects of background variation on spectral vegetation indices. **International Journal of Remote Sensing**. v. 24, p. 53–73, 2003.

ERIKSSON, H., EKLUNDH, L., HALL, K., LINDROTH A. ESTIMATING LAI in deciduous forest stands. **Agricultural and Forest Meteorology**.v.129, p.27–37, 2005.

FASSNACHT, K. S.; GOWER, S. T.; MACKENZIE, M. D.; NORDHEIM, E. V.; Lillesand, T. M. Estimating the leaf area index of north central Wisconsin forests using the Landsat Thematic Mapper. **Remote Sensing of Environment**, v.61, p.229-245, 1997.

FENSHOLT, R., SANDHOLT, I., STISEN, S. Evaluating MODIS, MERIS, and VEGETATION indices using in situ measurements in a semiarid environment. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v. 44, p. 1774–1786, 2006.

FERREIRA, S.J.F.; LUIZÃO, F.J.; DALLAROSA, R.L.G. Precipitação interna e interceptação da chuva em floresta de terra firme submetida à extração seletiva de madeira na Amazônia Central. **Acta Amazonia**. v. 35, n. 1, 2005.

FIGUEIREDO, J. V.; DE ARAÚJO, J.C.; MEDEIROS, P.H.A.; COSTA, A.C. **Runoff** initiation in a preserved semiarid Caatinga small watershed, Northeastern Brazil. **Hydrological Processes** (no prelo)

FRIEDL, M. A., MICHAELSEN, J., DAVIS, F. W., WALKER, H., SCHIMEL, D. S. Estimating grassland biomass and leaf area index using ground and satellite data. **International Journal of Remote Sensing**.v.15, p.1401– 1420, 1994.

GALVÃO, C. O.; NOBRE, P.; BRAGA, A.C. F. M.; OLIVEIRA, K. F.; MARQUES, R.; SILVA, S. R.; GOMES FILHO, M. F.; SANTOS, C. A. G.; LACERDA, F.; MONCUNILL, D. **Climatic predictability, hydrology and water resources over Nordeste Brazil**. Regional Hydrological Impacts of Climatic Change—Impact Assessment and Decision Making 211(Proceedings of symposium S6 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguaçu, Brazil, April 2005). IAHS Publ. 295, 2005.

- GAO, X.; HUETE, A. R.; NI, W.; MIURA, T. Optical–Biophysical Relationships of Vegetation Spectral without Background Contamination. **Remote Sensing of Environment**. v. 74, p. 609–620, 2000.
- GONSAMO A., PELLIKKA, P. The sensitivity based estimation of leaf area index from spectral vegetation indices. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. v.70, p. 15–25, 2012.
- GOWER, S.T., KUCHARIK, C. J., NORMAN, J. M. Direct and Indirect Estimation of Leaf Area Index, fAPAR, and Net Primary Production of Terrestrial Ecosystems. **Remote Sensing of Environment**. v. 70, p. 29–51, 1999.
- GOWER, S. T., VOGEL, J., NORMAN, J. M., KUCHARIK, C. J., STEELE, S.J. AND STOW, T. K. Carbon distribution aboveground net primary production in aspen, jack pine, and black spruce stands in Saskatchewan and Manitoba, Canada. **Journal of Geophysical Research**. v.102, n.24, p. 29029 – 29041, 1997.
- GHOLZ, H. L., GRIER, C. C., CAMPBELL, A. G., AND BROWN, A. T. Equations and their use for estimating biomass and leaf area of Pacific Northwest plants, Res. Paper No. 41, **For. Res. Lab.**, Oregon State Univ. 1979.
- GRANIER, A., LOUSTAU, D., BRÉDA, N. A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index. **Annals of Forest Science**.v.57, p. 755–765, 2000.
- GRIER, C. C., LEE, K. M., ARCHIBALD, R. M. Effect of urea fertilization on allometric relations in young Doug-las-fir trees. **Canadian Journal of Forest**. v.14, p. 900–904, 1984.
- GUYOT, G.; GUYON, D.; RIOM, J. Factors affecting the spectral response of forest canopies: a review. **Geocarto International**, v. 4, n. 3, p. 3-18, Sep. 1989.
- HARDWICKA, S.R., TOUMIA, R., PFEIFERB, M., TURNERC, E. C., NILUSD, R., EWERSB, R. M. The relationship between leaf area index and microclimate in tropical forest and oil palm plantation: Forest disturbance drives changes in microclimate. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 201, p. 187–195, 2015.
- HU, Y., WANG, Z., SHU, Y., WU, Y., Studies on photosynthesis of heve a population II. A mathematical model for estimating the photosynthetic output of heve a population. **Chinese Journal of Tropical Crops**. v.3, p. 41–48, 1982.
- HUANG, L.;MCDONALD-BULLER, E. C.; MCGAUGHEY, G.;KIMURA, Y.; ALLEN, D. T. Annual variability in leaf area index and isoprene and monoterpene emissions during drought years in Texas. **Atmospheric Environment**. v. 92, p. 240 – 249, 2014.
- HUETE A. R. A soil-adjusted vegetation index. **Remote Sensing of Environment, Elsevier Science Publishing Co.**, New York, USA. 25:295-309, 1988.

HUETE, A. R., DIDAN, K., SHIMABUKURO, Y. E., RATANA, P., SALESKA, C. R., HUTYRA, L. R., Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. **Geophysical Research Letters**.v.33, 2006.

HUETE, A. R., JACKSON, R. D., POST, D. F. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. **Remote Sensing of Environment**.v.17, p. 37–53, 1985.

HUETE A. R., LIU H., BATCHILY K., VAN LEEUWEN W. A Comparison of Vegetation Indices Over a Global Set of TM Images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**. v.59, n. 3, p. 440-451, 1997.

ISHIHARA, M.I.; HIURA, T. Modeling leaf area index from litter collection and tree data in a deciduous broadleaf forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.151, p.1016–1022, 2011.

JIANG, Z.; HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. **Remote Sensing of Environment**. v. 112, p.3833–3845, 2008.

JIAPAER,G.; LIANG, S.; YI, Q.; LIU, J. Vegetation dynamics and responses to recent climate change in Xinjiangu sing leaf area index as an indicator. **Ecological Indicators**. v. 58, p. 64–76, 2015.

JONCKHEERE I., FLECK S., NACKAERTS K., MUYS B., COPPIN P., WEISS M., BARET F. Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.121, p.19–35.2004.

JORDAN, C.F. Derivation of leaf area index from quality of light on the Forest floor. **Ecology**.v.50, p. 663-666, 1969.

JURICK, T.W. Temporal and spatial patterns of specific leaf weight in successional northern hardwood tree species. **American Journal of Botany**, v. 78, p. 1083-1092, 1986.

JUSTICE, C.O., VERMOTE E., TOWNSHEND J. R. G., DEFRIES R., ROY, D.P., HALL, D.K., SALOMONSON, V.V., PRIVETTE J.L., RIGGS, G., STRAHLER, A.,. The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.36, n.4, p. 1228-1249, 1998.

KALACSKA, M. E. R., SÁNCHEZ-AZOFEIFA, G. A., CALVO-ALVARADO, J.C., RIVARD, B., QUESADA, M. Effects of Season and Successional Stage on Leaf Area Index and Spectral Vegetation Indices in Three Mesoamerican Tropical Dry Forests.**Biotropica**.v.37, n.4,p. 486–496, 2005.

KAUFMAN, Y. J.; SETZER, A.; WARD, D.; TANRE, D.; HOLBEN, B. N.; MENZEL, P.; PEREIRA, M. C.; RASMUSSEN, R. Biomass burning airborne and spaceborne experiment in the Amazonas (BASE-A). **Journal of Geophysical Research**, v.97, n.13, p. 14581 - 14599, 1992.

KAUFMAN, Y. J., TANRD, D. Strategy for Direct and Indirect Methods Correcting the Aerosol Effect on Remote Sensing: From AVHRR to EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**. v. 55, p. 65-79, 1996.

LAW, B. E., WARING, R. H. Remote sensing of leaf area index and radiation intercepted by understory vegetation. **Ecological Applications**, v.4, p.272-279, 1994.

LE DANTEC, V.; DUFRÊNE, E.; SAUGIER, B. Interannual and spatial variation in maximum leaf area index of temperate deciduous stands. **Forest Ecology and Management**. v. 134, p. 71 – 81, 2000.

LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. (Ed.). **Ecologia e conservação da caatinga**. Recife: Editora Universitária da UFPE. p. 3-74, 2003.

LEAL I.R. SILVA J. M. C, TABARELLI M. LACHER Jr, T.E. Changing the course of biodiversity conservation in the Caatinga of Northeastern Brazil. **Conservation Biology** 19:701–706, 2005.

LEUSCHNER, C., MOSER, G., BERTSCH, C., RÖDERSTEIN, M., HERTEL, D. Large altitude in an increase in tree root/shoot ratio in tropical mountain forests of Ecuador. **Basic and Applied Ecology**. v.8, p. 219–230, 2007.

LEMOS, J. R. **Florística, estrutura e mapeamento da vegetação de Caatinga da Estação Ecológica de Aiuaba, Ceará**. Tese de doutorado, Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, SP. 2006.

LI, P., JIANG, L., FENG Z. Cross-Comparison of Vegetation Indices Derived from Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Sensors. **Remote sensing**. v.6, p. 310 – 329, 2014.

LIU, Z., CHEN, J. M., JIN, G., QIC, Y. Estimating seasonal variations of leaf area index using litter fall collection and optical methods in four mixed evergreen–deciduous forests. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 209–210, p. 36–48, 2015.

LOPES, F.B.; BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M.; ANDRADE, E. M.; CHAVES, L. C. G. Modelagem da qualidade das águas a partir de sensoriamento remoto hiperespectral. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 13-19, 2014.

LÜDEKE, M.; JANECEK, A.; KOHLMAIER, G. H. Modelling the seasonal CO<sub>2</sub> up take by land vegetation using the global vegetation index. **Tellus**. v.43B, p. 188– 196, 1991.

MAGUIRE, D. A., BENNETT, W. S. Patterns in vertical distribution of foliage in young coastal Douglas-Fir. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 26, p. 1991-2005, 1996.

MAIA, G. N. **Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades**. 2. ed. Fortaleza – CE, 2012.

- MACFARLANE, C., HOFFMAN, M., EAMUS, D., KERP, N., HIGGINSON, S., MCMURTRIE, R., ADAMS, M. Estimation of leaf area index in eucalypt forest using digital photography. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 143, p.176–188, 2007.
- MAŠKOVÁ, Z., ZEMEK, F., KVĚT, J. Normalized difference vegetation index (NDVI) in the management of mountain meadows. **Boreal Environment Research**. v.13, p. 417–432, 2008.
- McCULLOCH J.S.G., ROBINSON M. History of forest hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 150, p. 189-216, 1993.
- MEDEIROS, P. H. A.; ARAÚJO, J.C. de; BRONSTERT, A. Interception measurements and assessment of Gash model performance for a tropical semi-arid region. **Revista Ciência Agrônômica**. v. 40, n. 2, 165-174. 2009.
- MIURA, T., HUETE, A. R., VAN LEEUWEN, W. J. D. Vegetation detection through smoke-filled AVHRR images: An assessment using MODIS band passes. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, p. 32001–32011, 1998.
- MIURA, T.; HUETE, A. R.; YOSHIOKA, H.; HOLBEN, B. N. An error and sensitivity analysis of atmospheric resistant vegetation indices derived from dark target-based atmospheric correction. **Remote Sensing of Environment**. v. 78, p. 284 - 298, 2001.
- MONDAL, P. Quantifying surface gradients with a 2-band Enhanced Vegetation Index (EVI2). **Ecological Indicators**. v. 11, p. 918–924, 2011.
- MOURA, A. E. S.; CORREA, M. M.; SILVA, E. R.; FERREIRA, R. L. C.; FIGUEIREDO, A. C.; POSSAS, J. M. C. Interceptação das chuvas em um fragmento de floresta da mata atlântica na bacia do Prata, Recife-PE. **Revista Árvore**, v. 33, p. 461-469, 2009.
- MUZYLO, A., LLORENS, P., VALENTE, F., KEIZER, J. J., DOMINGO, F., GASH, J. H. C. A review of rainfall interception modelling. **Journal Hydrology**. v.370, p. 191–206, 2009.
- MYNENI, R.B., HOFFMAN, S., KNYAZIKHIN, Y., PRIVETTE, J.L., GLASSY, J., TIAN, Y., WANG, Y., SONG, X., ZHANG, Y., SMITH, G.R., LOTSCH, A., FRIEDL, M., MORISETTE, J.T., VOTAVA, P., NEMANI, R.R., Running, S. W. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. **Remote Sensing Environment**. v.83, p.214 - 231, 2002.
- MYNENI, B. R., NEMANI, R. R., RUNNING, W. S. Estimation of global leaf area and absorbed PAR using radiative transfer models. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v. 35, p. 1380 – 1393, 1997.
- NASAHARA, K.N., MURAOKA, H., NAGAI, S., MIKAMI, H. Vertical integration of leaf area index in a Japanese deciduous broad-leaved forest. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.148, p. 1136–1146, 2008.
- NASH, J.E., SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models – Part I: A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

NÁVAR, J., CARLYLE-MOSES, D.E. e MARTINEZ M., A. Interception loss from the Tamaulipanmatorralthornscrub of north-eastern México: an application of the Gash Analytica linterception loss model. **Journal of Arid Environments**, 41, p. 1-10, 1999.

NIINEMETS, U., KULL, K. Leaf weight per area and leaf size of 85 Estonian woody species in relation to shade tolerance and light availability. **Forest Ecology and Management** v.70, p. 1-10, 1994.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 1992. 308p.

OKIN, G. S. Relative spectral mixture analysis a multitemporal index of total vegetation cover. **RemoteSensing of Environment**, v. 106, p. 467-479, 2007.

OLIVEIRA, G., ARAÚJO, M. B., RANGEL, T. F., ALAGADOR, D., DINIZ FILHO, J.A. F. Conserving the Brazilian semiarid (Caatinga) biome under climate change. **Biodivers Conserv**, 2913–2926, 2012.

OLIVEIRA G., DINIZ-FILHO J. A. F. Spatial patterns of terrestrial vertebrates richness in Brazilian semiarid, Northeastern Brazil: selecting hypotheses and revealing constraints. **Journal Arid Environment**, v.74, p. 1418–1426, 2010.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. C. de; DIAS, H. C. T.; Precipitação efetiva em fragmento secundário da Mata Atlântica. **Revista Árvore**, v. 29, n. 1, 2005.

PEEL, M. C., MCMAHON, T. A., FINLAYSON B. L. Vegetation impact on mean annual evapotranspiration at a global catchment scale. **Water Resources Research**. v. 46, 2010.

PINHEIRO, E. A. R.; COSTA, C.A.G.; ARAÚJO, J. C. Effective root depth of the Caatinga biome. **Journal of Arid Environments**, v.89, p. 1-4, 2013.

PONZONI, F. J., SHIMABUKURO, Y. E., KUPLICH, T. M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. 2ª Edição. Cubatão: Oficina de Textos, 2012. 160 p.

PUESCHEL, P., BUDDENBAUM, H., HILL, J. An efficient approach to standardizing the processing of hemispherical images for the estimation of forests structural attributes. **Agricultural and Forest Meteorology** v. 160, p. 1–13. 2012.

QI, J.; KERR, Y.H.; MORAN, M.S.; WELTZ, M.; HUETE, A.R.; SOROOSHIAN; S.; BRYANT, R. Leaf area index estimate using remote lysensed data and BRDF model in a semiarid region. **Remote Sensing of Environment**, v.73, p.18-30, 2000.

ROCHA, A. V.;SHAVER G. R. Advantages of a two band EVI calculated from solar and photosynthetically active radiation fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 149, p. 1560–1563, 2009.

RODRIGUES, E. L., FERNANDES, D. H. F., ELMIRO, M. A. T., FARIA, S. D. Avaliação da cobertura vegetal por meio dos índices de vegetação SR, NDVI, SAVI e EVI na sub-bacia do Vale do Rio Itapeçerica, Alto São Francisco, em Minas Gerais. **Anais. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2013.

- ROUSE, J.W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A., DEERING, D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I: 309-317. 1973.
- SALESKA, R. S., DIDAN, K., HUETE, R. A., & DA ROCHA, R. H. Amazon forests green-up during 2005 drought. **Science**, v.318, p. 612, 2007.
- SCHULZE, E. D. **Plant life forms and their carbon, water and nutrient relations. Encyclopedia of plant physiology.** New Series, 12B (ed. by O.L. Lange, P.S. Nobel, C.B. Osmond & H. Ziegler), pp. 615–676. Springer-Verlag, Berlin. 1982.
- SHABANOV, N. V., WANG, Y., BUERMANN, W., DONG, J., HOFFMAN, S., SMITH, G. R., TIAN, Y., KNYAZIKHIN, Y., MYNENI, R. B. Effect of foliage spatial heterogeneity in MODIS LAI and FPAR algorithm over broadleaf forests. **Remote Sensing Environment**. v.5838, p. 1–14, 2003.
- SILANS, A.M.B. PASSERAT de, WERLANG, L.M. e SILVA, F.M. da. Estudo experimental da interceptação da chuva pela vegetação da caatinga. XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracajú, CD-ROM, 2001.
- SILVA, E. C.; NOGUEIRA, R. J. M. C.; AZEVEDO NETO, A. D.; BRITO, J. Z.; CABRAL, E. L. Aspectos ecofisiológicos de dez espécies em uma área de caatinga no município de Cabaceiras, Paraíba, Brasil. **Série Botânica**. v. 59, n. 2, p. 201-205, 2004.
- SILVA, V. P. R. On climate variability in Northeast Brazil. **Journal Arid Environment**, v. 58, p. 575–596, 2004.
- SONG C.; DANNENBERG M. P.; HWANG T. Optical remote sensing of terrestrial ecosystem primary productivity. **Progress in Physical Geography**.v.37, n. 6,p. 834–854, 2013.
- SOUSA, C. L. DE; RIBEIRO, M. C.; PONZONI, F. J. Influência do tempo e do tipo de armazenamento na reflectância espectral de folhas de *Eucalyptus grandis* “EX-SITU”. **Revista Árvore**, v. 20, n. 2, p. 255-265, 1996.
- STEFFEN, C. A.; MORAES, E. C.; GAMA, F. F. Radiometria óptica espectral. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8., Salvador, 1996. **Tutorial**. São José dos Campos: INPE, p. 1.1-2.23, 1996.
- SUGAWARA, L. M., ADAMI, M., RUDORFF, B. F. T., FARIA V. G. C. Avaliação de três métodos de estimativa de índice de área foliar aplicados à cana de açúcar. **Anais**. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, p. 499-506, 2009.
- SPRINTSIN, M., COHEN, S., MASEYK, K., ROTENBERG, E., GRÜNZWEIG, J., KARNIELI, A., BERLINER, P., YAKIR, D. Long term and seasonal courses of leaf area index in a semi-arid forest plantation. **Agricultural and Forest Meteorology**.v.151, p. 565–574, 2011.

- RYU, Y., SONNENTAG, O., NILSON, T., VARGAS, R., KOBAYASHI, H. WENKA, R., BALDOCCHI, D. D. How to quantify tree leaf area index in an open savanna ecosystem: A multi-instrument and multi-model approach. **Agricultural and Forest Meteorology**.v.150.p.63–76, 2010.
- TANG, Q., VIVONI, E. R., MUÑOZ-ARRIOLA, F., LETTENMAIER, D. P. Predictability of evapotranspiration pattern using remote sensed vegetation dynamics during the North American Monsoon. **Journal Hydrometeorol.** v.13, p. 103–12, 2011.
- TESEMMA, Z. K.; WEI, Y. PEEL, M. C.; WESTERN, A. W. The effect of year-to-year variability of leaf area index on Variable Infiltration Capacity model performance and simulation of runoff. **Advances in Water Resources.** v. 83. 310–322, 2015.
- TILLACK, A.; CLASE, A.; KLEINSCHMIT, B.; FÖRSTER, M. Estimation of the seasonal leaf area index in an alluvial forest using high-resolution satellite-based vegetation indices. **Remote Sensing of Environment.** v. 141, p. 52–63, 2014.
- TROVÃO, D. M. B. M.; FERNANDES, P. D.; ANDRADE, L. A.; DANTAS NETO, J. Variações sazonais de aspectos fisiológicos de espécies da Caatinga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.3, p.307–311, 2007.
- TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, p. 127-150, 1979.
- VIEIRA, W. L. S.; SANTANA, G. D.; ARZABE, C.; Diversity of reproductive modes in anuran communities in the Caatinga dry lands of northeastern Brazil. **Biodivers Conservation.** v. 18, p. 55–66, 2009.
- WANG, Q., ADIKUA, S., TENHUNENA, J., GRANIER, A. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. **Remote Sensing of Environment.**v.94, p.244-255, 2005.
- WARDLOW, B. D., EGBERT, S. L., KASTENS, J. H. Analysis of time-series MODIS 250m vegetation index data for crop classification in the U.S. Central Great Plains. **Remote Sensing of Environment**, v. 108, p. 290–310, 2007.
- WATSON, D. J. Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany.** v. 11, p. 41-76, 1947.
- WELLES, J. M., AND COHEN, S. Canopy structure measurement by gap fraction analysis using commercial instrumentation. **Journal of Experimental Botany.** v..302, p.1335–1342, 1996.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, p. 184-194, 1981.
- WRIGHT, K.A.; SENDEK, K.H.; RICE, R.M.; THOMAS, R.B. Logging effect on stream flow: storm runoff at Caspar Creek in Northwestern California. **Water Resources Research**, v.26, n.7, p.1657-1667, 1990.

WULDER, M. A., LE DREW E. F., FRANKLIN S. E., LAVIGNE, M. B. Aerial image texture information in the estimation of the northern deciduous and mixed wood forest leaf area index (LAI). **Remote Sensing Environment**. v. 64, p. 64–76, 1998.

XAVIER A. C., VETTORAZZI C. A. Mapping leaf area index through spectral vegetation indices in a subtropical watershed. **International Journal Remote Sensing**, vol. 25, n. 9, p.1661–1672,2004.

XIAO, X., BRASWELL, B., ZHANG, Q., BOLES, S., FROLKING, S., MOORE, B. Sensitivity of vegetation indices to atmospheric aerosols: Continental-scale observations in Northern Asia. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, p. 385–392, 2003.

XIAO, X., HOLLINGER, D., ABER, J., GOLTZ, M., DAVIDSON, E. A., ZHANG, Q. Satellitebased modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. **Remote Sensing of Environment**, v.89, p.519–534, 2004.

XIE, G., CHEN, B., WANG, J., WU, Z., HUANG, Y. Studies on the simulation model of photosynthesis and dry matter accumulation for rubber tree. **Chinese Science Bulletin**.v.26, p. 317–323, 2010.