

Estimativa de biomassa lenhosa da caatinga com
uso de equações alométricas e índice de vegetaçãoEstimation of "caatinga" woody biomass
using allometric equations and vegetation indexClaudemiro de Lima Júnior¹, Luciano José de Oliveira Accioly²,
Vanderlise Giongo³, Regina Lúcia Félix de Aguiar Lima¹,
Everardo Valadares de Sá Barretto Sampaio⁴ e Rômulo Simões Cezar Menezes⁵**Resumo**

O presente trabalho objetivou investigar a relação entre o índice de vegetação pela diferença normalizada (IVDN) e a biomassa estimada ($t\cdot ha^{-1}$) com uso de equações alométricas em uma área de caatinga hiperxerófila, com o intuito de ajustar um modelo de regressão linear que permita estimar a biomassa lenhosa em áreas de caatinga. Os valores de IVDN foram obtidos da cena 217/66 do sensor LANDSAT 5 TM. No campo, vinte parcelas com área de 10 x 20 m foram georeferenciadas e todas as plantas lenhosas vivas com diâmetro à altura do peito (DAP) igual ou maior que 3 cm foram identificadas, tiveram suas alturas e DAPs medidos e suas biomassas estimadas a partir de equações alométricas. A densidade média das plantas foi de 780 ind. ha^{-1} apresentando variação de 150 a 1900 ind. ha^{-1} . A espécie *Mimosa tenuiflora* apresentou maior índice de valor de importância (IVI) e maior biomassa: 10,11 $t\cdot ha^{-1}$. Os valores de IVDN variaram entre 0,4161 e 0,7067, apresentando-se positivamente correlacionados com os valores de biomassa estimados, que variaram de 5,93 a 60,74 $t\cdot ha^{-1}$, com coeficiente de correlação de Pearson de 0,84 e $p < 0,01$. A regressão linear entre IVDN e a biomassa obteve coeficiente de determinação $R^2 = 0,70$ e desvio padrão de 8,43 $t\cdot h^{-1}$. O erro de predição na estimativa da biomassa, calculado por validação cruzada foi igual a 31%, considerado satisfatório para um método de estimativa não destrutivo.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, índice de vegetação pela diferença normalizada, lenha, manejo florestal sustentável

Abstract

The present study aimed to investigate the relation between the normalized difference vegetation index (NDVI), and estimated biomass ($t\cdot ha^{-1}$) using allometric equations in an area of caatinga vegetation. The goal was to develop a linear regression model for estimating woody biomass of caatinga vegetation based on remote sensing techniques. NDVI data was obtained from the scene 217/66 LANDSAT 5 TM sensor, while in situ biomass was estimated in twenty 10 x 20 m plots. For this, each plot was georeferenced and all living woody plants with a diameter at breast height (DBH) equal to or greater than 3 cm were identified and had their height and DBH measured and their biomass estimated from allometric equations. Average plant density was 780 ind. ha^{-1} ranging from 150 to 1900 ind. ha^{-1} . The species *Mimosa tenuiflora* showed higher importance value index, and greater biomass, 10.11 $t\cdot ha^{-1}$. NDVI values ranged between 0.4161 and 0.7067 and were positively correlated with the estimated woody biomass values, which ranged from 5.93 to 60.74 $t\cdot ha^{-1}$, with Pearson correlation coefficient of 0.84 and $p < 0.01$. The linear regression between NDVI and estimated woody biomass showed a coefficient of determination $R^2 = 0.70$ and standard deviation of 8.43 $t\cdot h^{-1}$. The prediction error for woody biomass estimation, obtained by the method of cross-validation was equal to 31%, considered suitable for a nondestructive estimation method.

Keywords: remote sensing, normalized difference vegetation index, firewood, sustainable forest management.

¹Doutor(a). Professor(a) Adjunto(a). UFPE - Universidade de Pernambuco. BR 203, Mm 02, s/n- Campus Universitário, Vila Eduardo - Petrolina - PE, 56328-903. E-mail: claudemiro.lima@upe.br; regina.aguiar@upe.br.

²Pesquisador Doutor. EMBRAPA-CNPS-UEP - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Rua Antônio Falcão, 402, Recife-PE, Brasil, 51020-240. E-mail: luciano@uep.cnps.embrapa.br.

³Pesquisadora Doutora. EMBRAPA-CPATSA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Rodovia BR 428, Km 152, Zona Rural, Petrolina - PE, Brasil, 56300-970. E-mail: vanderlise@cpatsa.embrapa.br.

⁴Doutor, Professor Titular. UFPE - Universidade Federal de Pernambuco. Av. Prof. Luís Freire, 1000 - Cidade Universitária, Recife - PE - 50740-540. E-mail: esampaio@ufpe.br.

⁵Doutor, Professor Associado. UFPE - Universidade Federal de Pernambuco. Av. Prof. Luís Freire, 1000 - Cidade Universitária, Recife - PE - 50740-540. E-mail: rmenezes@ufpe.br.

INTRODUÇÃO

O semiárido nordestino tem como tipo de vegetação predominante a Caatinga. Atualmente, a vegetação nativa da Caatinga cobre cerca de 40% da área original no semiárido nordestino. No restante da área, a vegetação da caatinga foi retirada principalmente para uso na prática agrícola, pecuária extensiva e extração de lenha para fins energéticos (GARIGLIO et al., 2010). A remoção parcial ou total da vegetação em áreas da caatinga resulta na redução do estoque e da produção de biomassa vegetal e na diminuição da cobertura dos solos do semiárido, fatores que levam ao aumento na degradação do bioma (COSTA et al., 2009). A produção de biomassa em áreas de caatinga apresenta grande variação espacial e sazonal, principalmente em função da precipitação pluviométrica total baixa e da distribuição irregular das chuvas. O estoque de biomassa em áreas de caatinga varia em média entre 30 a 50 t.ha⁻¹, mas apresenta ampla faixa de variação que vai de 2 a 160 t.ha⁻¹ na Caatinga como um todo (SAMPAIO; FREITAS, 2008).

A lenha da caatinga tem sido utilizada como umas das principais fontes de energia na região, seja para o consumo doméstico, seja para uso em indústrias, principalmente as de panificação, olarias e calcinação de gipsita no polo gesseiro da região do Araripe. Apesar do uso intensivo da lenha da caatinga, há poucas informações sobre as quantidades de biomassa que são retiradas desse bioma (SILVA; SAMPAIO, 2008). Alguns estudos têm sido desenvolvidos para quantificar a biomassa neste tipo de vegetação, com uso de métodos diretos e indiretos (ALVES JUNIOR, 2010; KUNTSCHIK, 2004; VIANA et al., 2009).

As medições diretas têm alto grau de precisão, mas envolvem amostragem destrutiva, consomem tempo e têm alto custo. As medições indiretas são boas alternativas para a medição de biomassa, pois implicam em menor dano ambiental, menor mão de obra e menor custo financeiro. Elas podem ser feitas com o uso de imagens de satélite e o desenvolvimento de equações alométricas. Atualmente muitas estimativas são baseadas em imagens do LANDSAT TM, pois a informação espectral apresenta forte correlação com a biomassa e pode ser utilizada para criação de índices de vegetação (BRANDÃO et al., 2007; COSTA et al., 2002; VIANA et al., 2009). O índice de vegetação pela diferença normalizada (IVDN) é um indicador sensível à quantidade de vegetação verde, calculado como

uma razão entre a reflectância medida nas regiões do vermelho e infravermelho próximo do espectro eletromagnético, sendo essas duas bandas espectrais selecionadas em razão de serem mais afetadas pela absorção pela clorofila na folhagem da vegetação verde e consequentemente pela densidade dessa vegetação na superfície (FRANCISCO et al., 2012). O IVDN apresentou correlação com a quantidade de biomassa medida por método direto destrutivo (COSTA et al., 2002; VIANA et al. 2009) e com o índice de área de planta (COSTA et al., 2002). As equações alométricas são equações matemáticas que relacionam a biomassa com algumas variáveis das árvores, como o diâmetro e a altura. Elas permitem estimar a biomassa das plantas com uso de medidas biométricas não destrutivas (SILVA; SAMPAIO, 2008).

A estimativa da quantidade de biomassa com uso de técnicas de sensoriamento remoto pode ser de grande importância no Bioma Caatinga, que tem grande extensão e alta variabilidade da densidade vegetacional, pois possibilitaria a identificação de áreas com potencial para exploração de lenha, o monitoramento de áreas manejadas ou de preservação permanente, a quantificação do estoque de carbono e a simulação de cenários de manejo utilizando metodologias de baixo custo e de rápida aplicação.

Este trabalho teve como objetivo analisar a relação existente entre o índice de vegetação pela diferença normalizada (IVDN) e a biomassa estimada com uso de equações alométricas para ajustar um modelo de regressão linear que permita estimar a biomassa lenhosa em áreas de Caatinga a partir de imagens obtidas por satélites.

METODOLOGIA

Caracterização da área de estudo

A área de caatinga estudada está localizada no município de Petrolina, em Pernambuco, situada entre as coordenadas geográficas 9,19°S e 9,02°S e 40,35°W e 40,29°W (Figura 1). O estudo de campo para a estimativa da biomassa nas parcelas foi realizado entre julho e setembro de 2012. A precipitação média anual varia em torno de 500 mm, concentrada nos meses de fevereiro, março e abril (Figura 2). A temperatura média mensal é de 26°C, a umidade relativa varia entre 50 e 70%, insolação média é de 2.800 h.ano⁻¹ e evapotranspiração potencial em torno de 2.000 mm.ano⁻¹. A vegetação nativa presente na área é de caatinga hiperxerófila, com fisiono-

mia que varia de predominantemente arbustiva a arbustiva e arbórea, relativamente densa e geralmente espinhosa, composta por diversas espécies adaptadas às condições climáticas, predominando as espécies caducifólias.

Estimativa da biomassa com uso de equação alométrica

Inicialmente, a imagem IVDN foi fatiada em cinco classes, o que permitiu que a área estudada fosse classificada em cinco subáreas, com diferentes estruturas de vegetação. Após essa classificação, foram locadas na área 20 parcelas com área de 10x20 m, que apresentassem densidade vegetal variando entre os valores mais baixos e mais altos da área de estudo. Isso permitiu incluir uma ampla faixa de valores de biomassa e, supostamente, de IVDN, para garantir que o modelo de regressão linear envolvesse todo o intervalo de valores dessas duas variáveis na área de estudo. Outro importante passo foi a locação das parcelas, pois as mesmas deveriam ser representativas do pixel da imagem Landsat. Sendo assim, as parcelas foram georeferenciadas e suas localizações identificadas numa cena ortoretificada da banda pancromática do sensor IKONOS. A cena utilizada do IKONOS foi do produto *precision* cuja precisão posicional é de 4 metros.

Para a estimativa da biomassa *in situ*, todas as plantas lenhosas vivas com diâmetro a altura do peito igual ou maior a 3 cm, presentes na parcela, foram identificadas e tiveram sua altura e circunferência à altura do peito (1,3 m) medidos. As medidas de circunferência foram convertidas em diâmetro à altura do peito (DAP). Espécimes da família Cactaceae não foram incluídos na amostragem, pois a estimativa foi feita para determinação da biomassa de lenha da Caatinga. A quantidade de biomassa aérea seca disponível foi estimada com uso de equações alométricas desenvolvidas por Sampaio; Silva (2005). A biomassa das plantas com DAP entre 3 e 30 cm foi calculada utilizando-se o DAP, conforme a Equação 1.

$$Biomassa (kg) = 0,1730 \times DAP^{2,2950}$$

$$R^2 = 0,9184 (1)$$

A biomassa das plantas com valor de DAP maior que 30 cm foi calculada com a Equação 2, que leva em conta a área seccional a altura do peito (AAP), a altura total da planta (H) e a densidade da madeira (p). Os dados da densidade dessas espécies foram obtidos de Maia (2004).

$$Biomassa (kg) = 0,1648 \times (AAP \times H \times p)^{0,9023}$$

$$R^2 = 0,9573 (2)$$

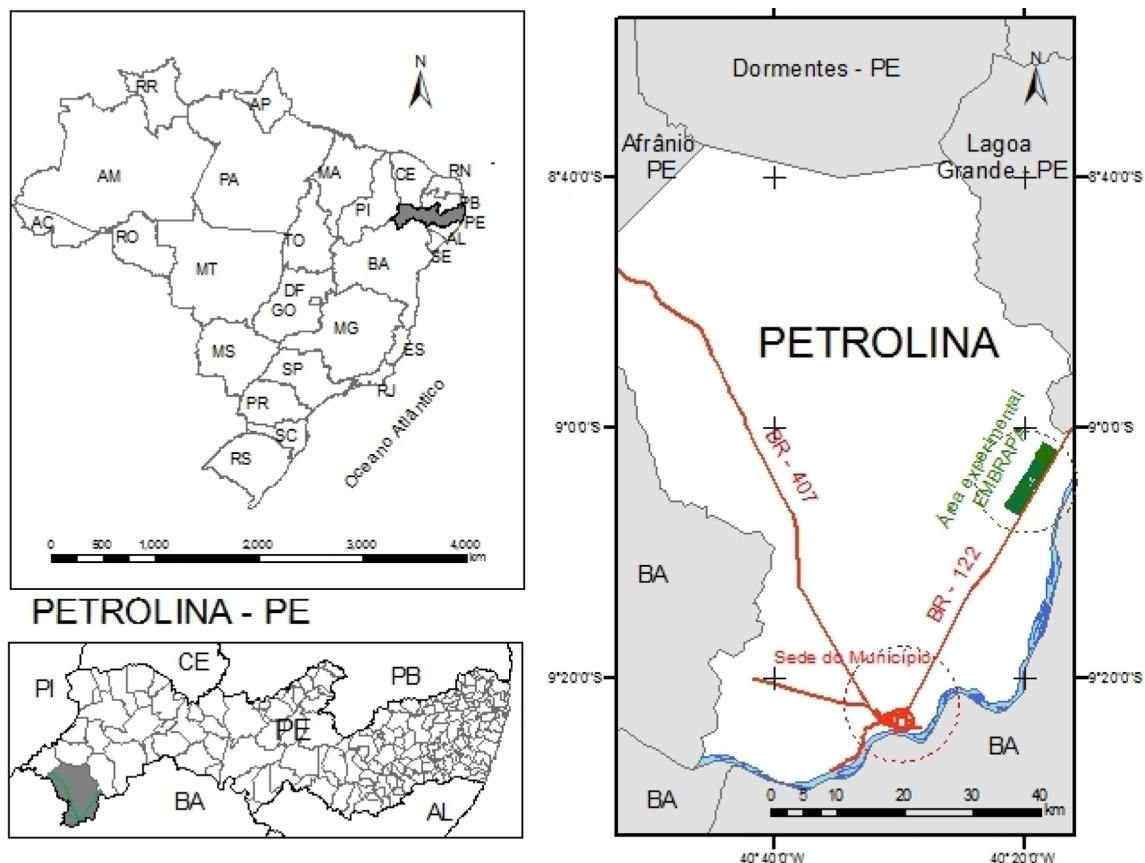


Figura 1. Localização da área de estudo no município de Petrolina, em Pernambuco.
Figure 1. Location of the study area in the city of Petrolina, in Pernambuco.

Determinação do índice de vegetação pela diferença normalizada (IVDN)

Para a estimativa do IVDN foi utilizada a cena (órbita/ponto) 217/66 do sensor LANDSAT 5 TM, com data de passagem de 7 de abril de 2011, disponibilizada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (BRASIL, 2012). A escolha da data da cena foi feita após uma estimativa preliminar do IVDN médio da área de estudo das três cenas disponibilizadas pelo INPE, no período de Janeiro de 2011 a Junho de 2012. A área de estudo das cenas com datas de passagens de 07 de Abril de 2011, 10 de Junho de 2011 e 29 de Agosto de 2011 apresentaram IVDN médio de 0,485, 0,423 e 0,133, respectivamente. O gráfico da Figura 2 mostra que a data da cena com maior IVDN coincide com o período de chuva, época em que ocorre o rebrotamento de folhas da vegetação, pois o IVDN está relacionado com a reflectância da folhagem. Apesar da imagem ser relativa ao ano de 2011, ou seja, um ano antes das medidas em campo para determinação da biomassa de lenha, não se espera que a variação na biomassa de lenha tenha variado significativamente nesse período.

Embora para a obtenção do IVDN nem sempre seja necessária a conversão do número digital (ND) em reflectância, neste trabalho essa conversão foi feita para permitir futuras análises multitemporais da evolução da cobertura vegetal na área de estudo. Desta forma, a obtenção do IVDN envolveu as seguintes etapas de pré-processamento: 1) correção geométrica; 2) calibração radiométrica; 3) conversão dos valores de radiância em reflectância normalizada para o topo da atmosfera, também conhecida como reflectância aparente.

No pré-processamento da imagem, a cena foi inicialmente corrigida usando como referência uma imagem ortorretificada do sensor IKONOS, com 1 metro de resolução e precisão posicional de 4 metros (produto *precision*). Em seguida, esta imagem foi ortorretificada com base no Modelo Digital de Elevação SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). A projeção utilizada foi a UTM com datum WGS 84 e zona 24S. O erro médio do correto foi de 0,5 píxel, ou seja, cerca de 15 m. Salienta-se que a relação entre a área da parcela (200 m²) e a área de um píxel do sensor Landsat 5 TM (900 m²) não é a mais adequada, no entanto, Salajanu; Jacobs (2009), relacionaram dados de inventário florestal obtidos em parcelas com 1/24 acres (cerca de 168 m²) com dados do sensor Landsat TM. Com o objetivo de reduzir os efeitos de borda e os erros inerentes ao georeferenciamento no presente trabalho, foi realizada uma inspeção visual da fisionomia da vegetação numa área equivalente a 3 pixels (2.700 m²). Essa inspeção mostrou a representatividade das parcelas para os 3 pixels considerados.

A calibração radiométrica foi feita pela conversão do número digital (ND) de cada píxel da imagem original em radiância espectral monocromática, L_{λ_i} ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$), a partir da Equação 3 (MARKHAM; BAKER, 1987), onde a e b são as radiâncias espectrais mínima e máxima, ND é a intensidade do píxel, e i corresponde às bandas do Landsat 5 TM. Os coeficientes de calibração a e b utilizados são os propostos por Chander et al. (2007).

$$L_{\lambda_i} = a_i + \frac{b_i + a_i}{255} \times ND \quad (3)$$

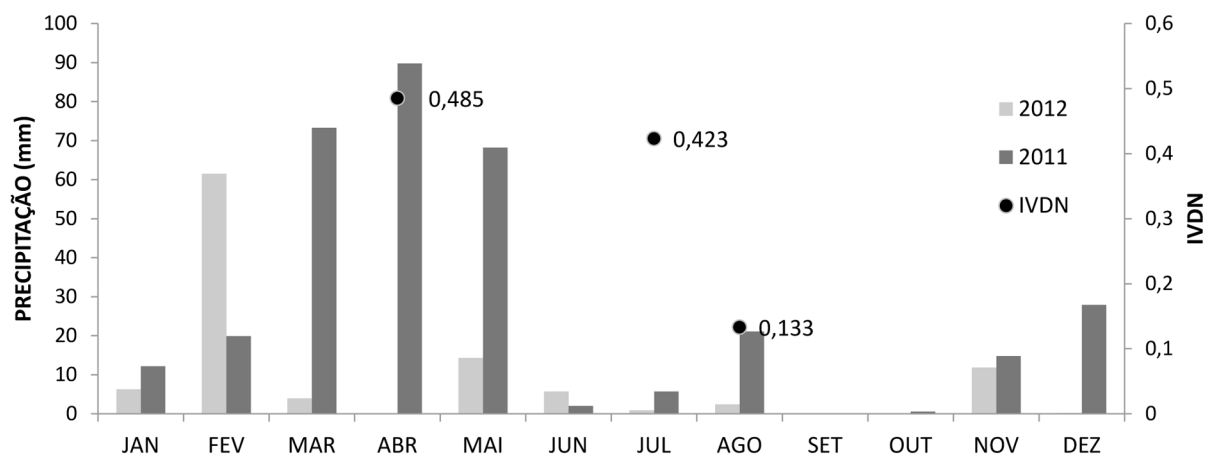


Figura 2. Precipitação pluviométrica mensal da Estação Agrometeorológica de Bebedouro (Petrolina-PE 09°09'S 40°22'W) nos anos de 2011 e 2012 e os valores de IVDN para os meses de Abril, Julho e Agosto de 2011.

Figure 2. Monthly rainfall of the weather station in Petrolina-PE (09° 09'S 40° 22'W) through the years 2011 and 2012 and values of NDVI for the months of April, July and August 2011.

A reflectância foi obtida a partir da razão entre a integração hemisférica da radiância monocromática e a irradiância (Equação 4) solar monocromática incidente numa superfície horizontal, onde L_i é a radiância espectral de cada banda, $ESUN$ é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera, Z é o ângulo zenital solar e d_r é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol (ALLEN et al., 2002).

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda i}}{ESUN \lambda \cdot \cos Z \cdot d_r} \quad (4)$$

O IVDN foi calculado como a razão entre a diferença de reflectância das bandas do infravermelho próximo e do vermelho e a soma das mesmas (Equação 5),

$$IVND = (\rho_{IVP} - \rho_V) / (\rho_{IVP} + \rho_V) \quad (5)$$

onde ρ_{IVP} e ρ_V são as reflectâncias no infravermelho próximo e no vermelho, e correspondem respectivamente às bandas 4 e 3 do Landsat 5 TM (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

Relação entre estimativa de biomassa por equações alométricas e IVDN

A relação entre o IVDN calculado e a quantidade de biomassa ($t \cdot ha^{-1}$) estimada com equações alométricas foi avaliada pela correlação de Pearson. Os parâmetros da equação do modelo de regressão linear foram estimados pelo método dos mínimos quadrados. Em seguida, foram estimados o coeficiente de correlação de Pearson (R), o coeficiente de determinação (R^2) e a análise de variância.

O erro da predição, que pode ser utilizado para prever o erro médio das estimativas em trabalhos futuros com o uso dessa equação, foi calculado pelo método da validação cruzada deixando um de fora, (leave-one-out cross-validation-LOOCV). Este método consiste em, a cada interação criar um modelo com (N-1) dados, considerando N o número total de dados, que neste caso é igual a 20, denominados dados de treinamento (training set), e validar o modelo com o dado que ficou de fora, que é denominado de dado de prova (test set) de forma que, para cada interação, se use um só dado como dado de prova e todos os outros dados são usados como dados de treinamento. Foram realizadas 20 interações, de forma que, para cada uma delas, se calculou o erro E_i . O resultado final foi obtido pela média dos 20 valores de erros obtidos, sendo esta média o erro (E) de predição de valores futuros, de acordo com a

Equação 6 (ARLOT; CELISSE, 2010; BERGMEIR; BENÍTEZ, 2012).

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i \quad (6)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A densidade média das plantas foi de 780 indivíduos por hectare ($ind \cdot ha^{-1}$), apresentando variação de 150 a 1900 $ind \cdot ha^{-1}$ (Tabela 1). O valor médio de densidade foi semelhante ao relatado por Ferraz (2011), que encontrou 781 $ind \cdot ha^{-1}$ em uma área de caatinga com vegetação arbustivo-arbórea, em pousio há 22 anos, após retirada total da vegetação, em Floresta, PE. A densidade observada, entretanto, foi inferior aos de estudos feitos no Seridó-RN, que encontraram 3.247 $ind \cdot ha^{-1}$ (AMORIM et al., 2005), em Areia-PB, 2.780 $ind \cdot ha^{-1}$ (PEREIRA et al., 2003) e em Rodal et al. (2008), que apresentaram densidades entre 1876 e 2172 $ind \cdot ha^{-1}$ em duas áreas de caatinga arbustivo-arbóreas em Floresta, PE.

A espécie que apresentou maior densidade foi a *Caesalpinia pyramidalis* (catingueira), seguidas por *Croton sonderianus* (marmeleiro), *Manihot pseudoglaziovii* (maniçoba) e *Mimosa tenuiflora* (jurema preta). Esta última apresentou maior índice de valor de importância (IVI), e maior biomassa, 10,11 $t \cdot ha^{-1}$.

Os valores de biomassa da área de estudo estimados pelas equações alométricas variaram entre 5,93 e 60,74 $t \cdot ha^{-1}$ (Tabela 1). A quantidade de biomassa estimada por hectare foram inferiores aos valores estimados por Brandão et al. (2007) para a vegetação em Barbalha, Ceará, de 270 a 334 $t \cdot ha^{-1}$, e superiores aos valores encontrados por Costa et al. (2009), de 2 a 45 $t \cdot ha^{-1}$, e Amorim et al. (2005), 20 a 25 $t \cdot ha^{-1}$, estudos realizados na vegetação de Seridó, RN, região considerada como de baixa biomassa (Tabela 2).

Nas 20 parcelas foram amostrados 312 indivíduos com DAP maior ou igual a 3 cm, pertencentes a 16 espécies e a seis famílias (Tabela 2). As famílias com maior número de espécies foram Fabaceae e Euphorbiaceae, ambas com seis espécies, sendo as outras quatro famílias representadas por apenas uma espécie cada. Estes resultados corroboram a revisão de Sampaio (2002) que verificou que as famílias Fabaceae, Euphorbiaceae e Cactaceae apresentavam o maior número de espécies, em áreas de caatinga arbustivo-arbóreas do Nordeste. As únicas espé-

cies vegetais que apresentaram DAP superior a 30 cm foram *Amburana cearensis*, com densidade da madeira de 0,43 g.cm⁻³ e *Jatropha molissima*, com densidade da madeira de 0,55 g.cm⁻³ (MAIA, 2004).

Os valores de IVDN relacionados à vegetação variaram entre 0,4161 e 0,7067, apresentando-se positivamente correlacionados com os valores de biomassa estimados pelas equações alométricas, com coeficiente de correlação de Pearson de 0,84 e p < 0,01 (Figura 3).

Tabela 1. Identificação, localização e parâmetros fitossociológicos das parcelas de caatinga em Petrolina, PE.

Table 1. Identification, location and parameters of phytosociological plots in the caatinga of Petrolina, PE.

Parcelas	Coordenadas	Densidade (plantas.ha ⁻¹)	Area basal (m ² .ha ⁻¹)	H* (m)	Biomassa (t.ha ⁻¹)	Número de Espécies
1	9,081°S 40,320°W	700	7,76	4,21	36,91	8
2	9,069°S 40,312°W	1450	7,33	3,92	33,07	9
3	9,080°S 40,320°W	1000	9,7	4,25	41,37	7
4	9,032°S 40,314°W	650	8,22	3,96	38,89	4
5	9,079°S 40,320°W	700	9,32	4,61	47,44	7
6	9,032°S 40,315°W	250	8,62	5,4	43,31	2
7	9,080°S 40,319°W	450	11,1	4,44	39,40	5
8	9,080°S 40,321°W	1300	12,2	4,31	60,74	5
9	9,079°S 40,320°W	600	11	4,5	36,62	4
10	9,057°S 40,329°W	850	7,29	4,32	33,78	5
11	9,070°S 40,313°W	1750	10,7	4,44	48,88	9
12	9,069°S 40,313°W	1900	11,9	4,44	57,45	6
13	9,070°S 40,312°W	650	7,42	4,42	34,40	3
14	9,058°S 40,329°W	550	3,81	4,11	16,90	3
15	9,079°S 40,342°W	250	5,62	4	25,46	2
16	9,081°S 40,320°W	1000	5,67	3,49	18,39	4
17	9,058°S 40,328°W	200	1,92	4,38	8,63	2
18	9,079°S 40,320°W	250	12,1	5,1	26,67	3
19	9,033°S 40,315°W	150	1,24	4,43	5,93	2
20	9,081°S 40,321°W	950	4,01	3,69	17,18	3

* H = altura média das plantas

Tabela 2. Famílias, espécies, nome popular e parâmetros fitossociológicos e índice de valor de importância (IVI) de espécies arbustivo-arbóreas nas parcelas da caatinga em Petrolina – PE.

Table 2. Families, species, common name and phytosociological parameters and importance value index (IVI) of woody species in the plots in the caatinga of Petrolina - PE.

Família	Nome botânico	Nome popular	D*	AB*	H*	Biomassa (t.ha ⁻¹)	IVI
Leguminosae	<i>Caesalpinia pyramidalis</i> Tul.	catigueira	157,50	1,010	3,72	4,49	15,39
Euphorbiaceae	<i>Croton sonderianus</i> Muell. Arg.	marmeleiro	125,00	0,702	4,12	3,43	10,83
Euphorbiaceae	<i>Manihot pseudoglaziovii</i> Pax & K.Hoffm	maniçoba	120,00	0,383	4,03	1,55	12,31
Leguminosae	<i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) Poir.	jurema preta	117,50	1,978	4,54	10,11	20,07
Euphorbiaceae	<i>Cnidoscolus phyllacanthus</i> Mull. Arg. Pax k. Hoffm	favela	80,00	1,459	4,64	6,64	15,57
Apocynaceae	<i>Aspidosperma pyriforme</i> Mart	pereiro	47,50	0,302	4,66	1,32	4,67
Anacardiaceae	<i>Schinopsis brasiliensis</i> Engl	barauna	32,50	0,494	5,62	2,60	4,99
Bignoniaceae	<i>Handroanthus spongiosus</i> (Rizzini) S. Grose	casculo	30,00	0,210	4,13	1,00	3,92
Euphorbiaceae	<i>Sapium lanceolatum</i> Huber	burra leiteira	20,00	0,198	4,56	0,92	2,23
Leguminosae	<i>Amburana cearensis</i> (Allem) A.C Smith	umburana	20,00	1,011	4,75	3,02	4,38
Leguminosae	<i>Bauhinia cheilantha</i> Bong. Steud	mororo	10,00	0,031	3,13	0,12	0,92
Leguminosae	<i>Piptadenia stipulacea</i> (Benth.) Ducke	jurema branca	7,50	0,030	4,00	0,12	1,92
Euphorbiaceae	<i>Croton conduplicatus</i> Humb., Bonpl. & Kunth subesp	quebra-faca	5,00	0,021	3,25	0,09	0,96
Leguminosae	<i>Anadenanthera colubrina</i> (Vell.) Brennan var. cebil	angico	2,5	0,012	5,00	0,05	0,49
Euphorbiaceae	<i>Jatropha mollissima</i> Auta	pinhão	2,5	0,002	3,00	0,01	0,86
Bombacaceae	<i>Pseudobombax marginatum</i> (A. St.-Hil., Juss. & Cambess.) A. Robyns	umbaruçu	2,5	0,005	3,00	0,02	0,48

* D: densidade (plantas.ha⁻¹), AB: área basal (m².ha⁻¹), H: altura média das plantas (m) e IVI = índice de valor de importância

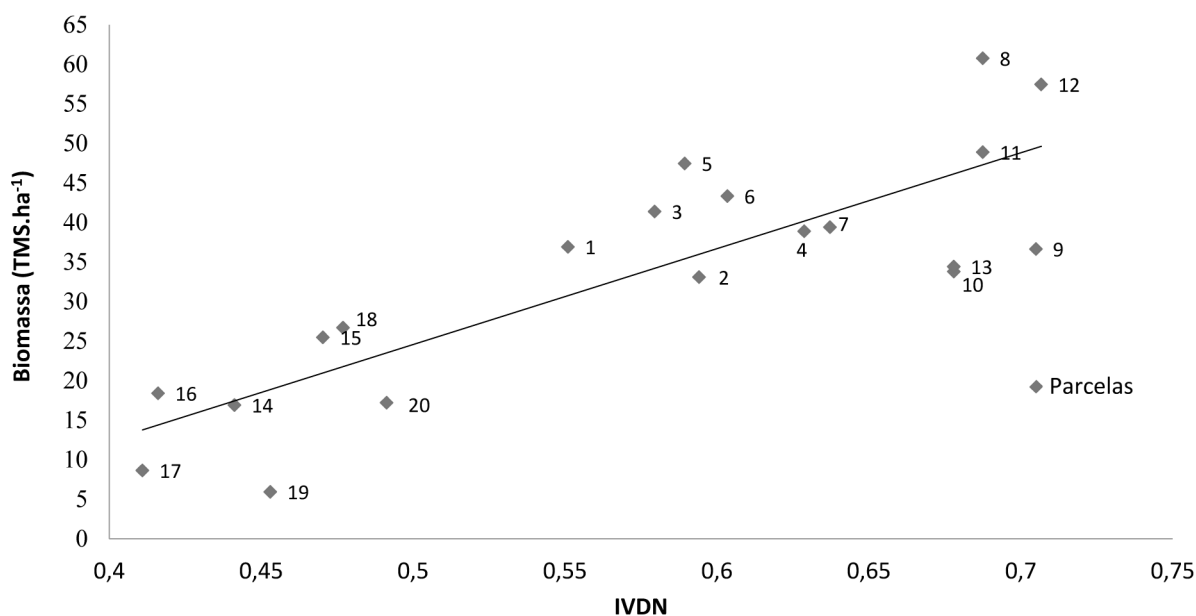


Figura 3. Correlação entre quantidade de biomassa arbustiva-arbórea aérea, em toneladas de matéria seca (TMS), e o índice de vegetação pela diferença normalizada (IVDN).

Figure 3. Correlation between the amount of biomass air-shrubby tree between the shrub and tree biomass (TMS), and the index of the normalized difference vegetation (NDVI).

A regressão linear entre IVDN e a biomassa, calculada com uso de equações alométricas, feita com o método dos mínimos quadrados resultou na Equação 7 com coeficiente de determinação $R^2 = 0,70$ e desvio padrão de $8,43 \text{ t.h}^{-1}$.

$$\text{Biomassa (t.ha}^{-1}\text{)} = 121,29 \text{ IVDN} - 36,08 \quad (7)$$

O erro de predição na estimativa da biomassa, obtido do pelo método da validação cruzada (LOOCV), foi igual $7,56 \text{ t.ha}^{-1}$, equivalente a um erro médio relativo de 31%, considerado satisfatório para um método indireto e para esse tipo vegetacional, que apresenta uma distribuição espacial muito heterogênea (VIANA et al., 2009). O coeficiente de determinação é semelhante ao de Viana et al. (2009), que quantificou, por um método direto, a biomassa vegetal aérea de plantas arbustivas lenhosas na região de Viseu, Portugal, chegando a um coeficiente de determinação $R^2 = 0,7$ e erro de estimativa de 31%, com o IVDN variando entre 0,25 e 0,43 e a biomassa lenhosa local variando entre 1 e 32 t.ha^{-1} .

O coeficiente de correlação de Pearson, $R = 0,84$, é superior ao da relação entre IVDN e biomassa em Seridó (RN) encontrado por Costa et al. (2002), $R = 0,72$, que através da estimativa de biomassa pelo IVDN obteve uma fitomassa aérea média de aproximadamente 9 t.ha^{-1} , em parcelas em estado avançado de degradação, valor inferior ao da área de caatinga em Petrolina do presente estudo.

Os valores de IVDN, biomassa e o coeficiente de determinação entre estas duas grandezas são inferiores aos que Brandão et al., (2007) estimou para vegetação em Barbalha (CE), pelo método da radiação fotossinteticamente ativa absorvida e pelo modelo de eficiência da luz. Para esta região, a faixa de IVDN foi até 0,8, com média de 0,34, e a biomassa estimada para vegetação em Barbalha variou entre 270 a 334 t.ha^{-1} . O coeficiente de determinação entre biomassa e IVDN foi igual a 0,74 para a relação nas áreas de vegetação rala, e igual a 0,9 nas áreas de vegetação densa.

Estas diferenças entre os valores de biomassa e IVDN em diferentes locais da caatinga - Petrolina (Figura 3), Seridó (COSTA et al., 2002), e Barbalha (BRANDÃO et al., 2007) – são devido provavelmente às características edafoclimáticas prevalentes nesses locais, como também possíveis diferenças nas tipologias vegetacionais e níveis de antropização de cada localidade.

O modelo de estimativa da biomassa da caatinga desenvolvido no presente estudo a partir da biomassa estimada com uso de equações alométricas e com uso do índice de vegetação pela diferença normalizada (IVDN) tem a vantagem de ser um método não destrutivo e capaz de realizar estimativas de biomassa sobre áreas extensas com rapidez e baixo custo, com um erro-padrão de $8,93 \text{ t}$ e valor médio de erro relativo de 31%.

O erro de estimativa encontrado pode ser decorrente do grau de precisão da aplicação das equações alométricas utilizadas no presente estudo, $R^2=0,92$ (SAMPAIO; SILVA, 2005), associado aos erros originados durante a medição das árvores amostrais e de coletas de dados feitas em diferentes ocasiões por equipes distintas. O erro das estimativas pode também ser atribuído aos procedimentos de sensoriamento remoto, que também incluem graus variáveis de imprecisão. Os erros podem estar relacionados ao sensor, às variações de temperatura, umidade e iluminação do meio e ainda à interpretação da imagem. Podem ainda estar relacionados com o tempo entre as datas de medição em campo e a data de passagem do sensor pela área, além da menor área da parcela (200 m²) em relação à área do pixel (900 m²). No pré-processamento podem ocorrer erros na correção geométrica, devido a má definição dos pontos de controle e/ou no algoritmo de interpolação dos elementos de imagem. De acordo com Qi et al. (1994), quando o ruído é limitado a menos de 30% no domínio de reflectância, as propriedades ópticas podem variar até 15%, e levar a erro na estimativa de parâmetros vegetacionais de até 40%.

Nas imagens de IVDN os principais tipos de ruído se devem a fatores atmosféricos, fatores relacionados ao solo e dossel e fatores relacionados ao sensor. Os ruídos na atmosfera são ocasionados pela contaminação da imagem por nuvens e pela presença de gases e aerossóis. O ozônio e o vapor d'água são os principais absorvedores da radiação no visível e no infravermelho, sendo que o ozônio produz aumento nos valores de IVDN, e o vapor d'água sua diminuição. A cor e umidade do solo influenciam o IVDN de forma irregular devido ao aumento de absorção da radiação na faixa do infravermelho próximo. Solos mais escuros tendem a aumentar o valor de IVDN. Entretanto, a ocorrência de áreas com solo nu ou com galhos e necromassa misturados à vegetação verde desviam o IVDN em direção a valores negativos (JENSEN, 2011; PONZONI; SHIMABUKURO, 2007). Aspectos relacionados ao sensor, como a ocorrência de problemas técnicos ou a resolução espacial, tem influência direta sobre a obtenção da imagem de IVDN. No caso do sensor LANDSAT TM, que tem uma resolução espacial de 30 metros, a composição do pixel ou pureza espectral é afetada, pois pixels com esta resolução incluem maior número de elementos da cobertura superficial com naturezas espectrais diferentes (JENSEN, 2011; LIU, 2007; PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

O presente estudo identificou que há potencial para o desenvolvimento de metodologias úteis de estimativa de biomassa de lenha em áreas de vegetação de caatinga com o uso de imagens de satélites. O aumento na precisão da estimativa pode ser obtido com algumas estratégias. Em primeiro lugar sugerem-se estudos adicionais que utilizem uma maior população amostral, para que possam ser desenvolvidas equações mais robustas e, preferivelmente, com menor erro de estimativa. Outra opção é o uso de outros índices de vegetação para o desenvolvimento de modelos de regressão estatística com menores graus de incerteza, como por exemplo, o índice de vegetação ajustado para o solo (IVAS) (HUETE, 1988), que minimiza os efeitos do solo no resultado final do índice, ou ainda o índice de vegetação resistente à atmosfera (IVRA) (KAUFMAN; TANRE, 1992) que pode reduzir a dependência do IVDN às condições atmosféricas. Além disso, podem ser desenvolvidos estudos de estimativas de biomassa utilizando imagens de satélites com maior resolução espacial, como por exemplo, imagens do sensor IKONOS que tem resolução de 1 metro, e apesar de não serem distribuídas gratuitamente como o LANDSAT-TM, podem ser utilizadas para aumentar o grau de precisão.

O desenvolvimento e aprimoramento desses modelos podem ser de grande importância na estimativa da biomassa para áreas de caatinga, pois permite a modelagem da distribuição espacial dessa biomassa em áreas de interesse, como por exemplo, estudos de viabilidade de manejo florestal sustentável, constituindo um suporte para estimação de produtividade primária líquida de forma rápida e com custos relativamente baixos.

CONCLUSÕES

Os valores de IVDN relacionados à vegetação de caatinga apresentaram correlação positiva e significativa com os valores de biomassa lenhosa estimados pelas equações alométricas.

A equação de regressão ajustada a partir de medição indireta da biomassa, com equações alométricas e índice de vegetação pela diferença normalizada (IVDN), possibilitou a realização de estimativas de biomassa lenhosa em áreas de caatinga por sensoriamento remoto, com um erro de 31% na área do presente estudo.

São necessários estudos adicionais que visem o aumento na precisão da estimativas, que pode ser obtido com o aumento do número de pon-

tos amostrais, o uso de imagens de satélites com maior resolução espacial e/ou o uso de outros índices de vegetação como o IVAS e o IVRA.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Facepe (APQ 0077-5.01/09) para custeio das atividades de campo e também ao CNPq pela concessão de bolsas de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G., TASUMI, M.; TREZZA, R. **Surface Energy Balance Algorithms for Land: advanced training and users manual**. version 1.0, Idaho: University of Idaho, 2002. 98 p.

ALVES JUNIOR, F. T. **Biomassa e volumetria de uma área de caatinga**. 2010. 123 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, 2010.

AMORIM, I. L.; SAMPAIO, E. V. S. B.; ARAUJO, E. L. Flora e estrutura da vegetação arbustivo-arbórea de uma área de caatinga do Seridó, RN, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, São Paulo, v. 19, n. 3, p. 615-623. 2005.

ARLOT, S.; CELISSE, A. A survey of cross-validation procedures for model selection. **Statistics Surveys**, v. 4, p. 40-79, 2010.

BERGMEIR, C.; BENÍTEZ, J. M. On the use of cross-validation for time series predictor evaluation. **Information Sciences**, v. 191, p. 192-213, 2012.

BRANDÃO, Z. N.; BEZERRA, M. V. C. B.; SILVA, B. B. Uso do NDVI para determinação da biomassa na chapada do Araripe. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8, 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 75-81.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Disponível em: <<http://www.inpe.br>>. Acesso em: 01 jul. 2012.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; BARSÍ, J. A. Revised Landsat 5 thematic mapper radiometric calibration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 4, n. 3, p. 490-494, 2007.

COSTA, T. C. E. C.; ACCIOLY, L. J. O.; OLIVEIRA, M. A. J.; BURGOS, N.; SILVA, F. H. B. Phytomass mapping of the Seridó Caatinga vegetation by the plant area and the normalized difference vegetation indices. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 4, p. 707-715, 2002.

COSTA, T. C. C.; OLIVEIRA, M. A. J.; ACCIOLY, L. J. O.; SILVA, F. H. B. B. Análise da degradação da caatinga no núcleo de desertificação do Seridó (RN/PB). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 961-974, 2009.

FERRAZ, J. S. F. **Análise da vegetação de caatinga arbustivo-arbórea em Floresta, PE, como subsídio ao manejo florestal**. 2011. 131 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, 2011.

FRANCISCO, P. R. M.; CHAVES, I. B.; LIMA, E. R. V.; BANDEIRA, M. M.; SILVA, B. B. Mapeamento da Caatinga com uso de geotecnologia e análise da umidade antecedente em bacia hidrográfica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 5, n. 3, p. 676-693, 2012.

GARIGLIO, M. A.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CESTARO, L. A.; KAGEYAMA, P. Y. **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da caatinga**. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, 2010. 367 p.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 25, p. 295-309, 1988.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2. ed. São Paulo: Editora Parêntese, 2011. 672 p.

KAUFMAN, Y. J.; TANRE, D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, p. 261-270, 1992.

KUNTSCHIK, G. **Estimativa de biomassa vegetal lenhosa em cerrado por meio de sensoriamento remoto óptico e de radar**. 2004. 154 p. Tese (Doutorado em Ecologia) – Instituto de Biociências. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. São Paulo: Editora Uniderp, 2007. 908 p.

- MAIA, G. N. **Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades**. São Paulo: Leitura & Arte, 2004. 413 p.
- MARKHAM, B. L.; BARKER, J. L. Thematic mapper bandpass solar exoatmospherical irradiances. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 8, n. 3, p. 517-523, 1987.
- PEREIRA, I. M.; ANDRADE, L. A.; SAMPAIO, E. V. S. B., BARBOSA, M. R. V. Use-history effects on structure and flora of caatinga. **Biotropica**, Lawrence, v. 35, n. 2, p. 154-165, 2003.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos: Editora PA, 2007. 144 p.
- QI, J.; CABOT, E.; MORAN, M. S.; DEDIEU, G. Biophysical parameter estimations using multidirectional spectral measurements. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 54, n. 1, p. 71-83, 1995.
- RODAL, M. J. N.; MARTINS, F. R.; SAMPAIO, E. V. S. B. Levantamento quantitativo das plantas lenhosas em trechos de vegetação de caatinga em Pernambuco. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 21, n. 3, p. 192-205, 2008.
- SALAJANU, D.; JACOBS, D. M. Using forest inventory plot data and satellite imagery from MODIS and Landsat-TM to model spatial distribution patterns of honeysuckle and privet. In: CONFERENCE OF AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY REMOTE SENSING, 2009, Baltimore. **Proceedings...** Bethesda, 2009.
- SAMPAIO, E. V. S. B. Uso das plantas da caatinga. **Vegetação & Flora da Caatinga**; Recife, p. 49-90, 2002.
- SAMPAIO, E. V. D. S. B.; FREITAS, A. D. S. Produção de biomassa na vegetação nativa do semi-árido nordestino. In: MENEZES, R. S. C.; SAMPAIO, E. V. D. S. B.; SALCEDO, I. H. (Ed.). **Fertilidade do solo e produção de biomassa no semi-árido**. Recife: UFPE, 2008. p. 11-25.
- SAMPAIO, E. V. S. B.; SILVA, G. C. Biomass equations for Brazilian semiarid caatinga plants. **Acta Botanica Brasilica**, São Paulo, v. 19, n. 4, p. 935-943. 2005.
- SILVA, G. C.; SAMPAIO, E. V. S. B. Biomassas de partes aéreas em plantas da caatinga. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 567-575, 2008.
- VIANA, H.; LOPES, D.; ARANHA, J. Predição de biomassa arbustiva lenhosa empregando dados do inventário e o índice de diferença normalizada extraído em imagens landsat5 TM. **Millenium**, n. 37, nov. 2009.

Recebido em 05/07/2013
Aceito para publicação em 22/04/2014