

The text that follows is a TRANSLATION  
O texto que segue é uma TRADUÇÃO

## **Distribuição espacial da biomassa florestal em Roraima, norte da Amazônia brasileira**

Please cite the original article:  
Favor citar o trabalho original:

**Barni, P.E.; A.O. Manzi; T.M.  
Condé; R.I. Barbosa & P.M.  
Fearnside. 2016. Spatial  
distribution of forest biomass in  
Brazil's state of Roraima,  
northern Amazonia. *Forest  
Ecology and Management* 377:  
170–181.  
doi:10.1016/j.foreco.2016.07.010  
[open access]**

Disponível em: <http://philip.inpa.gov.br>

## *Distribuição espacial da biomassa florestal em Roraima, norte da Amazônia brasileira*

### *RESUMO*

Biomassa florestal é uma variável importante para o cálculo do estoque de carbono e da emissão de gases do efeito estufa por desmatamento e incêndios florestais na Amazônia brasileira. O entendimento de sua distribuição espacial tem provocado controvérsias devido a divergências sobre a aplicação de diferentes bases de cálculos. O aproveitamento de redes de inventários florestais padronizados é uma alternativa para este problema. O objetivo deste estudo de caso foi modelar a distribuição espacial e estimar o estoque total original da biomassa florestal do Estado de Roraima aproveitando dados de inventários florestais georreferenciados para a região. O volume comercial dos inventários foi expandido para biomassa total. Técnicas de krigagem foram utilizadas para modelar a espacialização dos estoques de biomassa e gerar um mapa de referência. Todos os resultados foram associados aos grupos fitofisionômicos, regiões climáticas e uso do solo (áreas protegidas e agrosilvopastoris). O estoque original de biomassa florestal do estado de Roraima foi estimado em  $6,32 \times 10^9$  Mg. Biomassa em áreas com menor período de estiagem foi maior em relação às florestas das regiões com maior período seco. As áreas protegidas, independente do grupo fitofisionômico, possuem maior biomassa em relação às áreas florestais atualmente sob uso agrosilvopastoril. As áreas protegidas suportam 65,8% do estoque de biomassa florestal de Roraima, indicando que podem ter um importante papel em projetos do tipo REDD para conservação do carbono florestal. A espacialização dos estoques de biomassa em uma escala mais refinada são necessárias para reduzir incertezas regionais sobre o caráter mitigador dos reservatórios de carbono na Amazônia.

**Palavras chave** – estoque de carbono, geoestatística, mapa de referência, zonas fitoclimáticas.

### **Spatial distribution of forest biomass in Brazil's state of Roraima, northern Amazonia**

#### *ABSTRACT*

Forest biomass is an important variable for the calculation of carbon stocks and greenhouse gas emissions from deforestation and forest fires in the Brazilian Amazon. Its spatial distribution has caused controversy due to disagreements over the application of different calculation methodologies. The use of standardized networks of forest surveys is an alternative to solve this problem. The objective of this case study was to model the spatial distribution and estimate the original total stock of forest biomass in the state of Roraima, taking advantage of data from georeferenced forest surveys in the region. The commercial volume from surveys was expanded to total biomass. Kriging techniques were used to model the spatial distribution of biomass stocks and generate a benchmark map. All results were associated with phytophysiognomic groups, climatic regions and land uses (protected areas; agricultural use). The original stock of forest biomass in the state of Roraima was estimated at  $6.32 \times 10^9$  Mg. Forest biomass in areas with shorter dry seasons was higher as compared to forests in regions with longer dry periods. Protected areas, independent of phytophysiognomic group, have higher biomass compared to the areas currently under agricultural use.

Protected areas support 65.8% of Roraima's stock of forest biomass, indicating an important role in REDD projects for conservation of forest carbon. The spatial distribution of biomass stocks in a more refined scale are needed to reduce uncertainties about the regional character of mitigating carbon reservoirs in the Amazon.

**Keywords** – carbon stock, geostatistics, benchmark map, phytoclimatic zones.

## INTRODUÇÃO

A biomassa florestal afeta o cálculo dos estoques de carbono e das emissões de gases do efeito estufa (GEE), sendo um dos pontos de maior debate na Amazônia brasileira (Fearnside 1997a, 2000; Chave *et al.* 2004; Houghton 2010; Chave *et al.* 2014). Juntamente com o desmatamento, a biomassa determina o potencial de emissão de carbono que pode ser liberado para a atmosfera quando florestas tropicais são cortadas (Houghton *et al.* 2009). No contexto amazônico, o corte e a queima da biomassa florestal estão vinculados ao aumento das áreas de roças e pastagens. O meio mais rápido e barato para “limpar” essa área desmatada é o fogo. Modelos acurados de distribuição da biomassa florestal podem reduzir as incertezas nos estoques de carbono, possibilitando melhor entendimento dos processos ambientais e humanos que determinam as emissões de GEE (Harris *et al.* 2012), além de subsidiar estudos de implementação de projetos de Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação – REDD (e.g., Soares-Filho *et al.* 2010; Nepstad *et al.* 2011; Saatchi *et al.* 2011)..

Na Amazônia, a primeira tentativa sistematizada para se obter estimativas amplas da biomassa florestal e mais precisas foi derivada dos estudos de Brown e Lugo (1992, 1994) envolvendo diferentes regiões do globo terrestre. Esses autores desenvolveram fatores de expansão e ajustes a partir de equações de volume comercial derivados de inventários florestais realizados pela Organização para a Alimentação e a Agricultura (FAO), da Organização das Nações Unidas (ONU), na década de 1950. No caso específico da Amazônia, novos ajustes foram implementados por Fearnside (1992) com a correção ou adição de outros fatores (e.g., madeira morta, cipós, plantas de sub-bosque) que haviam sido omitidos inicialmente por Brown & Lugo (1992). Os ajustes derivados de Fearnside (1992) foram significativamente melhorados por Nogueira *et al.* (2005; 2007; 2008) e aplicando aos valores de volume comercial (i.e. volume do tronco  $\geq$

100 cm de Circunferência Acima do Peito - CAP) obtidos pelos inventários Projeto RADAMBRASIL (Brasil Projeto RADAMBRASIL 1973-1983) realizados em toda a Amazônia (Fearnside 1994, 1996, 1997a). Nos inventários do RADAMBRASIL o valor de 100 cm de CAP, foi o principal critério de inclusão das árvores. Desta forma, os valores de volume comercial estimado pelo Projeto RADAMBRASIL para toda a Amazônia (Brasil IBGE 2013), puderam ser expandidos para biomassa total (viva+morta; abaixo e acima do solo) sendo aproveitados em modelos de distribuição espacial regional ou extrapolados por fitofisionomias dentro de cada estado (Fearnside 2000, Sales *et al.* 2007, Brasil MCT 2010, Nogueira *et al.* 2015).

Apesar dos avanços na redução das incertezas, a distribuição espacial da biomassa florestal da Amazônia pode ser mais bem estimada quando associada a mapas que contemplem, em termos de composição e de biomassa, a manifestação de fatores ambientais (e.g., fitofisionomias, clima, solo) e de uso da terra (protegido ou agrosilvopastoril). Essas informações auxiliares, quando apoiada em uma base mínima de inventários florestais modelados sob a ótica de técnicas de sensoriamento remoto, trazem enormes vantagens para a construção de mapas de referência (Saatchi *et al.*, 2011). Isso é devido à introdução de características complementares que auxiliam nas estimativas de biomassa média por unidade de área ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), delimitando a distribuição espacial dos estoques de biomassa/carbono perturbados por desmatamento e que influem nos cálculos das emissões de GEE. Essa alternativa, mesmo que limitada devido a grandes áreas na Amazônia sem qualquer medida direta de biomassa, permite a construção de mapas espacialmente refinados dispostos em uma grade georeferenciada que pode ser reproduzida sob diferentes condicionantes temporais (Nogueira *et al.* 2008, 2015; Saatchi *et al.* 2012). Isso ocorre porque as características ambientais e antropogênicas específicas de cada microrregião individual (e.g., no nível dos Estados) podem ser analisadas separadamente sob uma mesma base de cálculo ao invés de serem produtos de extrapolações realizadas para uma escala menos detalhada (e.g., Saatchi *et al.* 2007).

Neste contexto e utilizando o Estado de Roraima como estudo de caso, o objetivo geral deste estudo foi modelar a distribuição espacial da biomassa florestal e avaliar o estoque original de biomassa (viva + morta, acima e abaixo do solo) desta região da Amazônia; que possui zonas ambientais e de uso do solo bem distintas de outros estados amazônicos (Barni *et al.* 2015). A análise da distribuição da biomassa florestal

nestas zonas possibilita uma estimativa mais realística dos estoques originais de biomassa, por fitofisionomias florestais, situadas em categorias de proteção e tipos climáticos distintos, dando a base para estimativas mais robustas dos estoques de carbono florestal e das emissões de GEE por desmatamento e em Roraima. Para tanto, nossos objetivos específicos foram (i) estimar a biomassa total a partir da expansão do volume comercial de inventários florestais realizados em Roraima e seu entorno; (ii) gerar um mapa de referência a partir da modelagem espacial da biomassa florestal utilizando técnicas de geostatística; (iii) determinar o conteúdo de biomassa ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em cada fitofisionomia florestal por zonas fitoclimáticas de Roraima (Barni *et al.* 2015) e; (iv) determinar o estoque de biomassa original em áreas com proteção (TI e UC) e sem proteção legal (agrosilvopastoril – AU) nas zonas fitoclimáticas.

## *MATERIAL E MÉTODOS*

### *Área de Estudo*

O Estado de Roraima possui uma área de  $224,3 \times 10^3 \text{ km}^2$  e fica situado no extremo norte da Amazônia brasileira, faz divisa com a Venezuela e a Guiana (Figura 1). O clima pode ser, dividido em três grandes tipos (Köppen): “*Af*” (clima úmido de floresta) sob domínio de vegetação oligotrófica (campina/campinarana) e parte das florestas ombrófilas do sudoeste e extremo noroeste do estado; “*Am*” (clima de monção) abrangendo outra parte das florestas ombrófilas, uma seção menor de floresta estacional semidecidual que inclui toda a faixa do sudeste e centro-oeste, além de grande parte do norte do estado e; “*Aw*” (clima de savana) sob domínio das florestas de contato (ecótonos) e a maior seção das florestas estacionais, além de todas as áreas de savanas de baixa e alta altitude que ocupam o nordeste do estado (Barbosa 1997; Barbosa e Campos 2011).

As precipitações anuais em Roraima sofrem amplas variações, decrescendo no sentido sul/sudoeste para nordeste. Nos domínios das florestas úmidas de baixo relevo do sul/sudoeste, as precipitações possuem uma amplitude de  $2000\text{-}2300 \text{ mm ano}^{-1}$ , atravessando uma faixa de transição entre floresta de altitude-floresta-savana, com precipitação entre  $1700\text{-}2000 \text{ mm ano}^{-1}$ . Por fim, alcançam as formações de savana no nordeste do estado com precipitação de  $1100\text{-}1400 \text{ mm ano}^{-1}$  (Barbosa 1997). O relevo apresenta feições

morfológicas de planaltos dissecados circundados por pediplanos intramontanos e relevos residuais individualizados (Schaefer e Darlymple 1995; Ab'Saber 1997).

Através de critérios geomorfológicos, climáticos e geográficos, todo o estado de Roraima pode ser dividido em duas grandes zonas fitoclimáticas (Barni et al. 2015) bem definidas associadas a grandes eixos de desmatamento (AU), e áreas de proteção legal (TI) e (UC): Zona Com Influência da Savana (ZCIS) e Zona Sem Influência da Savana (ZSIS). Ambas são afetadas por desmatamentos, fogos florestais e extração seletiva de madeira, com a ZCIS situada no norte/nordeste de Roraima (6-7 meses secos), enquanto a ZSIS fica localizada no sul/sudeste e sudoeste/noroeste do estado com menor período seco (1-5 meses).



**Figura 1** - Área de estudo. A linha contínua sólida no centro da figura divide a área de estudo em duas zonas fitoclimáticas (Barni et al. 2015): ZCIS – zona com influencia da savana e ZSIS – zona sem influencia da savana. SRTM: *Shuttle Radar Topography Mission*.

## *Limites originais das fitofisionomias modeladas*

As 17 fitofisionomias florestais de Roraima foram derivadas do mapa de vegetação do Programa de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira – PROBIO, na escala de 1:250.000 (Brasil PROBIO 2013).

Para recuperar a cobertura original da formação florestal no Estado foram realizadas operações de álgebras de mapas em ambiente de SIG: (1) foram extraídas todas as áreas antropizadas (desmatamento, pastagens e vegetação secundária) do mapa do PROBIO e substituídas pelas fitofisionomias (florestal ou não florestal) de maior proximidade e dominância da área afetada, presumindo a vegetação original de Roraima, sem alteração; (2) reunião das 17 fitofisionomias em quatro grandes grupos florestais (Tabela 1): (i) Florestas Ombrófilas - todas as classes de floresta ombrófila Densa e Aberta; (ii) Ecótonos - fitofisionomias de contato; (iii) Estacional - florestas estacionais decíduais e semidecíduais; (iv) Campinaranas - fitofisionomias pertencentes aos sistemas oligotróficos do médio e baixo rio Branco. Foi acrescentada também a matriz de savana localizada no nordeste do estado.

**Tabela 1** - Fitofisionomias florestais do estado de Roraima distribuídas por zonas fitoclimáticas. ZCIS = zona com influência da savana e ZSIS = zona sem influência da savana.

Group	Code(1)	Phytophysiology	ZIS (km <sup>2</sup> )(2)	ZOS (km <sup>2</sup> )(3)	Total area (km <sup>2</sup> )
Ombrophilous forest	Ab	Open-canopy rainforest on nonflooding lowlands	-	273.8	273.8
		As	Open-canopy rainforest, submontane	1,762.9	4,638.1
	Da	Dense-canopy rainforest on river floodplain	24.5	905.1	929.6
		Db	Dense-canopy rainforest on nonflooding lowlands	-	10,182.9

	Dm	Dense-canopy rainforest, montane	2,877.6	22,804.1	25,681.7
	Ds	Dense-canopy rainforest, submontane	4,811.5	52,871.5	57,683.0
Group total			9,476.5	91,675.5	101,152.0
<hr/>					
Ecotone ("Contact")	LO	Oligotrophic vegetation / ombrophilous forest	19,669.4	422.6	20,092.0
	ON	Ombrophilous forest / seasonal forest	26,354.1	8.9	26,363.0
	SN	Savanna / seasonal forest	645.0	-	645.0
	SO	Savanna / ombrophilous forest	2,174.0	-	2,174.0
	TN	Steppe-like savanna / seasonal forest	2,708.0	-	2,708.0
Group total			51,550.5	431.5	51,982.0
<hr/>					
Seasonal vegetation	Fa	Aluvial semideciduous forest	471.2	105.8	577.0
	Fs	Sub-montane semideciduous forest	2,878.0	-	2,878.0
	Sa	Open woodland savanna	3,937.1	1.9	3,939.0
	Td	Forested steppe-like savanna	3,478.0		3,478.0
Group total			10,764.3	107.7	10,872.0
<hr/>					
Campinarana	La	Open woody oligotrophic vegetation of swampy and sandy areas	136.2	3,367.8	3,504.0
	Ld	Dense woody oligotrophic vegetation	322.5	16,666.5	16,989.0

		of swampy and sandy areas		
Group total		458.7	20,034.3	20,493.0
Forest total (4)	17 physiognomies	72,250.0	112,249.0	184,499.0
Savanna	–	26,694.0	–	26,694.0
Other non-forest (5)	Lg Grassy-woody	27.6	8,689.0	8,716.6
	vegetation of swampy and sandy areas (campinarana)			
	Lb Bushy oligotrophic	93.4	2,390.6	2,484.0
	oligotrophic vegetation of swampy and sandy areas (campinarana)			
Water	–	529.6	1,376.3	1,905.9
Grand total	–	99,594.6	124,704.9	224,299.5

(1) Vegetation codes (Brazil, IBGE, 2012).

(2) ZIS = zone with influence of savanna.

(3) ZOS = zone without influence of the savanna.

(4) The definition of "forest" used in this study is that of PROBIO. Here Sa, Td and campinarana (La and Ld) are considered to be "forest," as in both the PROBIO vegetation map (Brazil, PROBIO, 2013) and Brazil's national inventory of greenhouse gas emissions (Brazil, MCT, 2010, p. 228), which consider all vegetation types classified as "a" (wooded) or "d" (forested) to be "forest." This differs slightly from the definition of forest used in deforestation monitoring by PRODES (Brazil, INPE, 2016), which includes as "non-forest" treed-shrubby savannas (Sp), the part of treed savannas (Sa) with less than 10% tree cover (although, in practice, the PRODES data appear to class all Sa as forest), the wooded-grassy savannas (Sg) and some of the campinaranas (in northern Amazonia the "non-forest" campinaranas are represented only by Lg and Lb). There is some overlap of forest and non-forest under the PRODES definition (particularly in campinaranas), but we do not believe that this compromises the result because the formations listed by PRODES represent classic non-forest natural ecosystems and not their forested

forms ("a" and "d"). The La and Ld campinaranas are considered to be “forest” by both PROBIO and PRODES.

- (5) These physiognomies (Lg and Lb) are in the campinarana group but are not considered to be “forests.” Their distribution areas (along the Rio Branco and its tributaries in the south-central portion of Roraima) are often flooded.

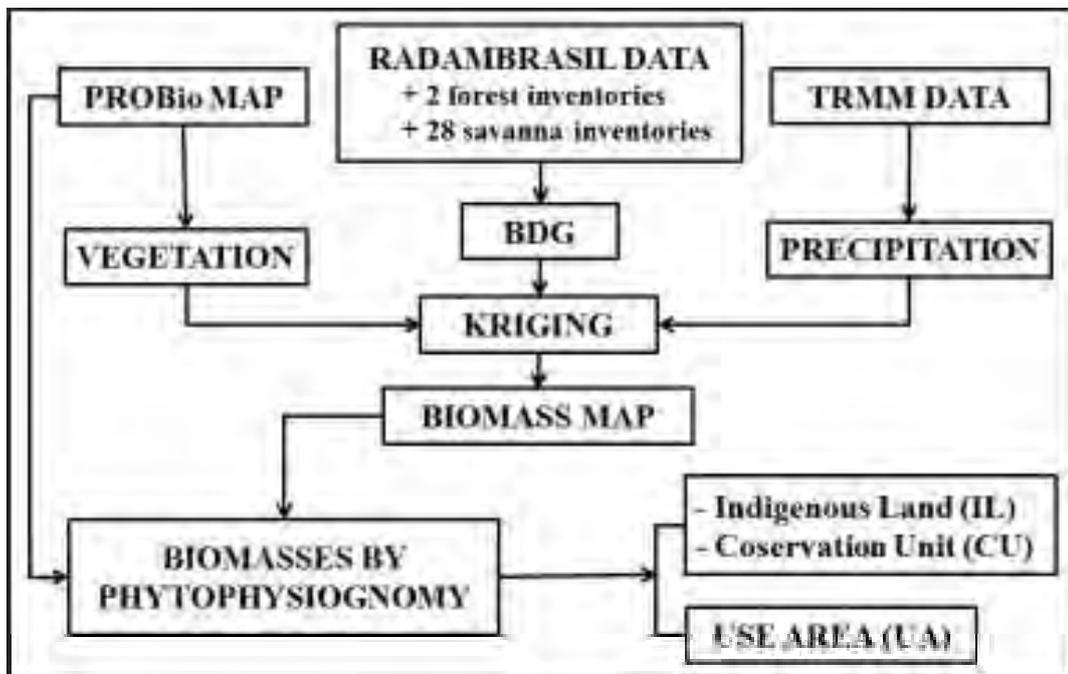
### *Estimativa da biomassa original*

A biomassa original total (viva+ morta, acima e abaixo do solo) por unidade de área ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) foi estimada a partir dos inventários florestais (Brasil Projeto RADAMBRASIL 1973-1983) realizados em Roraima e região de entorno (Brasil IBGE 2013). Desses inventários foram utilizadas informações de volume comercial de 296 parcelas (1 ha cada), sendo (119) em Roraima e uma faixa de 100 km limítrofe ao Estado (entorno), englobando o Pará (5) e Amazonas (172) (Brasil IBGE 2013) para amenizar o efeito de borda (Sales *et al.* 2007). A esse banco de dados foram adicionados dois inventários florestais realizados recentemente em Roraima sob (a) floresta ombrófila densa (Condé *et al.* 2013) e (b) em sistema de floresta estacional (Nascimento *et al.* 2014), totalizando 298 pontos amostrais (Tabela anexo 1a).

Após correções e ajustes no banco de dados do IBGE, foram aplicados os Fatores de Expansão de Volume ( $\text{FEV} = 1,537$  para floresta densa e  $1,506$  para não-densa) e de Expansão de Biomassa (FEB) para a conversão de volume comercial ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ) para biomassa total ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) de acordo com Brown e Lugo (1992): o Volume Expandido (VE) foi multiplicado pelo  $\text{FEB} = 1,635$  se  $\text{VE} > 190$  e  $\text{Exp}(3,213 - (0,506 * \text{Ln}(\text{VE})))$  se  $\text{VE} < 190$ .

Ajustes para inclusão ou correção de outros componentes da floresta (biomassa morta, sub-bosque, raiz) e também relacionados à densidade da madeira (Fearnside 1992, 1997a e Nogueira *et al.* 2005, 2006, 2007) foram aplicados diretamente a cada indivíduo arbóreo inventariado pelo projeto RADAMBRASIL em planilha eletrônica no nível de espécie, gênero ou família) para sua conversão em biomassa total. Esses fatores foram aplicados para (i) expansão do volume comercial em biomassa por indivíduo arbóreo, e (ii) adicionar a biomassa dos outros componentes da floresta para obter biomassa total ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) para todos os pontos do BDG.

Aos 298 pontos de volume comercial transformados em biomassa total ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) foram acrescentados ainda 28 pontos amostrais referentes a biomassa total ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) de savana (Barbosa 2001; Barbosa e Fearnside 2005). Totalizando, por fim, 326 pontos amostrais (Tabela anexo 1a). Este conjunto de dados georeferenciados foi denominado BDG (Figura 2).



**Figure 2.** Flowchart for estimation of forest biomass in Roraima. PRObio = Program for Conservation and Sustainable Use of Brazilian Biological Diversity. BDG = georeferenced database. TRMM = Tropical Rainfall Measuring Mission.

### *Validação e melhor modelo de interpolação*

O BDG foi dividido, aleatoriamente, em duas subamostras: (i) um conjunto contendo 33 pontos amostrais (~10%) e; (ii) outro contendo 293 pontos amostrais (~90%). O primeiro conjunto ( $n_1=33$ ) foi reservado para a validação e determinação do melhor modelo de interpolação após a obtenção dos mapas de biomassa. Para estimar cada ponto não amostrado na execução das três técnicas de krigagem foram utilizados cinco pontos vizinhos mais próximos ao local a ser estimado para cada quadrante. Este parâmetro foi usado como padrão do *software* ArcGIS versão 9.3.

## *Crêterios de validação*

Os critérios para a validação (acurácia) e escolha do melhor modelo foram: (i) o menor Erro Quadrado Médio (EQM), (ii) o Percentual de Eficiência (%EF) e (iii) o coeficiente de determinação ( $R^2$ ). O  $R^2$  ajustado serviu também para avaliar a acurácia do modelo, em termos percentuais. Assim:  $\text{Erro}(\mathcal{E}) = (1 - R^2) * 100$  e  $\text{Accuracy} = R^2 * 100$ . Esses parâmetros foram calculados a partir da sub amostra de 33 pontos confrontando com os valores estimados pelos três métodos nas mesmas coordenadas (Bello-Pineda e Hern ndes-Stefanoni 2007; Gardiman Junior *et al.* 2012). Como medida suplementar foi aplicado teste de m dias (teste t) entre os valores preditos pelos três modelos e os valores da amostra para comparar os resultados e verificar se diferenciavam dos valores da média amostral.

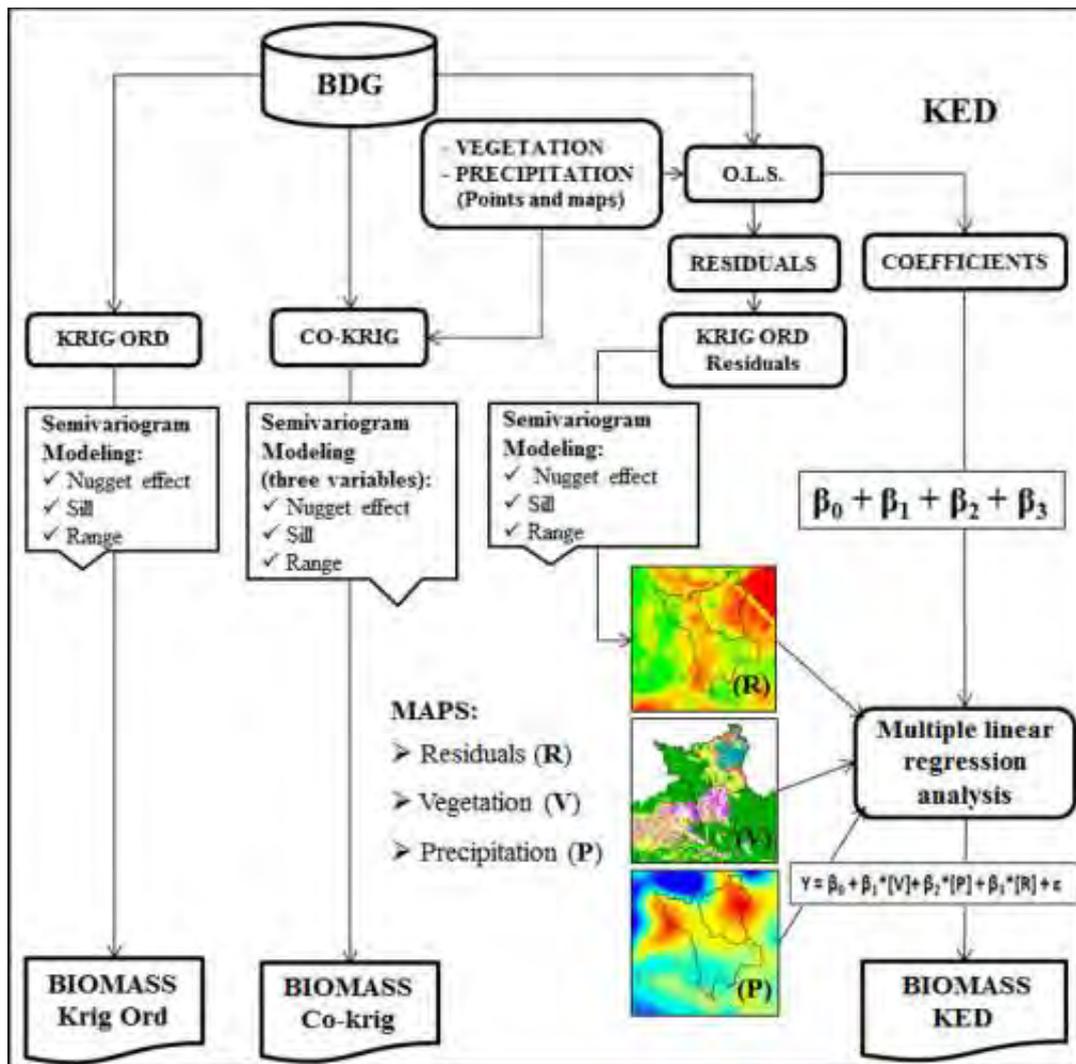
## *Modelagem e espacialização da biomassa*

Para espacialização da biomassa florestal escolheu-se o melhor modelo entre três técnicas de krigagem (Figura 3): (i) Krigagem ordinária (Krig-Ord), (ii) Co-Krigagem (Co-Krig) e (iii) Krigagem com Deriva Externa (KDE). A krigagem consiste na estimativa de valores de uma variável espacial em locais não amostrados por ela a partir da interpolação por m dias móveis de pontos amostrais. Para isto é presumido que os valores da variável espacial sejam conhecidos na vizinhança do local não amostrado e que será estimado. Para a execução da krigagem   necessário primeiro modelar o semivariograma. A modelagem do *Semivariograma* associa a variabilidade da estimativa entre dois pontos amostrais baseados na distância que os separam. A influencia será tanto maior ou menor em função de quanto menor ou maior for a distância entre os pontos. O semivariograma utiliza como parâmetros o (i) *Efeito pepita*, que avalia a estacionaridade dos dados ou a não-mudança dos seus valores em função da distância de separação entre pontos vizinhos. Em alguns casos o efeito pepita pode ser atribuído a erros de medição ou ao fato de que os dados não foram coletados a intervalos suficientemente próximos; (ii) *sill* ou patamar, que indica o ponto de estabilização da curva do semivariograma. Ou seja, mostra a variabilidade máxima entre pares de valores (eixo y) - a partir do patamar não são observadas variações nos dados; (iii) *range* ou alcance, mede a distância (em unidades do mapa: eixo x) em que são observadas essas variações nos dados. O range indica a distância a partir da qual as amostras passam a não ser mais espacialmente correlacionadas e a relação entre elas passa a ser

aleatória (cf. Burrough e Mcdonell 1998; Landim e Sturaro 2002). Um modelo conceitual de cálculo do semivariograma é exemplificado na equação (1).

$$\text{Semivariogram } (\gamma) = \text{Nugget} + (\text{Sill} - \text{Nugget}) * \text{Range} \quad (1)$$

A modelagem dos semivariogramas para as diferentes técnicas de krigagem utilizadas foram executadas no *software* ArcGIS, versão 9.3.



**Figure 3.** Flowchart for the application of kriging to the georeferenced database and three auxiliary variables. (V) = Vegetation map; (P) = Precipitation map; (R) = Residuals map; Krig-Ord = Ordinary Kriging; Co-krig = Co-kriging; KED = kriging with external drift. No caso da Co-krigagem foram utilizadas duas variáveis auxiliares (V e P) e na KED foram utilizadas três (V, P e R). BDG = georeferenced database.

No caso da Krig-Ord, o semivariograma foi modelado a partir de uma única variável de pontos amostrais (biomassa total) como entrada. Na sequência foi aplicada a krigagem propriamente dita obtendo-se um mapa de superfície de biomassa ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) contínua dos valores estimados a partir dos dados amostrais (Isaaks e Srivastava 1989; Bohling 2005). Na Co-Krig, além da variável principal (biomassa total), foram utilizadas duas variáveis auxiliares: (i) o mapa de vegetação (V) do PROBIO, descrito anteriormente, tendo como classes os quatro grupos florestais mais a classe savana (convertido para o formato *raster* com resolução espacial de  $1 \text{ km}^2$  por pixel e, (ii) o mapa de precipitação (P) média anual, obtido no sítio da NASA (NASA-TRMM 2013). Após krigagem ordinária este mapa também foi convertido para o formato *raster* com  $1 \text{ km}^2$  de resolução. Os dois mapas foram projetados para UTM / Zona 20 N, WGS 84. Na execução da Co-Krig as variáveis auxiliares substituem a variável principal na predição em locais não amostrados ou pobremente amostrados por ela. Nesse caso é modelado um semivariograma para a variável principal e outro para cada variável auxiliar.

Diferentemente da Krig-Ord e da Co-Krig, na KDE o mapa final de biomassa ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) foi obtido por aplicação de Regressão Linear Múltipla (RLM) tendo os mapas *raster* (grade de células) das variáveis auxiliares V, P e R (mapa de resíduos), como variáveis independentes (equação 1). Este mapa foi criado a partir de três etapas: (1) obtenção dos resíduos e os coeficientes da RLM pela aplicação do Método dos Mínimos Quadrados – MMQ entre a variável principal e as variáveis auxiliares (pontos amostrais); (2) obtenção do mapa *raster* de resíduos ( $1 \text{ km}^2$ , UTM / Zona 20 N, WGS 84) através da krigagem ordinária dos resíduos e; (3) execução da RLM (equação 2).

$$\text{KED biomass (Y)} = -163.8823 + (2.5535 \times \text{VEGETATION}) + (0.1403 \times \text{PRECIPITATION}) + (1 \times \text{RESIDUALS}) \quad (2)$$

Where: Y = dependent variable (TOTAL BIOMASS), VEGETATION = vegetation map, PRECIPITATION = precipitation map and RESIDUALS = map of residuals.

Para explicitar o conteúdo de biomassa por fitofisionomia florestal foram criados mapas binários (0, 1) de 1 km<sup>2</sup> de resolução espacial para cada fisionomia do PROBIO e da savana. Em cada mapa criado, os pixels representando o domínio ou a extensão das fitofisionomias receberam o valor 1 (um) e os demais pixels o valor 0 (zero). Todos os mapas foram criados com o mesmo número de linhas (759) e de colunas (661). Em seguida, estes mapas foram cruzados, individualmente, com o Mapa de Biomassa Florestal – MBF (Mg ha<sup>-1</sup>) em operação de álgebra de mapas (Equação 3). Assim:

$$\text{BIOM.TIPO}_{(i)} = \text{Map.Tipo}_{(i)} \times \text{MBF} \quad (3)$$

Onde, BIOM.TIPO<sub>(i)</sub> são os mapas de biomassa por fitofisionomias florestal; Map.Tipo<sub>(i)</sub> são os mapas de cada classe gerada a partir do mapa do PROBIO e, i=1 a 18 (incluindo a classe savana).

Os Mapas de Biomassa por Grupo Florestal (MBGF) foram criados semelhantemente aos mapas de biomassa por tipo florestal (BIOM.TIPO) descrito acima (Equação 2 e i=1 a 4).

#### *Biomassa em áreas com e sem proteção legal*

Para verificar a biomassa em áreas protegidas, foram aplicados cruzamentos entre os mapas binários de TI e de UC utilizando a base do ISA (2012), com os mapas de biomassa gerados por grupo florestal. A biomassa da AU (agrosilvipastoril) foram determinadas a partir das áreas de exclusão das TI, UC e áreas de savana e; também foram cruzadas com os mapas de biomassa por grupo florestal. Este protocolo foi aplicado às duas zonas fitoclimáticas de Roraima. Para a avaliação e comparação da biomassa entre os tipo de uso (IL, CU and AU) foi aplicada a média ponderada, considerando a área de cobertura de cada grupo florestal dentro de cada tipo de uso.

#### *Análise estatística*

Testes de normalidade foram aplicados a todos os conjuntos de dados obtidos pelos cruzamentos de informações entre zonas climáticas, grupos fitofisionômicos e categorias de uso da terra: TI, UC e AU. Para determinar se as zonas climáticas determinam a distribuição espacial da biomassa florestal em Roraima

foram aplicados testes não-paramétricos (Mann-Whitney;  $\alpha=0,05$ ) entre os valores de biomassa de cada grupo florestal presente nas duas zonas. Para determinar se as médias de biomassa por unidade de área ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) dos grupos florestais se diferenciavam entre si dentro das TI, UC e AU, situadas em zonas fitoclimáticas distintas, foram aplicados testes par a par, não paramétricos (Kruskal Wallis, Mann-Whitney;  $\alpha=0,05$ ) entre 100 valores de biomassa escolhidos aleatoriamente de cada grupo florestal dentro das TI, UC e AU presente nas duas zonas fitoclimáticas. Utilizou-se o *software* livre R (R Development Core Team 2015) para os testes.

## *RESULTADOS*

O modelo KDE foi o escolhido como o de melhor desempenho para representar a biomassa total do estado de Roraima (Figura 4). Na modelagem para a krigagem dos resíduos o semivariograma não apresentou anisotropia (tendência espacial para uma determinada direção) sendo considerado, portanto, isotrópico para a variabilidade dos resíduos da biomassa total. Uma função do variograma composto pelo efeito pepita e de estrutura exponencial (melhor ajuste aos dados) foi usada para ajustar a amostra dos resíduos e avaliar sua variabilidade em função da distância entre os pontos amostrais. O semivariograma final ajustado apresentou alcance total de  $\sim 120$  km e um relativo efeito pepita estimado em  $\sim 20\%$  em relação ao patamar (8509,1), implicando correlação espacial entre os pontos amostrais. No entanto a correlação espacial dos resíduos decresceu rapidamente entre  $\sim 73$  km e 120 km, limite máximo da variação.

**Tabela 2** - Resultado da validação cruzada (acuracidade) e escolha do melhor modelo de interpolação para estimativa da média da biomassa florestal total no Estado de Roraima. EQM = Erro Quadrado Médio, %EF = Percentual de Eficiência,  $R^2_{adj}$  = Coeficiente de correlação ajustado.

<b>Interpolators</b>	<b>MSE</b>	<b>%EF</b>	<b><math>R^2_{adj}</math></b>	<b><i>p-value</i> <i>regression</i></b>	<b><i>p-value</i> <i>t test</i></b>	<b>Mean biomass (Mg ha<sup>-1</sup>)</b>
BDG (33 points)	-	-	-	-	-	388
Krig-Ord	77.2	45.9	0.75	<0.0000	0.826	380
Co-Krig	72.8	43.0	0.78	<0.0000	0.652	405
KED	65.7	37.9	0.81	<0.0000	0.672	373

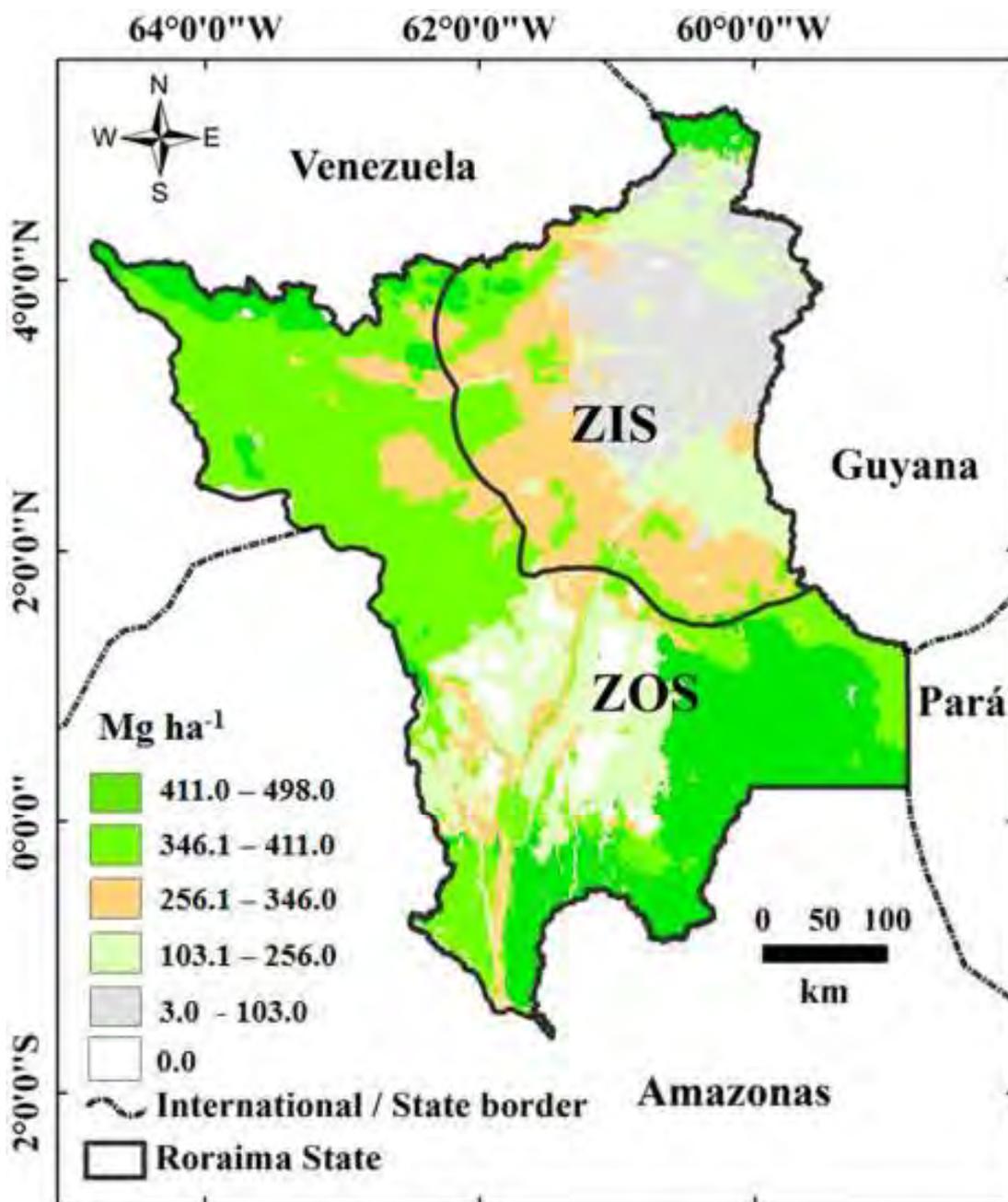


Figure 4. Reference map of the distribution of biomass (Mg ha<sup>-1</sup>) in the state of Roraima generated by kriging for external drift (KED). (0-3): areas without data; (3-103): biomass of savanna in the northeastern portion of the state and in neighboring areas in ecotones between dense and open vegetation types; (103.1-256.0) áreas de campinarana no centro-sul do estado circundando áreas sazonalmente alagadas (sem dados) e áreas de contato campinarana / floresta densa aberta / savana, no centro-leste do estado, e áreas de floresta estacional em contato com a savana / ecótono, e floresta ombrofila aberta e densa no norte e nordeste do estado; (256.1-346.0) representam a distribuição da biomassa das florestas de ecotono no sul do estado (ao longo da calha do rio Branco) e do centro-norte do estado entre áreas de floresta ombrófila aberta a oeste / norte e áreas de savana a leste; (346.1-411.0) área representando, predominantemente floresta ombrofila aberta espalhadas por grande parte do estado e; (411.0-498.0) áreas representando a floresta ombrófila densa, ocupando, predominantemente, o sul e sudeste do estado e algumas manchas no extremo norte do estado.

O estoque de biomassa total para o estado de Roraima presumindo a vegetação original (sem desmatamento, incêndios florestais e extração seletiva de madeira) a partir do modelo KDE foi estimada em  $6,32 \times 10^9$  Mg;  $4,52 \times 10^9$  Mg (71,6%, viva acima do solo),  $0,83 \times 10^9$  Mg (13,1%, morta acima do solo) e  $0,97 \times 10^9$  Mg (15,3%; abaixo do solo) (Tabela 3). A média ponderada por unidade de área, considerando apenas os ecossistemas florestais terrestres, foi de  $345 \text{ Mg ha}^{-1}$  ( $133\text{-}434 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). As florestas ombrófilas foram o grupo de maior biomassa total média ponderada ( $404 \text{ Mg ha}^{-1}$ ;  $189\text{-}488 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), enquanto o grupo das florestas estacionais foi o menor ( $182 \text{ Mg ha}^{-1}$ ;  $116\text{-}261 \text{ Mg ha}^{-1}$ ).

**Tabela 3** - Estoque de biomassa original total (viva+morta; acima e abaixo do solo) e estimativa média ponderada, por unidade de área, da biomassa florestal do estado de Roraima, por fitofisionomia e sem antropismos (desmatamento, extração seletiva e incêndios florestais).

Group (1)	Code (2)	Live above-ground ( $10^6$ Mg) (3)	Dead above-ground ( $10^6$ Mg) (3)	Live below-ground ( $10^6$ Mg) (3)	Total		Mean (Mg $\text{ha}^{-1}$ )	Range (Mg $\text{ha}^{-1}$ )
					biomass stock ( $10^6$ Mg)	%		
Ombrophilous forest	Ab	8.3	1.5	1.8	11.6	0.2	432.1	402.4-445.1
	As	179.3	33.2	38.9	251.4	4.0	395.1	303.6-437.0
	Da	25.1	4.6	5.3	35.0	0.6	404.0	323.0-440.0
	Db	301.6	54.7	64.1	420.4	6.6	419.0	308.6-450.5
	Dm	728.2	132.1	154.9	1,015.1	16.0	400.9	329.6-451.6
	Ds	1,673.1	302.4	356.4	2,331.8	36.8	404.2	291.5-445.0
<b>Group Total</b>		<b>2,915.1</b>	<b>528.9</b>	<b>621.4</b>	<b>4,065.3</b>	<b>64.3</b>	<b>404.3</b>	<b>304.3-446.7</b>
Ecotone	LO	474.7	87.9	103.1	665.7	10.5	331.3	233.3-405.3
	ON	594.9	110.1	129.2	834.2	13.2	318.8	238.2-390.6
	SN	9.6	1.8	2.1	13.4	0.2	230.2	189.3-293.6
	SO	42.3	7.8	9.2	59.3	0.9	277.3	218.6-341.6

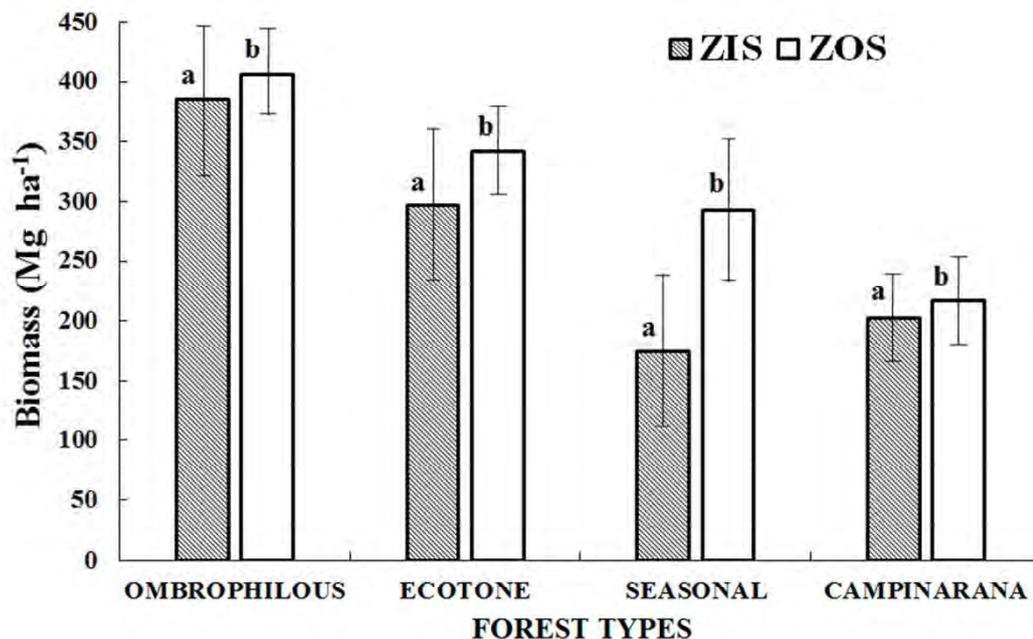
	TN	35.9	6.6	7.8	50.3	0.8	191.8	137.8-229.6
<b>Group Total</b>		<b>1,157.3</b>	<b>214.3</b>	<b>251.3</b>	<b>1,622.9</b>	<b>25.7</b>	<b>314.2</b>	<b>229.6-384.8</b>
<hr/>								
Seasonal								
vegetation	Fa	9.8	1.8	2.1	13.7	0.2	237.3	162.3-331.7
	Fs	31.3	5.8	6.8	43.9	0.7	171.4	111.5-252.5
	Sa	68.9	3.9	0.0	72.8	1.1	185.1	142.0-264.7
	Td	56.7	3.2	0.0	59.9	0.9	179.0	122.5-252.3
<b>Group Total</b>		<b>136.9</b>	<b>24.7</b>	<b>28.7</b>	<b>190.3</b>	<b>3.0</b>	<b>182.3</b>	<b>128.8-261.1</b>
<hr/>								
Campinarana	La	56.6	10.5	12.3	79.4	1.3	226.5	170.0-307.3
	Ld	259.6	48.1	56.4	364	5.7	214.2	182.5-343.8
<b>Group total</b>		<b>316.2</b>	<b>58.6</b>	<b>68.7</b>	<b>443.4</b>	<b>7.0</b>	<b>216.3</b>	<b>180.4-337.6</b>
<hr/>								
<b>Grand total</b>		<b>4,525.4</b>	<b>826.4</b>	<b>970.1</b>	<b>6,322.0</b>	<b>100</b>	<b>345.0</b>	<b>133.0-434.0</b>

(1) The mean biomass stock of savannas was estimated at  $14.7 \times 10^6$  Mg ( $5.5 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), or approximately 0.2% of the total biomass present in the state of Roraima.

(2) Vegetation codes (Brazil, IBGE, 2012).

(3) Percentuais de cálculo da biomassa por compartimento florestal como em Nogueira et al. (2008).

A biomassa média de toda a ZSIS ( $357 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) foi maior do que a observada na ZCIS ( $302 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). A biomassa total média no grupo Ombrófila na ZCIS ( $385 \pm 62$  ( $\pm 1\text{DP}$ )  $\text{Mg ha}^{-1}$ ) foi menor (Mann-Whitney:  $\alpha=0,05$ ;  $p<0,0000$ ) do que a biomassa estimada para a ZSIS ( $406 \pm 37 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), considerando os valores pixel-a-pixel estabelecidos na modelagem (Figura 5). Os demais pares de médias testados para cada grupo florestal entre as duas zonas fitoclimáticas também apresentaram distinção.

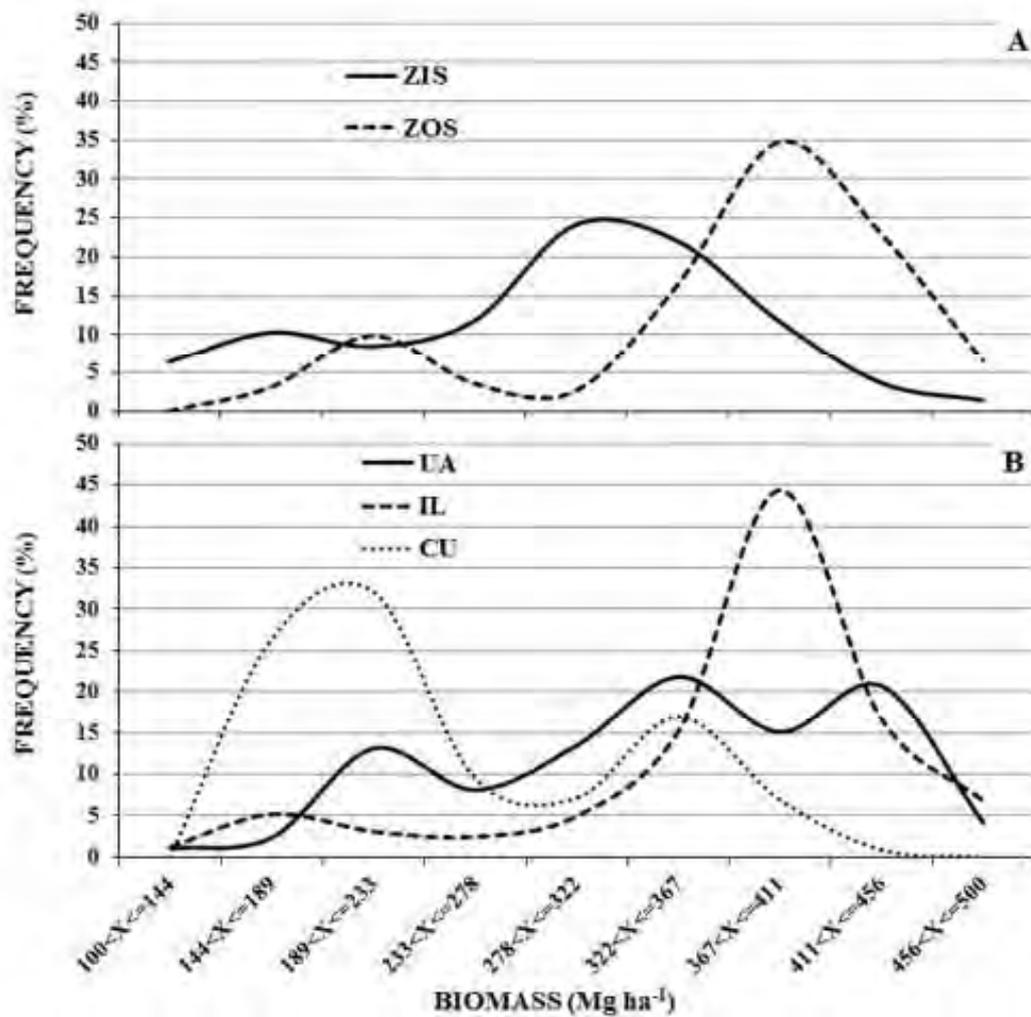


**Figura 5** - Biomassa total (viva + morta; acima e abaixo do solo) distinta por grupos florestais distribuídos por zonas climáticas em Roraima ( $\text{Mg ha}^{-1} \pm \text{DP}$ ): ZCIS – Zona Com Influencia da Savana (com preenchimento) e ZSIS – Zona Sem Influencia da Savana (sem preenchimento). Letras maiúsculas distintas representam diferenças significativas entre as médias testadas nas duas zonas (Mann-Whitney; 95%).

O estoque de biomassa total das áreas protegidas (TI e UC) em Roraima, foi estimado em  $4,16 \times 10^9$  Mg ( $348 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) (Tabela 4). O maior estoque foi observado nas Terras Indígenas (76%;  $3,16 \times 10^9$  Mg): 16,3% ( $0,507 \times 10^9$  Mg) na ZCIS e 83,7% ( $2,65 \times 10^9$  Mg) na ZSIS. A área das Terras Indígenas em Roraima é maior do que o total de todas as Unidades de Conservação. Além disso guardam as maiores coberturas de floresta Ombrófila Densa e Aberta de Roraima, estocando uma grande quantidade de biomassa. Em sua maioria, essas florestas estão situadas na Zona Sem Influencia da Savana (ZOS). A média de biomassa das AU foi de  $332 \text{ Mg ha}^{-1}$ , sendo o maior estoque observado no grupo das ombrófilas ( $0,96 \times 10^9$  Mg; 15,2%) da ZSIS, enquanto o maior estoque de biomassa entre as áreas com algum tipo de proteção legal (TI, UC) também foi observado no grupo ombrófila das TI na ZSIS ( $2,47 \times 10^9$  Mg; 39,1%). Estas distinções podem ser melhor observadas normalizando os dados brutos pela frequência (numero de pixels) em percentuais de ocorrência nas classes de biomassa de cada zona e domínio de uso da terra (Figura 6).

**Tabela 4** - Área (km<sup>2</sup>), estoque de biomassa original (Mg) e biomassa média (%; Mg ha<sup>-1</sup>) distinta por zonas fitoclimáticas, grupo florestal, Terras Indígenas (TI), Unidades de Conservação (UC) e Área de Uso agrosilvopastoril (AU) em Roraima. Letras maiúsculas distintas nas mesmas linhas indicam diferença significativa (Mann-Whitney) no nível de 95% de confiança entre os grupos fitofisionômicos.

Group	ZIS				ZOS			
	Area (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	Mean (Mg ha <sup>-1</sup> )	Biomass stock (10 <sup>6</sup> Mg)	%	Area (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	Mean (Mg ha <sup>-1</sup> )	Biomass stock (10 <sup>6</sup> Mg)	%
<b>Indigenous lands (ILs)</b>								
Ombrophilous forest	5.26	398.5 <sup>A</sup>	209.6	56.7	62.15	397.0 <sup>A</sup>	2.466.9	66.2
Ecotone	7.64	263.4 <sup>A</sup>	201.2	22.3	4.96	344.2 <sup>B</sup>	170.7	24.9
Seasonal vegetation	5.33	177.7 <sup>A</sup>	94.7	77.8	0.13	284.6 <sup>B</sup>	3.7	100
Campinarana	0.12	175.0 <sup>A</sup>	2.1	19.7	0.52	238.5 <sup>B</sup>	12.4	2.4
IL total	18.35	276.6	507.6	36.1	67.80	391.5	2.653.7	49.3
<b>Conservation units (CUs)</b>								
Ombrophilous forest	0.96	450.0 <sup>A</sup>	43.2	11.7	7.28	403.7 <sup>B</sup>	293.9	7.9
Ecotone	2.06	346.1 <sup>A</sup>	71.3	7.9	7.92	337.5 <sup>B</sup>	267.3	39.1
Seasonal vegetation	0.16	262.5	4.2	3.4	-	-	-	-
Campinarana	0.02	220.0 <sup>A</sup>	0.44	4.1	14.77	213.4 <sup>B</sup>	315.2	61.0
CU total	3.19	373.5	119.1	8.5	29.97	292.4	876.4	21.8
<b>Use areas (UAs)</b>								
Ombrophilous forest	3.14	372.8 <sup>A</sup>	117.1	31.7	23.88	403.4 <sup>B</sup>	963.3	25.9
Ecotone	20.46	308.3 <sup>A</sup>	630.8	69.8	7.57	325.6 <sup>B</sup>	246.5	36.0
Seasonal vegetation	1.32	173.2	22.9	18.8	-	-	-	-
Campinarana	0.39	208.6 <sup>A</sup>	8.1	76.1	8.38	210.2 <sup>B</sup>	189.5	36.6
UA total	25.32	307.6	778.9	55.4	39.83	347.9	1,385.9	28.9
Grand total	46.86	302	1,405.6	100	137.63	357	4,916.0	100



**Figure 6.** Biomass (Mg ha<sup>-1</sup>) by frequency (number of pixels expressed as percentages of occurrence) (A) by phytoclimatic zone and (B) by land use. ZIS = zone with savanna influence; ZOS = zone without savanna influence; IL = indigenous land UA = use area; CU = conservation unit. Observa-se que (A) que a maior parte da biomassa de floresta densa (Ombrófila) está concentrada na ZOS, enquanto que em ZIS há um maior estoque de biomassa de florestas menos densas (e.g., Ecotone). Em (B) observa-se que as TI estocam grandes quantidades de biomassa da floresta densa (Ombrófila), enquanto que CU estoca mais biomassa de florestas abertas ou menos densas (e.g., Ecotone). No caso de AU, os percentuais de biomassa estão mais equilibrados. Isto significa que esta categoria de uso se distribui uniformemente entre as áreas de florestas do Estado.

## DISCUSSÃO

A utilização de uma nova base de dados geográficos (Brasil PROBIO 2013), além da aplicação de técnicas de geoestatística (KDE) aos valores de biomassa ajustados pela metodologia de Nogueira *et al.* (2008), providenciaram uma melhor representação da espacialização dos estoques de biomassa (Figura 4), incluindo informação sobre todos os compartimentos florestais (viva+morta; acima e abaixo do solo) por grupo fitofisionômico e zona climática. O uso de técnicas de interpolação associadas a variáveis ambientais se mostrou adequada e complementa a predição da biomassa em Roraima. Estas condições são importantes para uma melhor avaliação dos estoques de carbono e das emissões de GEE no nível regional (Asner *et al.* 2010; Castanho *et al.* 2013; Nogueira *et al.* 2015). Esta sequência de passos utilizados em Roraima possibilitou estimativas acuradas do estoque total de biomassa, reduzindo as incertezas no cálculo dos estoques de carbono na escala da paisagem, facilitando os cálculos de linha de base para programas do tipo REDD, por exemplo.

A análise do semivariograma indicou que ~80% da variação nos resíduos da biomassa total são espacialmente estruturados e que apresentam variação até a distância de ~120 km em nossa área de estudo. Isto implica que métodos de distribuição espacial da biomassa total utilizando uma média simples por tipologia florestal, por exemplo, é inferior a métodos utilizando geoestatística, que considera a correlação espacial entre pontos amostrais (e.g., Sales *et al.* 2007).

Outro fator importante foi a razão de 1365 km<sup>2</sup> por ponto amostral obtida neste estudo. Embora ainda considerada como alta, esta razão foi menor do que à estimada para toda a área de florestas da Amazônia brasileira (1480 km<sup>2</sup>) coberta pelos inventários válidos (2702) do Projeto RADAMBRASIL. Contudo, ressaltamos que em algumas microrregiões o número de pontos estava adensado a distâncias muito curtas (< 25 km<sup>2</sup>) relacionadas às estradas e rios de Roraima, que foram os canais de deslocamento para o trabalho de campo da equipe do Projeto RADAMBRASIL ao início da década de 1970 (Moreira e Barbosa 2008). Independente destas microrregiões com adensamentos de pontos amostrais, esta menor razão indica melhora na tradução espacial dos valores de biomassa pelo BDG em uma escala de grupo fitofisionômico, assumido um nível de incerteza no nível do pixel de 1 km<sup>2</sup> (eg., Houghton *et al.* 2009; Saatchi *et al.* 2011). A

---

<sup>2</sup> Na execução da krigagem ordinária dos resíduos da KDE gerados através do MMQ, valores preditos em distâncias inferiores a 25 km foram modelados de forma aleatória pelo efeito pepita.

existência de uma base de inventários com distribuição espacial ao norte de Roraima (fronteira Guiana e Venezuela) também providenciaria uma substancial melhoria nos resultados, visto que a falta de representatividade nesta região de entorno foi a principal causa dos 19% ( $1-R^2$ ) de erro de predição ( $\epsilon$  de erro) calculada na análise espacial. De qualquer forma, é presumido que o atual mapa de referência (Figura 4) providencia uma fonte de informações acurada sobre a distribuição espacial da biomassa para Roraima. Este pode ser metodologicamente comparado com outros estudos e aproveitado como base regional para os inventários nacionais de estoque de carbono e emissões de GEE que são realizados pelo governo brasileiro (Brasil MCT 2010).

Em termos da biomassa florestal média por unidade de área, os resultados indicaram que os valores modelados ( $182 - 404 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) estão contidos no intervalo estabelecido por Fearnside *et al.* (2013) para todos os tipos florestais de Roraima ( $392 \text{ Mg ha}^{-1}$ ;  $240 - 513 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). O valor médio deste intervalo ( $345 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), ponderado pela área, sugere que a biomassa total florestal por unidade de área em Roraima seja menor do que o restante da Amazônia brasileira por situar-se, em grande parte, em uma zona de ecótonos, sob clima mais seco e distante das regiões mais úmidas da Amazônia Central. Esta condição é mais bem explicada pela distinção das zonas climáticas locais, pois as florestas situadas próximas das áreas de savana (ZCIS), na maior das fitofisionomias, possuem menor biomassa do que aquelas situadas em regiões sem problemas de longas secas (ZSIS) (Tabela 4 e Figura 6). Este resultado corrobora com outros estudos realizados sobre distribuição de biomassa considerando o comprimento da estação seca, indicando que as florestas de Roraima também possuem uma relação inversa entre o conteúdo de biomassa e a duração do período de estiagem (Hirota *et al.* 2011, Saatchi *et al.* 2007, 2011). Diante destes resultados, políticas de conservação dos estoques de carbono nas áreas com maiores períodos de estiagem em Roraima (ZCIS) são necessárias, visto que o total de área afetada por desmatamentos nestas regiões, até o ano de 2014, é 33% superior ao observado na zona sem graves problemas de estiagem (Tabela S2: Anexo 1b). Isso teria efeito direto na redução dos incêndios florestais que afetam negativamente os estoques de carbono nestas regiões (Barbosa e Fearnside 1999; Martins *et al.* 2012, Xaud *et al.* 2013). Um exemplo de política pública visando a conservação da biomassa florestal em Roraima, seria: a) regularização fundiária; b) aplicação do

Zoneamento Ecológico Econômico - ZEE; c) criação de unidades de conservação e; d) oferecer maior capacidade de gestão às Áreas Protegidas (TI e UC) já consolidadas.

A distinção dos estoques de biomassa por zonas climáticas e categoria de uso da terra foi importante para verificação do efeito direto destas variáveis nos cálculos dos estoques de biomassa/carbono regionais. Por exemplo, uma estimativa grosseira baseada nas taxas de desmatamento em Roraima até o ano de 2014 indicou uma perturbação em 4,36% ( $0,276 \times 10^9$  Mg) nos estoques de biomassa florestal original total em Roraima; ZCIS = 1,95% e ZSIS = 2,41% (Tabela S2: Anexo 1b). Deste montante, TI e UC pouco contribuiu com perturbações nos estoques originais de biomassa (6,8%), mesmo considerando que estas áreas institucionais suportam > 65%, em área ( $\sim 119.280 \text{ km}^2$ ), de todas as fitofisionomias florestais de Roraima. Ao contrário, a alteração da cobertura florestal nas áreas da categoria AU foi dramática, em especial nos grupos Ecótono (ZCIS) e Ombrófila (ZSIS), ambos responsáveis por, respectivamente, 32,1% e 54,3%, do total de estoque de biomassa florestal perturbada até 2014. Estes valores indicam que as áreas institucionais (proteção legal) de Roraima são uma importante estratégia para barrar perdas nos estoques de carbono e a consequente redução nas emissões de GEE para a atmosfera (e.g., Nepstad *et al.* 2005, 2009; Soares-Filho *et al.* 2010) e desempenham um importante papel na mitigação dos efeitos da mudança climática global, por exemplo.

Enquanto a biomassa florestal em Roraima parece estar protegida da degradação por desmatamento, extração seletiva de madeira e pelo fogo dentro das TI e AP, o mesmo não pode ser dito das AU. Por exemplo, traçando um paralelo entre os resultados de queda nas emissões de GEE no Bioma Amazonia no período de 2005 a 2010 devido à redução do desmatamento (Brazil, MCTI 2015; Brazil, INPE 2016), o desmatamento em Roraima não obedeceu a mesma lógica (Material suplementar; Figura A.2). Mas, continua estabilizado ao redor da média anual de  $241.1 \text{ km}^2$  (2000 a 2015: Brazil, INPE 2016), um pouco menor do que a média de  $277.0 \text{ km}^2$  (1978 a 2006) observada por Barbosa *et al.* (2008) no auge do desmatamento sem controle. Apesar da dinâmica de desmatamento em Roraima ser parecida com a da Amazônia como um todo (e.g., Fearnside 2008; Carrero e Fearnside 2011; Barni *et al.* 2015a,b), fatores locais como: **i**) licenciamento para aproveitamento da madeira (extração seletiva) a partir do corte raso da floresta; **ii**) frouxidão da

fiscalização ambiental; **iii**) grilagem de terras, garantem que as taxas de desmatamento e consequente emissões de GEE para a atmosfera em Roraima não declinarão tão cedo nas Área de Uso - AU.

Por exemplo, na ZIS, dentro das AU, além da biomassa florestal ter sido degradada pela extração madeireira em anos passados (e.g., Nepstad et al., 1999; Asner et al., 2005; Broadbent et al. 2008), a degradação da biomassa florestal em grande escala acontece porque o processo de desmatamento nesta zona está fortemente relacionado aos fatores i) climáticos e; ii) com os sistemas vegetais de dossel aberto (seasonal e ecotono), e influenciou a ocorrência de incêndios florestais de sub-bosque de grandes proporções no passado recente (Barbosa e Fearnside, 1999; Xaud et al., 2013; Barni et al., 2015a). Atualmente, a partir das lições apreendidas, os incêndios florestais vem sendo controlados nesta zona fitoclimática. Por outro lado, a maior humidade observada na ZOS parecia proteger a biomassa da floresta Ombrofila Densa da degradação pelo fogo nessa região. No entanto no início deste ano (Janeiro / fevereiro de 2016), sob a influência da intensificação do fenômeno El Niño na região e o manejo inadequado da terra com o uso do fogo (e.g., Alencar et al. 2004, 2006; Aragão e Shimabukuro 2010), foram observados e mapeados, por técnicas de sensoriamento remoto, mais de 1,000 km<sup>2</sup> de área de florestas primárias afetadas por incêndios florestais de sub-bosque (dados não publicados), a maior parte (84,5%), em área de floresta Ombrofila Densa submetidas à exploração florestal sem controle (e.g., Barni et al. 2012).

## *CONCLUSÕES*

Foram registrados avanços importantes na quantificação dos estoques e na espacialização da biomassa florestal total original em Roraima em relação a estudos anteriores que utilizaram extrapolação para espacializar a biomassa no Estado (e.g., Nogueira et al. 2008; Fearnside et al. 2013). Isto foi conseguido ajustando-se os valores de volume comercial (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) do banco de dados de inventários florestais disponibilizados pelo governo brasileiro (Brasil IBGE 2013) em biomassa (Mg ha<sup>-1</sup>) e reduzindo as incertezas no nível dos grandes grupos fitofisionômicos a partir da KDE. Isto indica que a espacialização dos estoques de biomassa em uma escala mais refinada são necessárias para reduzir incertezas regionais

sobre o caráter mitigador dos reservatórios de carbono na Amazônia. Portanto, o mapa de referência disponibilizado neste estudo pode ser utilizado facilmente na escala regional e local para estudos de emissões de GEE. Este mapa pode subsidiar projetos de REDD e políticas públicas a partir de uma linha de base para avaliação da adicionalidade e / ou o impacto das reduções dos desmatamentos; e a conservação dos estoques de carbono nas áreas sob algum tipo de proteção legal (TI e UC).

Pode-se afirmar que i) a configuração das áreas protegidas (IL and CU) em Roraima, distribuídas ao longo das fronteiras do estado, envolvendo as AU e longe das principais estradas de acesso (Material Suplementar, Figura A.3); ii) grande disponibilidade de terras para se desmatar nas AU e; iii) a baixa densidade populacional do Estado (e.g., Diniz & Santos 2005), são fatores que explicam a baixa degradação da biomassa florestal dentro dessas categorias de uso. Por outro lado, a configuração espacial da AU, abrangendo a região central e se distribuindo de sul a norte do Estado, abarcando as principais estradas de acesso (BR-174 e 210) favorecem o desmatamento, a extração seletiva de madeira, a invasão de terras públicas e a conseqüente degradação da biomassa e estoque de carbono das florestas localizadas nessas áreas.

Nesse contexto, o mapa de biomassa florestal oferecido por este estudo, pode servir de referência para pesquisas que considerem a degradação da biomassa e emissões de GEE para a atmosfera na região e; para futuros relatórios do Inventário Brasileiro de Emissões de GEE (e.g., Brazil, MCTI, 2015).

Finalmente, a análise espacial apontou que áreas sob algum tipo de uso agrosilvopastoril em Roraima possuem menor biomassa média em relação a outros estudos realizados para o Estado; indicando que estimativas de emissões de GEE por desmatamento e mudança do uso da terra em Roraima podem ser menores do que aquelas previamente calculadas.

## *AGRADECIMENTOS*

O estudo foi apoiado pela Universidade Estadual de Roraima (UERR), Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (Núcleo de Roraima) e Instituto Nacional de Ciência & Tecnologia dos Serviços Ambientais (CNPq – INCT/SERVAMB). A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)

forneceu bolsa de estudos a P.E.B. pelo Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente (CLIAMB). R.I.B. foi apoiado com uma bolsa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq 303081/2011-2). P.M.L. Graça e L. Nagy contribuíram significativamente para o manuscrito.

## *BIBLIOGRAFIA CITADA*

- Ab'Saber, A.N. 1997. A Formação Boa Vista: o significado geomorfológico e geocológico no contexto do relevo de Roraima. In: Barrosa, R. I.; Ferreira, E.J.G.; Castellon, E.G. (Eds.) *Homem, ambiente e ecologia no estado de Roraima*. INPA, Manaus, AM. p. 267-293.
- Asner G.P.; Powell, G.V.N.; Mascaró, J.; Knapp, D.E.; Clark, J.K.; Jacobson, J.; Kennedy-Bowdoin, T.; Balaji, A.; Paez-Acosta, G.; Victoria, E.; Secada, L.; Valqui, M.; Hughes, R.F. 2010. High resolution forest carbon stock and emissions in the Amazon. *Proceedure of the National Academy of Science*, 107: 16738-16742.
- Barbosa, R.I. 1997. Distribuição das chuvas em Roraima. In: Barbosa, R.I.; Ferreira, E.J.G.; Castellon, E.G., (Eds.). *Homem, ambiente e ecologia no estado de Roraima*. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Manaus, AM, p. 325-335.
- Barbosa, R.I. 2001. *Estoque de carbono e emissão de CO<sub>2</sub> e gases-traço pela queima e decomposição da biomassa vegetal em ecossistemas de savana (cerrado) de Roraima, Amazônia brasileira*. Tese de doutorado, Curso de Pós-Graduação em Ecologia do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA)/Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Manaus, AM. 212p.
- Barbosa, R.I.; Fearnside, P.M. 1999. Incêndios na Amazônia: estimativa da emissão de gases de efeito estufa pela queima de diferentes ecossistemas de Roraima na passagem do evento “El-Niño” (1997/1998). *Acta Amazonica*, 29: 513-534.
- Barbosa, R.I.; Fearnside, P.M. 2005. Above-ground biomass and the fate of carbon after burning in the savannas of Roraima, Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 216: 295–316.
- Barbosa, R.I.; Campos, C. 2011. Detection and geographical distribution of clearing areas in the savannas (‘lavrado’) of Roraima using Google Earth web tool. *Journal of Geography and Regional Planning*, 4: 122-136.
- Barbosa, R.I.; Campos, C.; Pinto, F.; Fearnside, P.M. 2007. The “Lavrados” of Roraima: Biodiversity and Conservation of Brazil’s Amazonian Savannas. *Functional Ecosystems and Communities*, 1: 29-41.
- Barbosa, R.I.; Pinto, F.; Keizer, E. 2010. Ecossistemas terrestres de Roraima: área e modelagem espacial da biomassa. In: Barbosa, R.I.; Melo, V.F. (eds.). *Roraima: Homem, Ambiente e Ecologia*. FEMACT, Boa Vista, RR. p. 347-368.
- Barbosa, R.I.; Santos, J.R.S.; Cunha, M.S.; Pimentel, T.P.; Fearnside, P.M. 2012. Root biomass, root: shoot ratio and belowground carbon stocks in the open savannas of Roraima, Brazilian Amazonia. *Australian Journal of Botany*, 60: 405-416.
- Barni, P.E.; Pereira, V.B.; Manzi, A.O.; Barbosa, R.I. 2015. Deforestation and forest fires in Roraima and their relationship with phytoclimatic regions in the Northern Brazilian Amazon. *Environmental Management*, 55: 1124-1138.
- Bello-Pineda, J.; Hernández-Stefanoni, J.L. 2007. Comparing the performance of two spatial interpolation methods for creating a digital bathymetric model of the Yucatan submerged platform. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 2: 247-254.
- Bohling, G. 2005. Introduction to Geostatistics and Variograms Analisis. Kansas Geological Survey. Disponível em: <<http://people.ku.edu/~gbohling/cpe940/>>. Acesso em 29/07/2013.

- Bourennane, H.; King, D.; Couturier, A. 2000. Comparison of kriging with external drift and simple linear regression for predicting soil horizon thickness with different sample densities. *Geoderma*, 97: 255–271.
- Brasil, IBGE. 2012. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual Técnico da Vegetação Brasileira - Manuais Técnicos em Geociências no 1*. 2ª Edição revista e ampliada. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro. 271p.  
<[ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/recursos\\_naturais/manuais\\_tecnicos/manual\\_tecnico\\_vegetacao\\_brasileira.pdf](ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/recursos_naturais/manuais_tecnicos/manual_tecnico_vegetacao_brasileira.pdf)>. Acesso em 20/08/2013.
- Brasil, IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). 2013. Banco de dados georreferenciado da Amazonia Legal recursos naturais, vegetação. IBGE, Rio de Janeiro, RJ.  
<<http://dados.gov.br/dataset/banco-de-dados-georreferenciado-da-amazonia-legal-recursos-naturais-vegetacao>>. Acesso em 12/05/2013.
- Brasil, INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). 2013. Projeto PRODES – Monitoramento da Floresta Amazônica por Satélite. INPE, São José dos Campos, SP.  
<<http://www.obt.inpe.br/prodes/index.html>>. Acesso em 20/03/2013.
- Brasil, MCT (Ministério da Ciência e Tecnologia). 2010. *Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. MCT, Brasília, DF, 280 p.
- Brasil, Projeto RADAMBRASIL (1973-1983) *Levantamento dos Recursos Naturais* (Folhas SA.20 Manaus; SA.21 Santarém; SB.19 Juruá; SB.20 Purus; SC.19 Rio Branco; SC.20 Porto Velho). Ministério das Minas e Energia, Rio de Janeiro, RJ.
- Brown, S.; Lugo, A.E. 1992. Biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon. *Interciencia*, 17(1): 8-18.
- Brown, S.; Lugo, A.E. 1994. Biomass of tropical forests: a new Estimate based on forest volumes. *Science*, 223: 1290-1293.
- Burrough, P.; Mcdonell, R. 1998. Principles of geographical information systems. Oxford University Press, Oxford, Reino Unido. Disponível em: [http://www.rc.unesp.br/igce/geologia/GAA01048/papers/Burrough\\_McDonnell-Two.pdf](http://www.rc.unesp.br/igce/geologia/GAA01048/papers/Burrough_McDonnell-Two.pdf). Acesso em 29/05/2013.
- Castanho, A.D.A.; Coe, M.T.; Costa, M.H.; Malhi, Y.; Galbraith, D.; Quesada, C.A.; 2013. Improving simulated Amazon forest biomass and productivity by including spatial variation in biophysical parameters. *Biogeosciences*, 10: 2255–2272.
- Chave, J.; Condit, R.; Aguilar, S.; Hernandez, A.; Lao, S.; Perez, R. 2004. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 359: 409-420.
- Chave, J.; Muller-Landau, H.C.; Baler, T.R.; Easdale, T.A.; ter Steege, H.; Webb, C.O. 2006. Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 Neotropical tree species. *Ecological Applications*, 16(6), 2356–2367.
- Chave, J. et al. 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, doi: 10.1111/gcb.12629.
- Condé, T.M.; Tonini, H. 2013. Fitossociologia de uma Floresta Ombrófila Densa na Amazônia Setentrional, Roraima, Brasil. *Acta Amazonica*, 43: 247 – 260.
- Fearnside, P.M. 1992. Forest biomass in Brazilian Amazônia: comments on the estimate by Brown and Lugo. *Interciencia*, 17(1): 19-27.
- Fearnside, P.M. 1994. Biomassa das florestas Amazônicas brasileiras. In: Bandeira, R.L.; Reis, M.; Borgonovi, M.N.; Cedrola, S. (eds.) *Emissão × Seqüestro de CO<sub>2</sub>: Uma Nova Oportunidade de Negócios para o Brasil*. Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), Rio de JaneiroRJ, p. 95-124.
- Fearnside, P.M. 1996. Amazonia and global warming: Annual balance of greenhouse gas emissions from land-use change in Brazil's Amazon region. In: Levine, J. (ed.) *Biomass Burning and Global Change. Volume 2: Biomass Burning in South America, Southeast Asia and Temperate and Boreal Ecosystems and the Oil Fires of Kuwait*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, E.U.A. p. 606-617.

- Fearnside, P.M. 1997a. Greenhouse gases from deforestation in Brazilian Amazonia: Net committed emissions. *Climatic Change*, 35(3): 321-360.
- Fearnside, P.M. 1997b. Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 90; 59-87.
- Fearnside, P.M. 2000. Global warming and tropical land-use change: Greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation. *Climatic Change*, 46(1-2): 115-158.
- Fearnside, P.M. 2011. Strategies for social and environmental conservation in conservation units. In: Pinedo-Vasquez, M.; Padoch, C.; Ruffino, M.L.; Brondizio, E. (eds.) *The Amazonian Várzea: The Decade Past and the Decade Ahead*. Springer, New York, E.U.A. p. 233-239.
- Fearnside, P.M. 2012. Brazil's Amazon Forest in mitigating global warming: Unresolved controversies. *Climate Policy* 12(1): 70-81.
- Fearnside, P.M.; Barbosa, R.I.; Pereira, V.B. 2013. Emissões de gases do efeito estufa por desmatamento e incêndios florestais em Roraima: Fontes e sumidouros. *Revista Agroambiente On-line*, 7: 95-111.
- Gardiman Junior, B.S.; Magalhães, I.A.L.; Freitas, C.A.A.; Cecílio, R.A. 2012. Análise de técnicas de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na bacia do rio Itapemirim (ES). *Ambiência*, 8: 61-71.
- Harris, N.L.; Brown, S.; Hagen, S.C.; Saatchi, S.S.; Petrova, S.; Salas, W.; Hansen, M.C.; Potapov, P.V.; Lotsch, A. 2012. Baseline Map of Carbon Emissions from Deforestation in Tropical Regions. *Science*, 336: 1573-1576.
- Hirota, M.; Holmgren, M.; Nes, E.H.V.; Scheffer, M. 2011. Global resilience of Tropical Forest and Savanna to critical transitions. *Science*, 234: 232-235.
- Houghton, R.A., 2003. Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different? *Global Change Biology*, 9: 500-509.
- Houghton, R.A., 2005. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology*, 11: 945-958.
- Houghton, R.A.; Hall, F.; Goetz, S.J. 2009. Importance of biomass in the global carbon cycle. *Journal of Geophysical Research*, 114: G00E03.
- Houghton, R.A. 2010. How well do we know the flux of CO<sub>2</sub> from land-use change? *Tellus*, 62B: 337-351.
- ISA (Instituto Socioambiental). 2010.– Terras Indígenas do Brasil.  
<<http://mapas.socioambiental.org/website/TerraIndigenaNovo/viewer.htm>>. Acesso em 25/12/2010.
- Isaaks, E., Srivastava, R. 1989. *Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York, E.U.A.
- Landim, P.M.B., Sturaro, J.R. 2002. Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos. Geomatematica, Texto didático 6, DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro. Disponível em:  
<<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em: 25 maio de 2013.
- Martins, F.S.R.V.; Xaud, H.A.M.; Santos, J.R. dos; Galvão, L.S. 2012. Effects of fire on aboveground forest biomass in the northern Brazilian Amazon. *Journal of Tropical Ecology*, 28: 591-601.
- Moreira, J.; Barbosa, R.I. 2008. Composição, riqueza e diversidade de árvores comerciais inventariadas pelo PROJETO RADAMBRASIL para Roraima e áreas adjacências. *Mens Agitat* 3(2): 115-124.
- NASA-TRMM, 2013. TRMM Level-3 Monthly Products. ([http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance\\_id=TRMM\\_Monthly](http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=TRMM_Monthly)). Acesso em 23/05/2013.
- Nascimento, M.T.; Carvalho, L.C.S.; Barbosa, R.I.; Villela, D.M. 2014. Variation in floristic composition, demography and above-ground biomass over a 20-year period in an Amazonian monodominant forest. *Plant Ecology & Diversity*, 7 (1-2): 293-303.
- Nepstad, D.; Schwartzman, S.; Bamberger, B.; Santilli, M.; Ray, D.; Schlesinger, P.; et al. 2005. Inhibition of Amazon Deforestation and Fire by Parks and Indigenous Lands. *Conservation Biology*, 20(1): 65-73.

- Nepstad, D.C.; Soares-Filho, B.S.; Merry, F.; Lima, A.; Moutinho, P.; Carter, J.; *et al.* 2009. The end of deforestation in the Brazilian Amazon. *Science*, 326: 1350-1351.
- Nepstad, D.C.; McGrath, D.G.; Soares-Filho, B. 2011. Systemic Conservation, REDD, and the Future of the Amazon Basin. *Conservation Biology*, 25: 1113–1116.
- Nogueira, E.M.; Nelson, B.W.; Fearnside, P.M. 2005. Wood density in dense forest in central Amazonia, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 208: 261–286.
- Nogueira, E.M.; Fearnside, P.M.; Nelson, B.W.; França, M.B. 2007. Wood density in forests of Brazil's 'arc of deforestation': Implications for biomass and flux of carbon from land-use change in Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 248: 119–135.
- Nogueira, E.M.; Fearnside, P.M.; Nelson, B.W.; Barbosa, R.I.; Keizer, E.W.H. 2008. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: New allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. *Forest Ecology and Management*, 256: 1853–1867.
- Nogueira, E.M., Yanai, A.M.; Fonseca, F.O.R.; Fearnside, P.M. 2015. Carbon stock loss from deforestation through 2013 in Brazilian Amazonia. *Global Change Biology*, 21: 1271–1292.
- R Development Core Team. 2015. *R: a language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<http://www.R-project.org>>.
- Saatchi, S.S.; Houghton, R.A.; Dos Santos Alvalá, R.C.; Soares, J.V.; Yu, Y. 2007. Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. *Global Change Biology*, 13: 816–837.
- Saatchi, S.S.; Harris, N.L.; Brown, S.; Lefsky, M.; Mitchard, E.T.A.; Salas, W. *et al.* 2011. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Science USA* 108, 9899–9904.
- Saatchi, S.; Ulander, L.; Williams, M.; Quegan, S.; LeToan, T.; Shugart, H.; Chave, J. 2012. Forest biomass and the science of inventory from space. *Nature Climate Change*, 2(12): 826–827.
- Sales, M.H.; Souza Jr., C.M.; Kyriakidis, P.C.; Roberts, D.A.; Vidal, E. 2007. Improving spatial distribution estimation of forest biomass with geostatistics: A case study for Rondônia, Brazil. *Ecological Modelling*, 205: 221–230.
- Schaefer, C.; Darlymple, J. 1995. Landscape evolution in Roraima, North Amazonia: Planation, paleosols and palioclimates. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 39: 1-28.
- Soares-Filho, B.; Moutinho, P.; Nepstad, D.; Anderson, A.; Rodrigues, H.; Garcia, R.; *et al.* 2010. Role of Brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 107: 10821–10826.
- Xaud, H.A.M.; Martins, F.S.R.V.; dos Santos, J.R. 2013. Tropical forest degradation by mega-fires in the northern Brazilian Amazon. *Forest Ecology and Management*, 294: 97–106.
- Zanne, A.E.; Lopez-Gonzalez, G.; Coomes, D.A.; Ilic, J.; Jansen, S.; Lewis, S.L.; Miller, R.B.; Swenson, N.G.; Wiemann, M.C.; Chave, J. 2009. *Global Wood Density Database*. <<http://hdl.handle.net/10255/dryad.235>>.

## Supplementary Online Material

# Spatial distribution of forest biomass in Brazil's state of Roraima, northern Amazonia

### **Paulo Eduardo Barni**

Universidade Estadual de Roraima (UERR)  
*Campus* Rorainópolis  
Av. Senador Helio Campos, s/nº  
69375-000 Rorainópolis-Roraima, Brazil  
email: paulinpa2007@gmail.com

### **Antônio Ocimar Manzi**

Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA  
Coordenação de Dinâmica Ambiental - CDAM  
Av. André Araújo 2936 - Petrópolis  
69067-375 Manaus-Amazonas, Brazil  
Current address:  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)  
Rodovia Presidente Dutra, Km 39  
12630-000 Cachoeira Paulista, São Paulo, Brazil  
email: **manzi@cptec.inpe.br**

### **Tiago Monteiro Condé**

Universidade Estadual de Roraima (UERR)  
*Campus* Rorainópolis  
Av. Senador Helio Campos, s/nº  
69375-000 Rorainópolis-Roraima, Brazil  
email: tiagonafloresta@gmail.com

### **Reinaldo Imbrozio Barbosa**

Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA  
Coordenação de Dinâmica Ambiental - CDAM  
Núcleo de Pesquisas de Roraima - NPRR  
Rua Coronel Pinto 315 – Centro  
69301-150 Boa Vista-Roraima, Brazil  
email: reinaldo@inpa.gov.br

### **Philip Martin Fearnside (\*)**

Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA  
Coordenação de Dinâmica Ambiental - CDAM  
Av. André Araújo 2936 - Petrópolis  
69067-375 Manaus-Amazonas, Brazil  
email: pmfearn@inpa.gov.br

**(\*)Corresponding author**

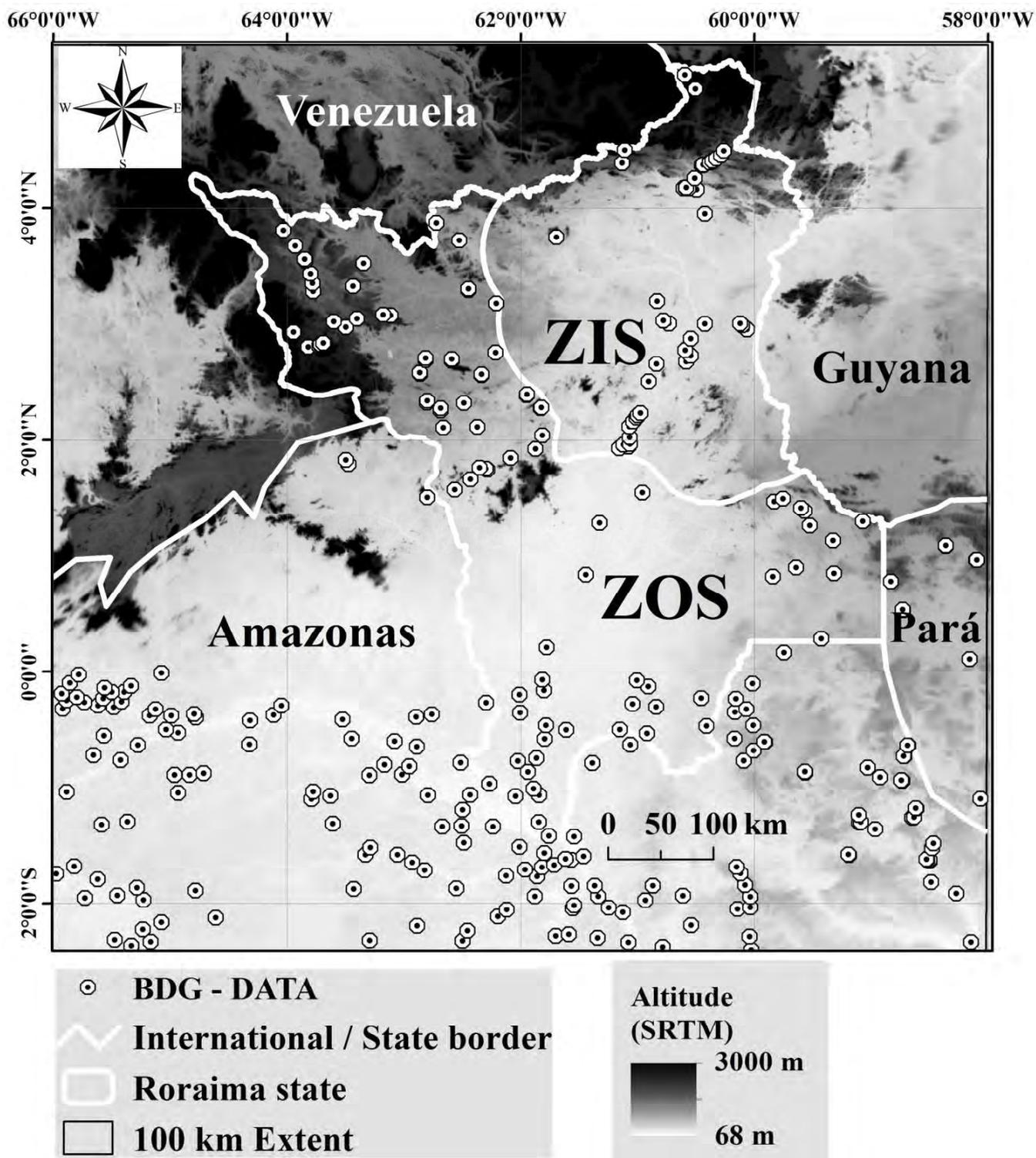
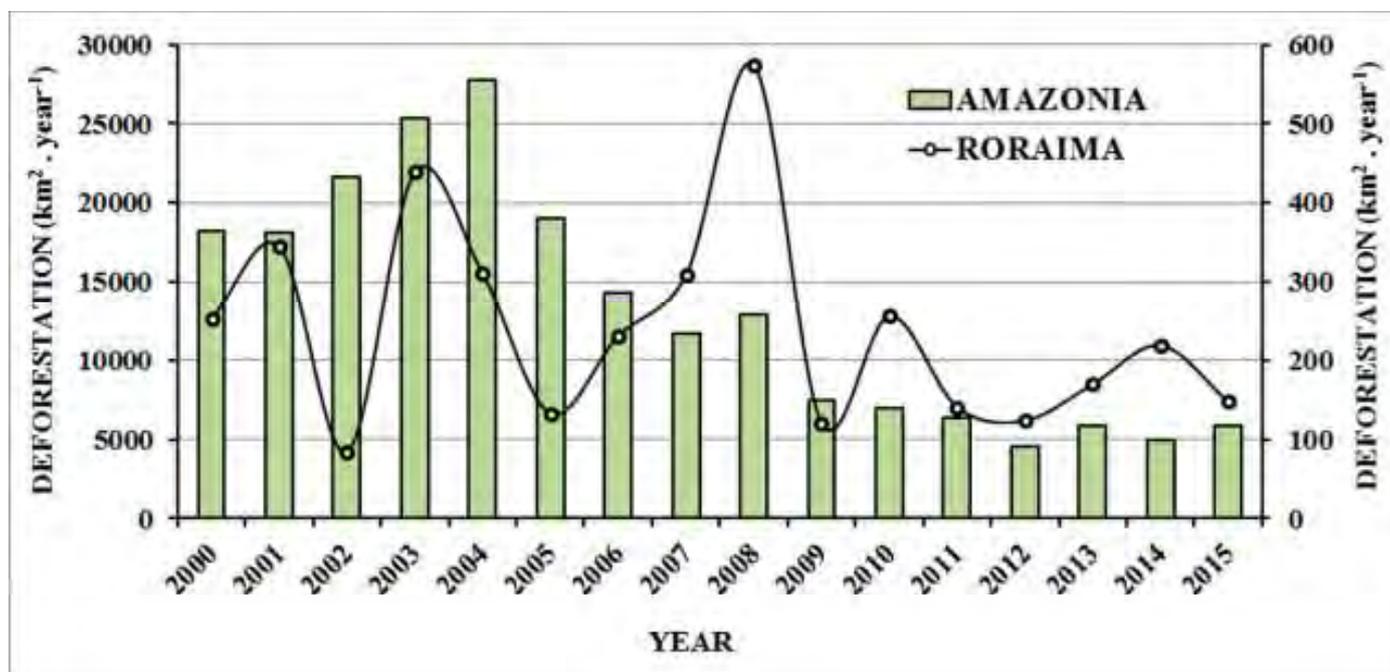


Figura A1. Distribuição espacial dos plots do BDG abrangendo a área de estudo.

Enquanto houve diminuição significativa nas taxas de desmatamento observadas para a Amazônia como um todo entre 2000 e 2015 (Figura A.2), por exemplo, comparando-se dois intervalos de tempo: 2000 a 2007 e 2008 a 2015 (Test “t”;  $p$ -value=0.00081; t-crítico=2.4469), o mesmo não foi observado para Roraima (Test “t”;  $p$ -value=0.5231; t-crítico=2.1603), neste mesmo período de tempo.



**Figura A2.** Taxas de desmatamento annual ( $\text{km}^2 \text{ year}^{-1}$ ) para a Amazonia (Eixo esquerdo: barras) e para para Roraima (Eixo direito: linha), de 2000 a 2015. A representação do desmatamento de Roraima esta desproporcional ao desmatamento da Amazonia para destacar suas particularidades.

**Fonte:** Brazil, INPE (2016).



**Figura A3.** Mapa da área de estudo apresentando as estradas, o desmatamento acumulado até 2014, Áreas de Uso – AU, Terras Indígenas – TI, Unidades de Conservação – UC e Projetos de Assentamentos - SP. The continuous solid line in the center of the figure divides the study area into two phytoclimatic zones (Barni et al., 2015): ZIS = zone with savanna influence; ZOS = Zone without savanna influence.

**Table A1.** Number of plots and mean biomasses (live, dead, below-ground and above-ground) in forest and non-forest ecosystems in the state of Roraima and surrounding area used in the spatial modeling.

Group	Code	Total plots	Mean biomass (Mg ha <sup>-1</sup> )			Total	Source
			Live above-ground	Dead above-ground	Live below-ground		
Forest	Da	29	304.03	55.14	64.66	<b>423.83</b>	Brazil, RADAMBRASIL (1973-1983) (296 ha-plots)  Condé & Tonini (2013) (1 plot)  Nascimento et al. (2014) (1 plot)
	Db	89	307.31	55.73	65.36	<b>428.40</b>	
	Dm	22	306.48	55.58	65.18	<b>427.25</b>	
	Ds	104	292.83	52.92	62.37	<b>408.11</b>	
	Aa	6	314.56	58.25	68.31	<b>441.12</b>	
	Ab	7	233.67	43.27	50.74	<b>327.69</b>	
	Am	6	235.12	43.54	51.06	<b>329.72</b>	
	As	20	247.15	45.76	53.67	<b>346.58</b>	
	Fa	1	241.62	44.74	52.47	<b>338.83</b>	
	Fs	2	191.26	35.42	41.53	<b>268.21</b>	
	Td						
	La	2	297.07	55.01	64.51	<b>416.58</b>	
	Ld	3	278.81	51.63	60.54	<b>390.98</b>	
	LOt	2	280.07	51.86	60.82	<b>392.75</b>	
	ONt	5	237.79	44.03	51.64	<b>333.46</b>	
	SNt						
	SOt						
	TNt						
<b>Sub-total</b>		<b>298</b>	<b>269.13</b>	<b>49.49</b>	<b>58.06</b>	<b>376.68</b>	
<b>Non-forest (1)</b>							
(Savanna)	Sa (2)	2	11.10	0.63		<b>11.73</b>	Barbosa (2001), Barbosa & Fearnside (2005) (27 plots)
	Sg	14	2.77	0.49		<b>3.26</b>	
	Sp	4	7.50	0.75		<b>8.25</b>	
	Ta (2)	2	9.16	1.88		<b>11.04</b>	
	Tg (CL)	2	1.47	0.16		<b>1.63</b>	
	Tg (CS)	1	3.60	0.45		<b>4.05</b>	
	Tp	3	5.48	1.45		<b>6.93</b>	
<b>Sub-total</b>		<b>28</b>	<b>5.87</b>	<b>0.83</b>		<b>6.70</b>	
<b>Total</b>		<b>326</b>					

(1) The biomass for all of the seasonally flooded campinaranas (Lg and Lb) was included in the non-forest group, considering that Lg (“grassy” campinararana) occupies 8716.6 km<sup>2</sup> and Lb (“bushy” campinararana) occupies 2484.0 km<sup>2</sup> (Table 1). These vegetation types are not represented in the RADAMBRASIL plots

(2) Ta and Sa are considered to be “forest” in PRODES deforestation data (Brazil, INPE, 2016) and in Brazil’s national inventory of greenhouse-gas emissions (Brazil, MCT, 2010). However, due to discrepancies in past definitions, we calculated biomass by group in estimating biomass for “non-forest” ecosystems in Roraima taking into account the Sa and Ta values by Barbosa and Fearnside (2005). Both of these vegetation types have low biomass per unit area (<12 Mg ha<sup>-1</sup>), and treating them as “non-forest” provides a better representation of the savanna ecosystems in the northern portion of Brazilian Amazonia. All PRODES deforestation data exclude “non-forest,” and biomass for the non-forest area was therefore estimated based only on plots situated in savannas areas.

**Table A2.** Stock of total forest biomass (live + dead; above- and below-ground) affected by deforestation in Roraima by the year 2014 separated by phytoclimatic zone, land-use category and phytophysiognomic group.

Land-use class (1)	phytophysiognomic group	ZIS (2)				ZOS (2)			
		Total deforestation through 2014 (km <sup>2</sup> )	Remaining area (km <sup>2</sup> )	Mean biomass (Mg ha <sup>-1</sup> )	Impacted biomass through 2014 (10 <sup>6</sup> Mg)	Total deforestation through 2014 (km <sup>2</sup> )	Remaining area (km <sup>2</sup> )	Mean biomass (Mg ha <sup>-1</sup> )	Impacted biomass through 2014 (10 <sup>6</sup> Mg)
IL	Ombrophilous forest	117.1	5,142.9	398.5	4.665	145.5	62,004.5	397.0	5.775
	Ecotone	131.8	7,508.2	177.7	2.343	8.2	4,951.8	284.6	0.232
	Seasonal vegetation	139.1	5,190.9	263.4	3.663	0.2	129.8	344.2	0.007
	Campinarana	0.6	119.4	175.0	0.010	0.5	519.6	238.5	0.011
	Subtotal IL	388.6	17,961.4	276.6	10.681	154.2	67,605.8	391.5	6.025
CU	Ombrophilous forest	0.0	960.0	450.0	0.0	13.0	7,267.0	403.7	0.525
	Ecotone	32.8	2,027.2	262.5	0.861	13.5	7,906.5	337.5	0.456
	Seasonal vegetation	3.6	156.4	346.1	0.125	-	-	-	-
	Campinarana	0	20.0	220.0	0.0	1.9	14,768.1	213.4	0.041
	Subtotal PA	36.4	3,163.6	307.6	0.986	28.4	29,941.6	292.4	1.021
UA	Ombrophilous forest	495.6	2,644.4	372.8	18.476	3,251.4	20,628.6	403.4	131.161
	Ecotone	4,390.2	16,069.8	173.2	76.038	383.3	7,186.7	325.6	12.480
	Seasonal vegetation	534.1	785.9	308.3	16.466	-	-	-	-
	Campinarana	55.2	334.8	208.6	1.151	103.2	8,276.8	210.2	2.169
	Subtotal UA	5,475.1	19,844.9	373.5	112.132	3,737.9	36,092.1	347.9	145.811
Forests	Ombrophilous forest	612.7	8,747.3	-	23.141	3,409.9	89,900.1	-	137.461
	Ecotone	4,554.8	25,605.2	-	78.381	405.0	20,045.0	-	13.168
	Seasonal vegetation	676.8	6,133.2	-	20.129	0.2	129.8	-	0
	Campinarana	55.8	474.2	-	1.162	105.6	23,564.5	-	2.220
Forest total	5,900.1	40,959.9	-	122.813	3,920.6	133,639.5	-	152.850	

(1) Land-use classes: IL = indigenous land, UA = use area; CU = conservation unit.

(2) phytoclimatic zones: ZIS = zone with influence of savanna; ZOS = zone without savanna influence.

## 1 LITERATURE CITED

- 2 Barbosa, R.I. 2001. Estoque de Carbono e Emissão de CO<sub>2</sub> e Gases-Traço pela Queima  
3 e Decomposição da Biomassa Vegetal em Ecossistemas de Savana (Cerrado) de  
4 Roraima, Amazônia Brasileira. Ph.D. thesis in ecology, Instituto Nacional de  
5 Pesquisas da Amazônia (INPA) and Universidade Federal do Amazonas  
6 (UFAM). Manaus, Amazonas, Brazil. 212 pp.
- 7 Barbosa, R.I.; Fearnside, P.M. 2005. Above-ground biomass and the fate of carbon after  
8 burning in the savannas of Roraima, Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and*  
9 *Management*, 216: 295–316.
- 10 Barni, P.E.; Pereira, V.B.; Manzi, A.O.; Barbosa, R.I. 2015. Deforestation and forest  
11 fires in Roraima and their relationship with phytoclimatic regions in the  
12 Northern Brazilian Amazon. *Environmental Management*, 55: 1124-1138.
- 13 Brazil, INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). 2016. Projeto PRODES –  
14 Monitoramento da Floresta Amazônica por Satélite. INPE, São José dos  
15 Campos, SP, Brazil. <<http://www.obt.inpe.br/prodes/index.html>>. Accessed  
16 13/04/2016.
- 17 Brazil, RADAMBRASIL. 1973-1983. Levantamento dos Recursos Naturais (Folhas  
18 SA.20 Manaus; SA.21 Santarém; SB.19 Juruá; SB.20 Purus; SC.19 Rio Branco;  
19 SC.20 Porto Velho). Ministério das Minas e Energia, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.
- 20 Condé, T.M.; Tonini, H. 2013. Fitossociologia de uma Floresta Ombrófila Densa na  
21 Amazônia Setentrional, Roraima, Brasil. *Acta Amazonica*, 43: 247-260.
- 22 Nascimento, M.T.; Carvalho, L.C.S.; Barbosa, R.I.; Villela, D.M. 2014. Variation in  
23 floristic composition, demography and above-ground biomass over a 20-year  
24 period in an Amazonian monodominant forest. *Plant Ecology & Diversity*, 7 (1-  
25 2): 293-303.
- 32