

Avaliação da incerteza inserida pela cobertura da terra na estimativa da produtividade primária bruta do produto MOD17A2

Catherine Torres de Almeida¹
Lênio Soares Galvão¹
Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão¹
Rafael Coll Delgado²

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{catherine.almeida, lenio.galvao}@inpe.br, laragao@dsr.inpe.br

² Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
23890-000 - Seropédica - RJ, Brasil
rafaelcolladelgado32@gmail.com

Abstract. The objective of this study is to assess how different land cover classes of the Amazon and Cerrado contribute to the uncertainty in the estimation of gross primary productivity (GPP) based on the MOD17A2 model. For this purpose, the accuracy of the land cover product MCD12Q1 type UMD was evaluated and a sensitivity analysis was performed to show how GPP estimates from the MOD17A2 model respond to variations in land cover. The MCD12Q1 land cover classification had low accuracy over heterogeneous areas, with confusion among anthropogenic areas and savanna. The overall accuracy of the MCD12Q1 was 69% with this performance mostly related to the class of evergreen broadleaf forest. The sensitivity analysis showed that land cover variations in MOD17A2 model introduced uncertainty in the estimation of GPP in heterogeneous areas. However, it is possible that other model input variables cause greater error in the GPP estimation, which requires further studies.

Palavras-chave: photosynthesis, carbon balance, Amazon, fotossíntese, balanço de carbono, Amazônia.

1. Introdução

A produtividade primária bruta (GPP, do inglês *Gross Primary Productivity*) refere-se a fotossíntese ao nível de ecossistema e é um dos principais processos que controlam a troca de dióxido de carbono (CO₂) entre a biosfera e a atmosfera, sendo importante para compensar as emissões antropogênicas de CO₂ (Beer et al., 2010). As florestas tropicais, como a floresta Amazônica, estocam elevadas quantidades de carbono, como consequência da alta produtividade primária líquida. No entanto, se queimados ou degradados, esses ecossistemas podem atuar como importantes fontes de carbono para a atmosfera, agravando a problemática das mudanças climáticas.

A GPP a nível de superfície é comumente estimada através do método de covariância de vórtices turbulentos, que utiliza dados de torres micrometeorológicas de fluxo (Falge et al., 2002). No entanto, esse método possui abrangência espacial limitada. Para que seja representativo em áreas extensas, seria necessário um grande número de torres, o que acarretaria em um alto custo.

Dados de sensoriamento remoto podem ser utilizados para caracterizar a estrutura da vegetação e estimar a GPP em escala regional e global, suprindo os déficits na representação espacial das metodologias de superfície. Desde 2000, a NASA fornece o produto MOD17A2, que estima GPP a partir de dados do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) (Running & Zhao, 2015). Esse produto é baseado no conceito de eficiência de uso da luz (ϵ), que propõe uma relação proporcional entre a GPP e a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa (PAR, do inglês *Photosynthetically Active Radiation*) que é absorvida pela vegetação (Monteith, 1972). A PAR absorvida pela vegetação (APAR) é calculada multiplicando-se a PAR incidente pela fração que é absorvida (FPAR). A GPP é

então estimada multiplicando-se a APAR pela eficiência ϵ de uso da luz para a assimilação de carbono. Como a eficiência fotossintética pode variar de acordo com as condições ambientais, um valor de ϵ_{\max} , tabelado de acordo com o tipo de cobertura da terra, é corrigido por fatores que consideram a temperatura mínima do ar (t_n) e o Déficit de Pressão de Vapor d'água (DPV).

Sendo assim, para estimar a GPP, o modelo MOD17A2 utiliza dados do sensor MODIS (FPAR, fornecido pelo produto MOD15A2, e cobertura da terra, fornecida pelo produto MCD12Q1), dados meteorológicos (PAR, t_n e DPV) e parâmetros tabelados de acordo com o tipo de cobertura da terra. As estimativas de GPP da coleção 6 do MOD17A2 (também denominada de MOD17A2H) são fornecidas de 8 em 8 dias em uma resolução espacial de 500 m (Running e Zhao, 2015).

Como as estimativas do MOD17A2 dependem do valor definido para a ϵ_{\max} que, por sua vez, depende da correta classificação da cobertura da terra, é importante avaliar como variações neste parâmetro podem influenciar no desempenho do modelo. Diante disto, o objetivo deste trabalho é avaliar como variações na classificação da cobertura da terra dos biomas Amazônia e Cerrado podem acarretar em incertezas na estimativa da GPP pelo MOD17A2. Para isso, foi avaliada a acurácia do produto de cobertura da terra utilizado pelo MOD17A2, o MCD12Q1 tipo UMD, e foi realizada uma análise de sensibilidade para saber como o modelo MOD17A2 responde a variações na cobertura da terra.

2. Material e Métodos

2.1. Área de Estudo

A área de estudo é composta por oito ambientes, envolvendo áreas naturais e áreas sob influências antrópicas, onde estão localizadas as torres micrometeorológicas do Programa LBA (*Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia*). Quatro torres estão localizadas na Amazônia central, perto da linha do Equador e próximas ao Rio Amazonas, a uma latitude aproximada de 3°S: K34, K67, K83 e K77. As torres K34, K67 e K83 localizam-se em áreas de unidade de conservação; K34 na Reserva Biológica de Cuieiras, em Manaus e K67 e K83 na Floresta Nacional do Tapajós, no Pará; apresentando cobertura homogênea de floresta ombrófila. A área K83 possui vegetação similar à da K67, mas a primeira passou por um processo de corte seletivo de madeira em setembro de 2001. A K77 localiza-se na cidade de Santarém-Pará, em área de agricultura rodeada por alguns fragmentos florestais. Essa área apresentava cobertura florestal, mas foi convertida para pastagem na década de 90 e, mais tarde, em novembro de 2001, foi queimada e arada para dar lugar a um plantio de arroz não irrigado (Sakai et al., 2004).

Outras três torres estão localizadas ao sul da Amazônia Legal, próximas a latitude 10°S, sendo que duas delas, RJA e FNS, ocorrem no estado de Rondônia a uma longitude de aproximadamente 62°W e a terceira, BAN, em uma longitude de cerca de 50°W. A RJA se encontra em área de floresta tropical, porém o seu redor contém áreas de outros tipos de uso e cobertura da terra. A FNS é uma área próxima da RJA que era coberta também por floresta, mas que foi queimada em meados da década de 70. A partir de 1977, foram cultivados arroz, feijão e mandioca, mas com a degradação do solo no início da década de 80, a área foi convertida em pastagem (Von Randow et al., 2004). A torre BAN encontra-se em uma área de transição entre floresta inundada sazonalmente e savana, localizada no estado do Tocantins, perto do Rio Javaes. Finalmente, no estado de São Paulo, encontra-se a Reserva Pé-de-Gigante (PDG), uma área de cerradão (savana florestada).

2.2. Avaliação da acurácia do MCD12Q1 tipo UMD

O produto de cobertura da terra MCD12Q1 (tipo UMD), versão 5.1, foi obtido no site https://lpdaac.usgs.gov/data_access/data_pool, para as oito áreas de estudo, para o ano de 2004. Este produto é anual e possui resolução espacial de 500 m. Imagens Landsat 5-TM (*Thematic Mapper*), com resolução espacial de 30 m, foram obtidas no site <http://earthexplorer.usgs.gov/>, já convertidas em valores de reflectância de superfície, a fim de serem utilizadas como referência para comparar com as imagens classificadas. Para a obtenção das imagens, priorizaram-se as que possuíam poucas nuvens, elegendo a melhor imagem disponível da estação seca do ano de 2004, dos meses julho ou agosto. As bandas 5 (infravermelho médio), 4 (infravermelho próximo) e 3 (vermelho) do sensor TM foram utilizadas para gerar uma composição colorida para cada área. Tanto para a imagem classificada do MCD12Q1, como para as composições coloridas do TM, foram selecionadas para cada local uma área de 7x7 km, centrada na torre de fluxo, para padronizar a área a ser comparada. Procedeu-se com uma comparação visual das imagens para verificar os possíveis erros de classificação do MCD12Q1. Uma matriz de confusão foi gerada para avaliar a acurácia global e acurácias do produtor e do usuário. A seleção das amostras para a matriz de confusão foi realizada por meio de amostragem aleatória dentro das áreas de 7x7 km, com a restrição de que os pontos deveriam ter uma distância mínima de 1 km entre si.

2.3. Sensibilidade do modelo MOD17A2 a variações na cobertura da terra

Para analisar os erros inerentes ao modelo MOD17A2 e as variações causadas na estimativa de GPP devido a variações na cobertura da terra, foram selecionados os dados de entrada do modelo MOD17A2, no período de 2000 a 2006, para os pixels que continham as torres. Os dados de entrada derivados do sensor MODIS são os valores de FPAR (produto MOD15A2, versão 6.0), fornecidos em um intervalo de 8 em 8 dias e a uma resolução espacial de 500 m, e a cobertura da terra, dada pelo tipo UMD do MCD12Q1. Os dados de entrada do modelo referente às variáveis meteorológicas (PAR, t_n e DPV) foram obtidos das torres micrometeorológicas de superfície. A partir desses dados de entrada e dos parâmetros definidos para cada classe de cobertura (Running & Zhao, 2015), procedeu-se com seis diferentes estimativas de GPP, em um intervalo de 8 em 8 dias, simulando diferentes coberturas da terra para todas as áreas.

As estimativas geradas a partir das diferentes coberturas da terra foram comparadas com os valores de GPP gerados pelo MOD17A2 (GPP_MOD) e com os valores de GPP de superfície (GPP_Sup), obtidos das torres micrometeorológicas. Cada estimativa de GPP é melhor descrita abaixo:

- GPP_Sup = valores de GPP de superfície estimados pelo método de covariância de vórtices turbulentos baseado em dados de fluxo de carbono das torres micrometeorológicas. Essa estimativa foi considerada como referência para as demais.
- GPP_MOD = estimativa do produto MOD17A2, versão 6.0. Os dados meteorológicos utilizados nessa estimativa são derivados de uma base de dados climáticos da NASA, denominada GMAO.
- GPP_UMD = Estimativa da GPP com dados meteorológicos das torres (PAR, DPV, t_n), FPAR do produto MOD15A2 e cobertura da terra derivado do MCD12Q1 tipo UMD. Como a estimativa de GPP foi feita para um intervalo de 8 em 8 dias e o produto MCD12Q1 fornece dados anuais de cobertura da terra, considerou-se que as classes de cobertura não mudam dentro de um ano. No entanto, de ano para ano as classes podem mudar.
- Demais estimativas (FO, SF, AS, Agr e Gram) = As demais estimativas de GPP também consideraram os dados meteorológicos das torres (PAR, DPV, t_n) e FPAR do produto MOD15A2. Porém, como cobertura da terra, considerou-se somente uma classe por vez, contínua em toda a série temporal. Foram utilizadas as cinco classes mais frequentes na área

de estudo: Floresta Ombrófila (FO), Savana Florestada (SF), Savana Arborizada (SA), Área agrícola (Agr) e Gramínea (Gram).

Os valores referentes aos pixels das torres para os produtos de GPP (MOD17A2), FPAR (MOD15A2) e cobertura da terra (MCD12Q1) foram obtidos no site https://lpdaac.usgs.gov/tools/data_access/appeears.

3. Resultados e Discussão

Por meio da comparação entre a imagem classificada pelo MCD12Q1 (500 m de resolução espacial) e a composição colorida RGB-543 do sensor TM (30 m de resolução espacial), verificou-se que as áreas K34, K67 e K83, por trataram-se de áreas contínuas e homogêneas de cobertura florestal, foram bem classificadas pelo MCD12Q1 (Figura 1). Para essas três áreas de floresta na Amazônia central, todos os pixels em uma área de 7x7 km centrados na torre foram classificados como floresta ombrófila sempre verde. A área de cobertura florestal em Rondônia, RJA, por ser menos contínua que as demais, com algumas áreas próximas sob influências antrópicas, apresentou alguns erros de comissão e omissão. Em relação aos erros de comissão, verificou-se que algumas áreas classificadas como florestas desconsideraram influências de plantios agrícolas, pastagens ou corpos d'água, provavelmente devido à baixa resolução espacial das imagens MODIS. Os erros de omissão estão relacionados a áreas que deveriam ter sido classificadas como plantios agrícolas ou pastagens, mas que foram erroneamente classificadas como savanas (Figura 1 e Tabela 1).

A área de transição entre floresta ombrófila e cerrado (BAN) também apresentou corpos d'água não identificados na imagem classificada e que foram confundidos em alguns casos com a classe de floresta mista. Nas áreas de plantio agrícola (K77) e pastagem (FNS), fica evidente a confusão entre essas classes e classes de savana arborizada ou florestada (Figura 2). A área K77 apresentou somente poucos pixels classificados corretamente como plantios agrícolas. Além disso, algumas áreas de plantios agrícolas também foram erroneamente classificadas como floresta ombrófila. FNS teve a maior parte de sua área classificada erroneamente como savana arborizada, somente com alguns poucos pixels sendo corretamente classificados como gramíneas. A área PDG é também bastante heterogênea, apresentando cobertura de cerrado, plantio agrícola e florestal (silvicultura), como pode ser observado na imagem Landsat da Figura 2. Verificaram-se também alguns erros de classificação nessa área, como a classificação errada de áreas de cerrado como floresta ombrófila e a presença da classe de floresta decídua, que não ocorre na área.

A Tabela 1 apresenta a matriz de confusão para as áreas estudadas. Verificou-se uma acurácia global de 69%, cujos acertos foram relacionados quase que exclusivamente a classe de floresta ombrófila. Dessa forma, a classe de floresta ombrófila apresentou alta acurácia do produtor (93%) e do usuário (87%), com erros de omissão associados à confusão com classes de savanas e erros de comissão associados à confusão com a classe de plantio agrícola e savana florestada. As demais classes apresentaram baixa acurácia, tanto do produtor como do usuário, devido aos vários erros que foram verificados. Porém, como essas coberturas foram pouco frequentes na área de estudo, seria necessário ampliar a área de análise para acrescentar mais amostras visando a melhorar a estimativa do erro associado a essas classes. Os resultados verificados estão condizentes com os apresentados por Friedl et al. (2010), que avaliaram o MCD12Q1 a nível global. Os autores relataram problemas na classe de savana, afirmando que muitas áreas no Brasil classificadas com essa cobertura são na verdade coberturas arbustivas, de gramíneas ou agrícolas. A acurácia do produtor e do usuário apresentada pelos mesmos autores também foi baixa para as classes de savana florestada (45,2% e 34,3%, respectivamente) e arborizada (22,6% e 39%, respectivamente).

Além da confusão entre classes, outra fonte de erro associada à cobertura da terra está relacionada à variação da cobertura em um dado local de ano para ano, sem que de fato ocorra

uma mudança de cobertura da terra no local. Para as áreas estudadas, verificou-se que os locais como o K77 e PDG apresentaram esses erros, com mudanças na classificação da cobertura no período de 2000 a 2006, caracterizando uma instabilidade do algoritmo de classificação.

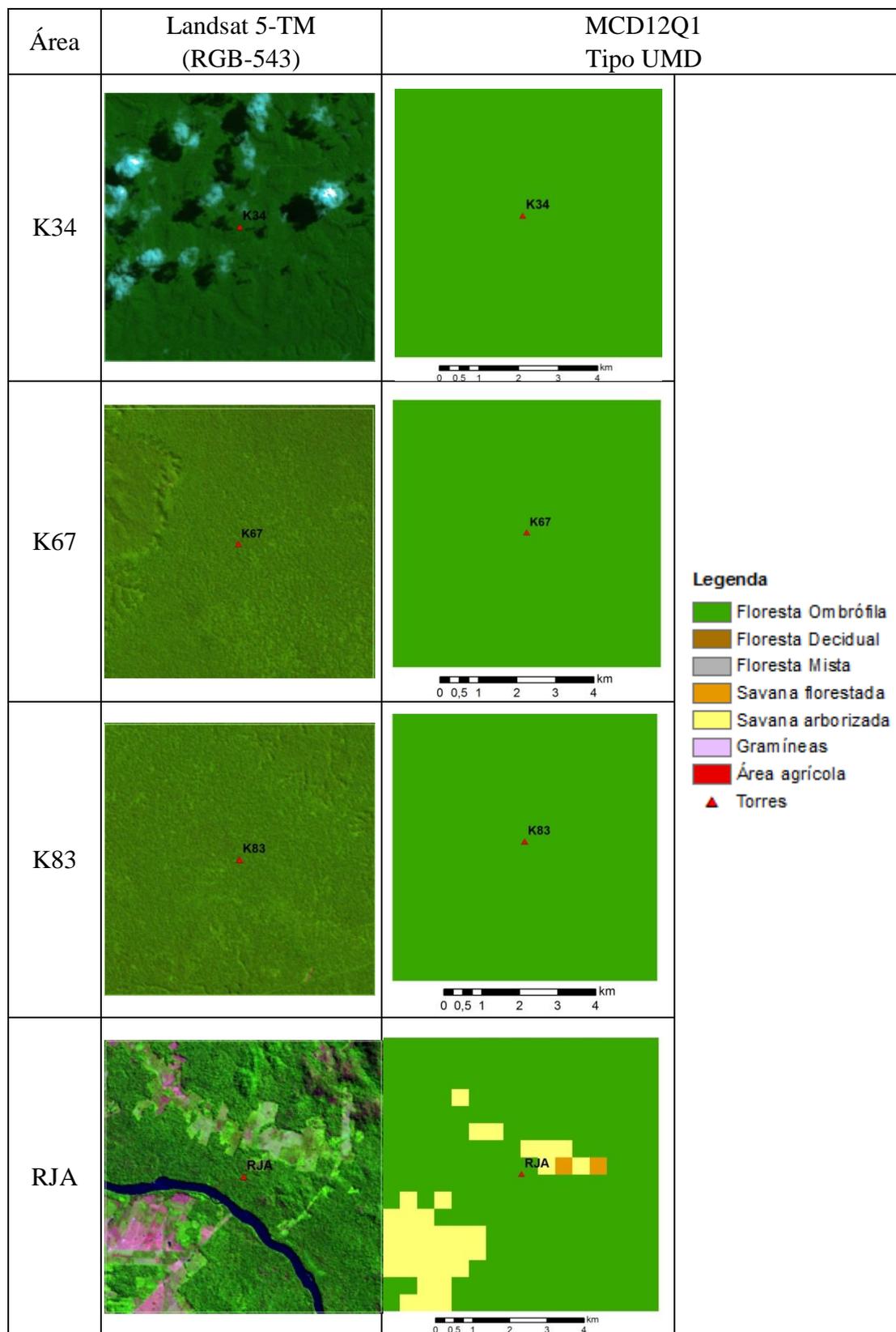


Figura 1. Imagens Landsat 5-TM e produto MCD12Q1 UMD para as áreas de floresta.

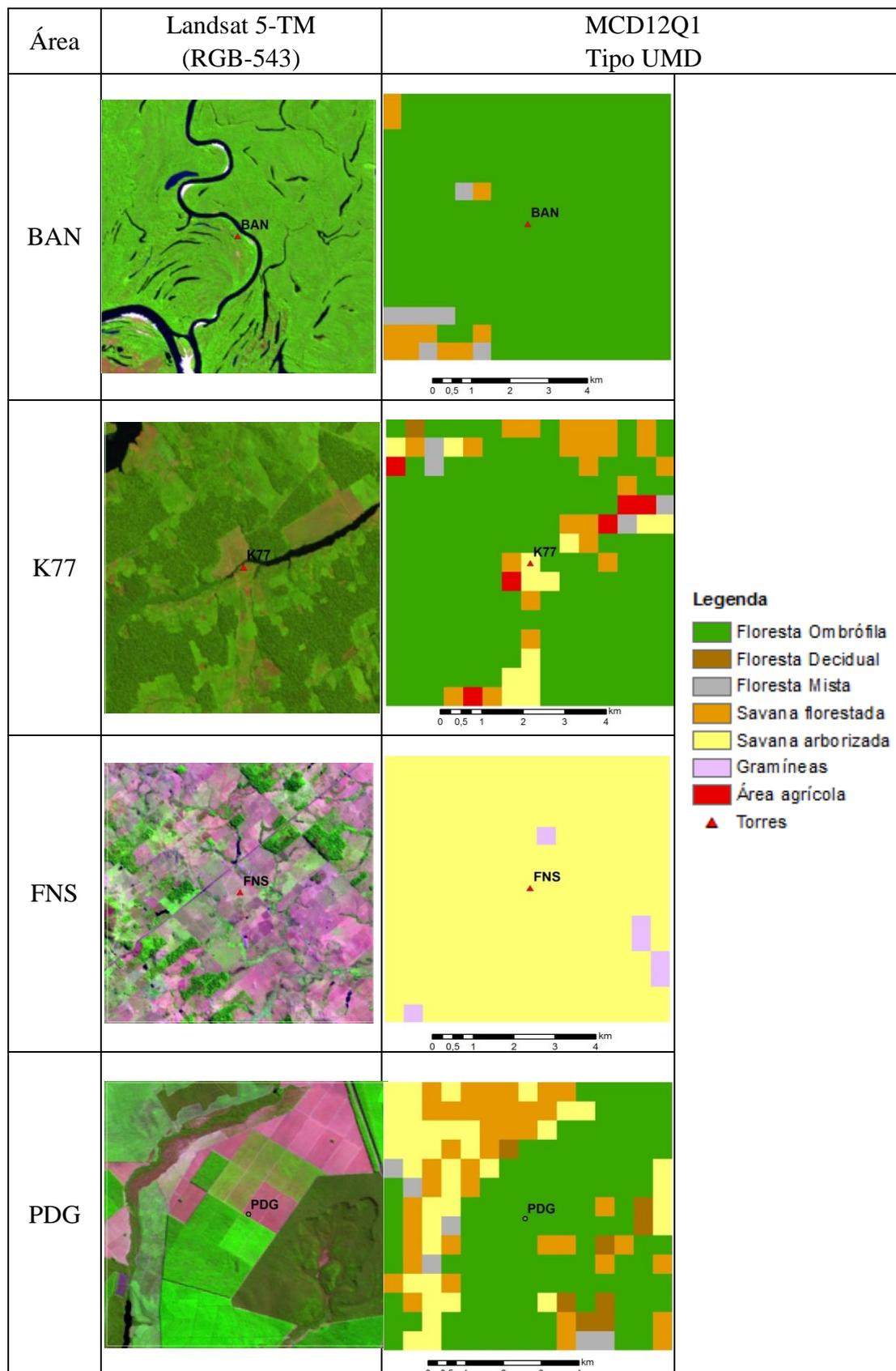


Figura 2. Comparação entre a imagem Landsat 5-TM e a classificação do MCD12Q1 UMD para as áreas de ecótono (BAN), plantio agrícola (K77), pastagem (FNS) e cerrado (PDG).

Tabela 1. Matriz de confusão tendo como referência imagens Landsat 5/TM a serem comparadas com as imagens classificadas do MCD12Q1 de 2004.

		TM/Landsat 5					
		FO	SF	SA	Agr	Gram	TOTAL
MCD12Q1	FO	52	2	0	6	0	60
	SF	3	1	0	0	0	4
	SA	1	0	0	3	9	13
	Agr	0	0	0	0	0	0
	Gram	0	0	0	0	1	1
	TOTAL	56	3	0	9	10	78

A Tabela 2 mostra o erro relativo médio da GPP do MOD17A2 e da GPP estimada pelo mesmo algoritmo, porém variando suas variáveis de entrada relativas à cobertura da terra. O erro foi calculado em relação à GPP medida em superfície pelas torres (GPP_Sup). A Figura 3 mostra o boxplot dessas diferentes estimativas de GPP, para cada área estudada. A partir desses resultados é possível perceber que o MOD17A2 apresenta um erro considerável em relação às medidas de superfície, subestimando a GPP nas áreas K34, K67, K83, RJA, BAN e FNS e superestimando nas áreas K77 e PDG. Ao calcular a GPP utilizando os dados meteorológicos da torre e utilizando as mesmas coberturas da terra que as estimativas de GPP_MOD, somente foi observada uma diminuição considerável do erro nas áreas RJA, FNS e K77.

Ao calcular a GPP variando a cobertura da terra (GPP_FO, GPP_SF, GPP_SA, GPP_Agr e GPP_Gram), observou-se uma variação do erro. De maneira geral, as maiores diferenças nas estimativas de GPP foram observadas entre as classes de floresta ombrófila (GPP_FO) e gramínea (GPP_Gram), de maneira que uma confusão entre essas classes produziria um maior erro de estimativa da GPP. Confusões entre as classes de savana florestada ou arborizada com as classes de áreas agrícolas ou pastagens também causam uma variação considerável no erro (cerca de $1 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ em RJA e $0,6 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ em K77, por exemplo). Apesar da variação da cobertura da terra representar variações nas estimativas de GPP, podendo ser uma fonte de incerteza, todas as estimativas apresentaram um erro considerável em relação às medidas de superfície, não representando uma melhora significativa na estimativa da GPP. Isso pode indicar que o modelo MOD17A2 não é adequado para estimar GPP nos biomas Amazônia e Cerrado ou que os erros devido a outras variáveis, como a FPAR, ou dos parâmetros tabelados é bem maior do que o erro acrescentado pela cobertura da terra.

Tabela 2. Erro médio (%) de cada estimativa de GPP relativo à GPP de superfície.

Local	Erro relativo médio (%)						
	MOD	UMD	FO	SF	SA	Gram	Agr
K34	-32,00	-34,80	-34,10	-38,20	-40,03	-55,58	-46,70
K67	-22,19	-34,18	-33,95	-36,60	-38,34	-55,57	-46,24
K83	-16,65	-31,64	-31,03	-35,13	-37,00	-53,83	-44,41
RJA	-31,20	-7,49	-6,69	-11,80	-14,37	-37,02	-24,26
BAN	-33,20	-25,84	-24,72	-30,47	-33,52	-42,22	-33,72
FNS	-47,83	-35,97	-32,46	-34,95	-36,78	-54,04	-44,54
K77	307,38	286,78	331,50	305,73	294,08	188,36	247,32
PDG	132,50	148,70	157,26	135,27	126,57	82,65	113,87

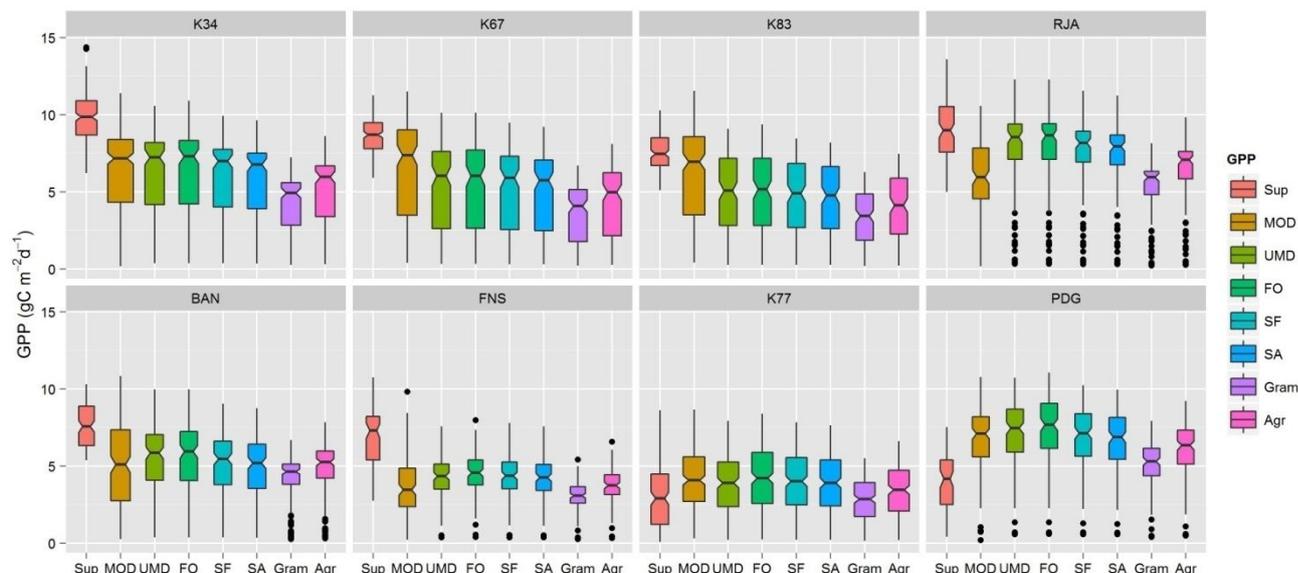


Figura 3. Boxplot das oito estimativas de GPP para cada área.

4. Conclusões

Verificou-se que o produto de cobertura da terra MCD12Q1 tipo UMD não classificou bem áreas heterogêneas, apresentando confusão principalmente entre áreas antropizadas e savana. A utilização de produtos de cobertura da terra de melhor resolução espacial pode ser uma alternativa para melhorar o desempenho desta variável.

Variações da cobertura da terra no modelo MOD17A2 introduziram incertezas na estimativa de GPP. No entanto, é possível que outras variáveis de entrada do modelo provoquem erros ainda maiores, pois a mudança da parametrização relacionada a cobertura da terra não foi suficiente para diminuir os erros de estimativa, que permaneceram altos. Sendo assim, o produto MOD17A2 apresentou problemas em áreas heterogêneas para estimar GPP no bioma Amazônia e Cerrado, sendo necessário que se investiguem outras fontes de erro além da cobertura da terra para que se possa melhorar às estimativas desse modelo.

Agradecimentos

À Maria Isabel Sobral Escada, pelo apoio científico; ao CNPq, pela concessão de bolsa; aos pesquisadores do LBA, por disponibilizarem os dados de superfície.

Referências Bibliográficas

- Beer, C. et al. Terrestrial Gross Carbon Dioxide Uptake: Global Distribution and Covariation with Climate. *Science*, v.329, n.5993, p.834-838, 2010.
- Falge, E. et al. Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.113, n.1-4, p.53-74, 2002.
- Friedl, M. A.; Sulla-Menashe, D.; Tan, B.; Schneider, A.; Ramankutty, N.; Sibley, A.; Huang, H. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment*, v.114, p.168-182, 2010.
- Monteith, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, v.9, n.3, p.747-766, 1972.
- Running, S. W.; Zhao, M. User's guide, Daily GPP and Annual NPP (MOD17A2/A3) Products. NASA EOS MODIS land algorithm. 2015. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod17a2h_v006> Acesso em: 15.ago.2016.
- Sakai, R. K. et al. Land-use change effects on local energy, water, and carbon balances in an Amazonian agricultural field. *Global Change Biol.*, v.10, n.5, p.895-907, 2004.
- Von Randow, C. et al. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. *Theor. Appl. Climatol.*, v.78, n.1, p.5-26, 2004.