



Estudo da Produtividade Primária do Bioma Mata Atlântica via Sensoriamento Remoto
Study of Primary Productivity of the Mata Atlântica Biome via Remote Sensing

Célia Maria Paiva & Fernanda Rafaela Fernandes

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências - Departamento de Meteorologia.

Av. Athos da Silveira Ramos, s/n – Bloco H, Sala G1-016 – Cidade Universitária, Ilha do Fundão, 21941-916, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

E-mails: celia@lma.ufrj.br; fernandarafaela@yahoo.com.br

Recebido em: 10/08/2014 Aprovado em: 01/12/2015

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2015_2_05_14

Resumo

As técnicas de sensoriamento remoto tem sido amplamente utilizadas para estimar a produtividade primária de regiões extensas do planeta e tem se mostrado uma ferramenta muito útil que oferece resultados satisfatórios. Devido a essa constatação, o presente trabalho tem como objetivo estimar e identificar os padrões espaciais e temporais (sazonal, anual e interanual) da produtividade primária líquida do bioma Mata Atlântica via sensoriamento remoto. Para isso, foram utilizados dados do produto MOD17A2 do sensor MODIS e dados meteorológicos de temperatura do ar e de precipitação de uma Estação Meteorológica Convencional do Instituto Nacional de Meteorologia localizada na região de estudo. Os dados orbitais utilizados possuem uma resolução espacial de 1 km e temporal de 8 dias. O período estudado compreende os anos de 2002 a 2011. Os resultados encontrados permitiram concluir que a produtividade primária líquida apresentou um valor mínimo durante o inverno (19,6 % do total do período) e um máximo na transição entre a primavera e o verão (30,1 % do total do período). Em relação à fixação de carbono na região estudada foi observado que a fixação anual compensou a emissão. Concluiu-se também que durante todo o período estudado o balanço do carbono foi ligeiramente negativo. No entanto foi observada uma tendência crescente de fixação de carbono entre o período de 2003 e 2011.

Palavras-chave: Sequestro de Carbono; MOD17A2; Clima

Abstract

The remote sensing techniques have been widely used to estimate the primary productivity of large regions on the planet, and have proved a very useful tools and satisfactory results. Therefore, the present work aims to estimate and identify the spatial and temporal (seasonal, annual and inter-annual) patterns of the primary productivity on Mata Atlântica biome by remote sensing. Therefore, data from product MOD17A2 of MODIS sensor and meteorological data of air temperature and precipitation from the meteorological station of the National Institute of Meteorology located in the study areawere used. The orbital data have a spatial resolution of 1 km and a temporal resolution of 8 days. The study period covers the years 2002-2011. The net primary productivity showed a minimum value during the winter (19,6 % of the total study period) and a maximum value in the transition between spring and summer (30,1 % of the total study period). In relation to carbon sequestration in the studied region was observed that fixation offset the annual emissions. It was also concluded that during the period studied the carbon balance was slightly negative. However, was a trend of increasing carbon sequestration in the period 2003-2011.

Keywords: Sequester of Carbon; MOD17A2; Climate

1 Introdução

No funcionamento de ecossistemas e biomas, as trocas entre a biosfera e a atmosfera ocorrem principalmente mediante a assimilação do carbono atmosférico no processo fotossintético e a perda de água absorvida pela vegetação no processo de transpiração (Sellers *et al.*, 1997). A taxa em que produtores de um ecossistema convertem energia solar em energia química, através da fotossíntese, na forma de biomassa é a produtividade primária bruta (Miller, 2007). Essa propriedade biofísica pode fornecer informações sobre o estado de equilíbrio ou desequilíbrio de um ecossistema. Está, também, relacionada com o clima e sua variabilidade sazonal, anual e interanual (Bonan, 2008; Eagleson, 2005; Laroca, 1995; Miller, 2007; Rizzini, 1997).

A Mata Atlântica ocupa uma área de 1.110.182 km², que corresponde a 13,04% do território nacional, sendo constituída em sua maioria por mata ao longo da costa litorânea que vai do Rio Grande do Norte ao Rio Grande do Sul. Atualmente existem apenas 10% da área da Mata Atlântica original. O restante foi totalmente destruído pelo homem. Hoje, cerca de 75% do que restou está sob risco de extinção total. Devido a isso há uma necessidade de que atitudes urgentes sejam tomadas para a preservação desse bioma (IBF, 2013).

O primeiro passo para a preservação dos biomas é conhecer a estrutura e o funcionamento dos ecossistemas. Nesse sentido, conhecer o padrão espacial e temporal da produtividade primária do bioma da Mata Atlântica pode fornecer informações sobre seu estado de conservação e seu papel no sequestro de carbono. Portanto, a produtividade primária é de fundamental importância nos estudos de mudanças climáticas, por estar diretamente relacionada ao carbono efetivamente extraído da atmosfera pelos diferentes ecossistemas terrestres (Monteith, 1972; Thangata & Hildebrand, 2010).

Devido à considerável extensão territorial dos biomas e ecossistemas brasileiros, identificou-se as técnicas de Sensoriamento Remoto (SR) como medidas e métodos passíveis de aplicabilidade para o estudo desses sistemas ambientais (Bastiaanssen & Ali, 2003; García *et al.*, 2010; Gitelson *et al.*, 2008; Hilker *et al.*, 2008; Jin, 2013; Kalfas *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2007; Running *et al.*, 2000; Sims *et al.*, 2008; Turner *et al.*, 2006; Wu *et al.*, 2009;

Xiao *et al.*, 2004; Zhao *et al.*, 2005). Dessa forma, pode-se implementar a abordagem multiespacial e multitemporal necessária ao entendimento de um conjunto de processos e interações percebidas em diferentes escalas de espaço e tempo.

Este trabalho tem como objetivos estudar a produtividade primária e o sequestro de carbono de uma porção do bioma Mata Atlântica situada no Parque Nacional Floresta da Tijuca via técnicas de sensoriamento remoto durante o período de 2002 a 2011.

2 Materiais e Métodos

2.1 Área de Estudo

Para este estudo, foi selecionada uma área não degradada do bioma Mata Atlântica no Parque Nacional Floresta da Tijuca que se encontra na cidade do Rio de Janeiro (Figura 1), entre as coordenadas 22°56'14" S/43°18'50" O e 22°58'42" S/43°17'7" O.

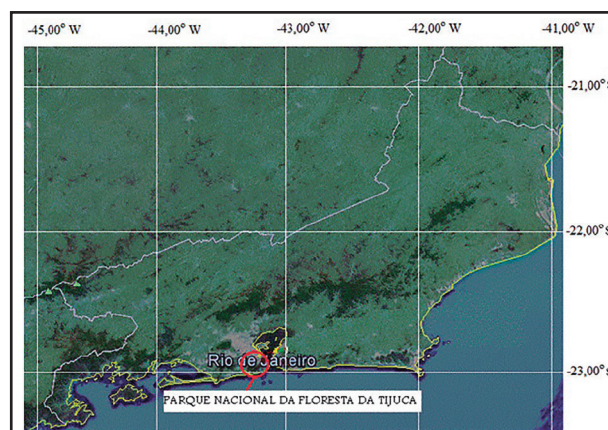


Figura 1 Área de estudo: Parque Nacional Floresta da Tijuca – Rio de Janeiro (Google, 2014).

A cidade do Rio de Janeiro tem clima classificado como Tropical Quente e Úmido com um a três meses secos (IBGE, 2002). Segundo as Normas Climatológicas (INMET, 2009), a temperatura média anual e a precipitação total anual são iguais a 23,8°C e 1069,4 mm, respectivamente. A temperatura ao longo do ano varia entre 21,3°C em julho e 26,6°C em fevereiro. A precipitação concentra-se nos meses de verão com um total pluviométrico igual a 401,7 mm entre dezembro e fevereiro. O inverno corresponde ao período menos chuvosos com precipitação total igual a 129,1 mm nos meses de junho a agosto.

2.2 Dados Utilizados

Foram utilizados dados do produto MOD17A2 do sensor MODIS referente ao período de 2002 a 2011 do setor H13V11 da superfície terrestre que corresponde ao Estado do Rio de Janeiro. Esse produto disponibiliza a cada oito dias imagens de Produtividade Primária Bruta e Líquida de Ecossistemas Terrestres para todo o globo.

Dados meteorológicos de temperatura do ar e de precipitação da Estação Meteorológica Convencional do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada nas coordenadas 22,89° S e 43,18° O (Estação Rio de Janeiro – RJ/OMM: 83743), foram utilizados no estudo do comportamento da produtividade primária líquida.

2.3 Estimativa da Produtividade Primária Líquida

O Sistema de Observação da Terra (EOS - Earth Observing System) da Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço (NASA - National Aeronautics and Space Administration) Norte Americana, produz regularmente estimativas de Produtividade Primária Líquida (PPL) para toda a superfície terrestre com resolução espacial de 1 km e temporal de 8 dias (Running *et al.*, 2000; Thornton *et al.*, 2002). Tais estimativas são geradas por um algoritmo que processa os dados do Espectroradiômetro de Imagem de Resolução Moderada (MODIS - The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) abordo dos satélites Aqua e Terra, gerando os produtos MOD17A2/A3 (MOD17 User's Guide, 2003), armazenados no Centro de Arquivos Ativos Distribuídos (DAAC - Distributed Active Archive Center) da NASA.

A PPL é estimada segundo os passos descritos a seguir (MOD17 User's Guide, 2003):

$$PPL = PPB - RM \quad (1)$$

em que,

PPL: Produtividade Primária Líquida em [kg C.m⁻²];

PPB: Produtividade Primária Bruta em [kg C.m⁻²];

RM: Respiração de Manutenção em [kg C.m⁻²].

$$PPB = \varepsilon \times APAR \quad (2)$$

em que,

ε : Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa ou comumente denominada de uso da luz em [kg C.MJ⁻¹] segundo Monteith (1972);

APAR: Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida pela vegetação em [MJ.m⁻²];

$$\varepsilon = \varepsilon_{max} \times T_{escalar} \times DPV_{escalar} \quad (3)$$

em que,

ε_{max} : Eficiência máxima de conversão da radiação fotossinteticamente ativa ou comumente denominada de uso da luz em [kg C.MJ⁻¹]. Os valores para cada tipo de vegetação são obtidos no banco de dados de Parâmetros dos Biomas (BPLUT - Biome Parameter Look-Up Table) acessado pelo algoritmo do produto MOD17A2;

$T_{escalar}$: Fator de atenuação de ε_{max} em função de dois valores extremos de temperatura do ar para os quais $\varepsilon = \varepsilon_{max}$ e $\varepsilon = 0$, denominados (T_{max}) e (T_{min}), respectivamente; T_{max} representa o valor de temperatura do ar em [°C] que permite que ε alcance seu valor máximo; e T_{min} representa o valor de temperatura do ar em [°C] que faz com que ε seja igual a zero; $T_{escalar}$ assume valores entre 0 e 1, para valores de temperatura do ar entre T_{min} e T_{max} , respectivamente, sendo uma função linear diretamente proporcional à temperatura do ar ao longo do dia;

$DPV_{escalar}$: Fator de atenuação de ε_{max} em função de dois valores extremos de déficit de pressão de vapor (*DPV*) para os quais $\varepsilon = \varepsilon_{max}$ e $\varepsilon = 0$, denominados (DPV_{min}) e (DPV_{max}), respectivamente; DPV_{min} representa o valor de *DPV* em [Pa] que permite que ε alcance seu valor máximo; e DPV_{max} representa o valor de *DPV* em [Pa] que faz com que ε seja igual a zero; $DPV_{escalar}$ assume valores entre 0 e 1, para valores de *DPV* entre DPV_{min} e DPV_{max} , respectivamente, sendo uma função linear inversamente proporcional ao *DPV* ao longo do dia; Esses valores refletem a influência da temperatura do ar e do *DPV* no comportamento da eficiência do uso da luz (ε), enquanto fatores limitantes desse

processo (Figura 2). Os valores de T_{min} , T_{max} , DPV_{min} e DPV_{max} para cada tipo de vegetação são obtidos no BPLUT.

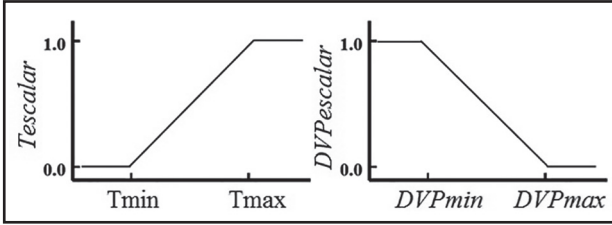


Figura 2 Gráfico da função linear entre os fatores de atenuação da eficiência do uso da luz, $T_{escalar}$ e $DPV_{escalar}$, e a temperatura do ar e DPV .

$$APAR = PAR \times fPAR \quad (4)$$

em que,

$APAR$: Radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação em $[MJ.m^{-2}]$;

PAR : Radiação fotossinteticamente ativa incidente na vegetação em $[MJ.m^{-2}]$;

$fPAR$: Fração da PAR absorvida pela vegetação em $[MJ.m^{-2}]$; disponibilizada pelo produto MOD15 (Knyazikhin *et al.*, 1999).

$$PAR = R_g \times 0,45 \quad (5)$$

em que,

R_g : Radiação solar global incidente na vegetação em $[MJ.m^{-2}]$; dado disponibilizado no banco de dados meteorológico de larga escala da NASA, com resolução de 1° por $1,25^\circ$.

$$RM = RM_{folha} + RM_{raiz} \quad (6)$$

$$RM_{folha} = Massa_{folha} \times RM_{basal_{folha}} \times PCR^{(T-20/10)} \quad (7)$$

$$Massa_{folha} = IAF/PAF \quad (8)$$

$$RM_{raiz} = Massa_{raiz} \times RM_{basal_{raiz}} \times PCR^{(T-20/10)} \quad (9)$$

$$Massa_{raiz} = Massa_{folha} \times (C_{raiz}/C_{folha}) \quad (10)$$

em que,

RM : Respiração de manutenção em $[kg C.m^{-2}]$;

RM_{folha} : Respiração de manutenção das folhas em $[kg C.m^{-2}]$;

RM_{raiz} : Respiração de manutenção das raízes em $[kg C.m^{-2}]$;

$Massa_{folha}$: Massa das folhas $[kg]$;

$RM_{basal_{folha}}$: Respiração de manutenção basal das folhas em $[kg C.kg C^{-1}]$ a $20^\circ C$; obtido no BPLUT;

PCR : Parâmetro de controle da respiração em função da temperatura média do ar; obtido no BPLUT;

T : Temperatura média do ar $[^\circ C]$; dado disponibilizado no banco de dados meteorológicos de larga escala da NASA, com resolução de 1° por $1,25^\circ$;

IAF : Índice de área foliar $[m^2.m^{-2}]$; obtido pelo produto MOD15;

PAF : Projeção da área foliar por unidade de massa $[kg^{-1}]$; obtido no BPLUT;

$Massa_{raiz}$: Massa das raízes $[kg]$;

$RM_{basal_{raiz}}$: Respiração de manutenção basal das raízes em $[kg C.kg C^{-1}]$ a $20^\circ C$; obtido no BPLUT;

C_{raiz}/C_{folha} : Razão entre o Carbono nas raízes e nas folhas; obtido no BPLUT.

Para fins de comparação, é preciso transformar a $Pnet_{Total}$ anual obtida neste estudo para a mesma unidade usada na literatura, ou seja, $g.C.m^{-2}$. Essa transformação é feita multiplicando-se cada valor por 1000 e dividindo por 15, tendo em vista que a área de estudo abrange 15 pixels. Em cada pixel, tem-se o valor médio de $Pnet$ em $kg.C.m^{-2}$. A soma dos 15 pixels fornece o valor total da área de interesse em $kg.C$. Portanto, quando divide-se esse valor total por 15, tem-se o valor médio da $Pnet$ por pixel em $kg.C.m^{-2}$.

2.3.1 Estudo do Comportamento Sazonal e Anual da Produtividade Primária Líquida

A Temperatura e a precipitação são consideradas como os aspectos mais importantes do clima para a produtividade primária líquida dos ecossistemas (Krohne, 2001; Odum & Barret, 2011; Townsend *et al.*, 2010). Portanto, o comportamento sazonal e anual da produtividade primária líquida foi investigado e relacionado às variáveis meteorológicas temperatura do ar e precipitação, variáveis que mais influenciam esse fenômeno, na tentativa de se apontar a participação de cada uma delas no comportamento da produtividade.

Foram empregados a análise de regressão e os testes não-paramétricos de Mann-Kendall e do coeficiente de Spearman para uma avaliação de tendência das séries de dados de Pnet_Total anual, temperatura do ar média anual e precipitação total anual (Sneyers, 1990; Back, 2001).

2.3.2 Estimativa do Sequestro de Carbono Anual

O sequestro de carbono anual será estimado a partir da diferença entre a produtividade primária líquida total anual de dois anos consecutivos, ou seja:

$$SeqC_{Anual_Anoj+1} = (PnetTotal_{Anoj+1} - PnetTotal_{Anoj}) \times 0,5 \quad (11)$$

em que,

$SeqC_{Anual}$: representa o carbono absorvido ou fixado pela vegetação, ou seja, a quantidade retirada da atmosfera em $[kg.C.m^{-2}]$, considerando-se que metade do peso seco (Pnet) da vegetação é constituída de carbono (Fernandes *et al.*, 2007; García *et al.*, 2010; Leles, 1995; Reis *et al.*, 1994; Husch, 2001; Thangata & Hildebrand, 2010); e $PnetTotal_{Ano}$: obtida pelo produto MOD17A2.

3 Resultados e Discussão

3.1 Valores Totais Mensais e Anuais da Produtividade Primária Líquida

Na Tabela 1 estão listados os valores totais mensais e anuais da Produtividade Primária Líquida ($Pnet_Total$) para o período investigado (2002-2011) obtidos na área de estudo.

Na Figura 3, tem-se os totais mensais da produtividade líquida ($Pnet_Total$) e a temperatura média mensal. Assim, pode-se classificar cada mês do ano de acordo com esses valores de produtividade. Dessa forma, o período de outubro a janeiro foi o de maior produtividade com valores entre 37,3 g.C e 46,4 g.C, representando 9,1% e 11,3% da $Pnet_Total$ anual, respectivamente. Já entre março e abril e em agosto e setembro, a produtividade assumiu valores intermediários entre 31,5 g.C e 37,0 g.C, representando 7,7% e 9,0% da $Pnet_Total$ anual, respectivamente. Por fim, os meses com menores produtividades foram os de fevereiro, junho e julho, quando a produtividade variou entre 21,2 g.C e 28,7 g.C, representando 5,2% e 7,0% da $Pnet_Total$ anual, respectivamente.

Da mesma forma, pode-se classificar os meses de acordo com seus totais pluviométrico e suas

Pnet_Total [kg.C]														
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Mínimo	Mediana	Máximo	Total
Jan	4,82	5,59	5,36	2,18	2,67	4,30	4,05	4,04	2,28	4,08	2,18	4,07	5,59	39,37
Fev	3,12	4,44	2,84	2,75	2,27	2,96	3,56	3,30	1,11	2,31	1,11	2,90	4,44	28,66
Mar	5,05	4,44	4,71	3,23	3,16	2,37	4,03	2,93	3,21	3,65	2,37	3,44	5,05	36,78
Abr	3,57	3,41	2,70	3,16	3,03	2,63	2,99	3,63	3,02	3,34	2,63	3,10	3,63	31,48
Mai	3,15	2,54	2,23	2,49	1,75	3,15	2,97	6,94	3,25	3,76	1,75	3,06	6,94	32,23
Jun	1,97	2,83	1,88	1,70	2,29	1,94	2,68	2,83	3,21	4,27	1,70	2,49	4,27	25,60
Jul	2,40	1,97	2,12	1,84	1,82	2,20	2,26	2,32	1,98	2,30	1,82	2,16	2,40	21,21
Ago	4,64	3,45	3,38	2,47	2,31	3,33	3,10	3,21	3,71	3,62	2,31	3,36	4,64	33,22
Set	3,88	4,22	2,48	2,83	3,45	4,08	3,52	3,72	3,74	5,05	2,48	3,73	5,05	36,97
Out	2,11	4,12	2,46	2,37	5,24	3,84	5,00	3,87	6,01	4,95	2,11	4,00	6,01	39,97
Nov	5,56	5,76	3,29	3,75	5,18	4,54	5,15	3,66	5,78	3,75	3,29	4,85	5,78	46,42
Dez	5,50	3,67	3,66	3,23	2,53	3,51	3,23	4,33	3,10	4,55	2,53	3,59	5,50	37,31
Mínimo	1,97	1,97	1,88	1,70	1,75	1,94	2,26	2,32	1,11	2,30	1,11			21,21
Mediana	3,73	3,90	2,77	2,62	2,60	3,24	3,38	3,65	3,21	3,76		3,31		35,00
Máximo	5,56	5,76	5,36	3,75	5,24	4,54	5,15	6,94	6,01	5,05			6,94	46,42
Total	45,77	46,44	37,11	32,00	35,70	38,85	42,54	44,78	40,40	45,63	32,00	41,47	46,44	409,22

Tabela 1 Valores totais mensais e anuais da Produtividade Primária Líquida ao longo do período estudado.

temperaturas médias (Figuras 3 e 4). Assim, tem-se um período úmido, entre outubro e abril, representando entre 11,3% e 15,9% do total pluviométrico anual (120,3 mm e 169,2 mm, respectivamente). Por outro lado, os meses mais secos foram os de fevereiro e de maio a setembro, representando entre 5,2% e 7,7% do total pluviométrico anual (33,2 mm e 94,8 mm, respectivamente). Por sua vez, os meses mais quentes ocorreram entre dezembro e abril, com temperaturas médias entre 26,3°C e 28,7°C. Temperaturas amenas ocorreram nos meses de outubro e novembro, com médias entre 24,7°C e 25,8°C. Os meses mais frios foram os de maio e setembro, com temperaturas médias entre 22,4°C e 23,7°C.

Pode-se observar que, ao longo do ano, existe um decréscimo da Pnet_Total a partir do mês de janeiro, com valores mínimos nos meses de junho e julho iguais a 21,2 g.C e 25,6 g.C, respectivamente. A partir de agosto até o mês de janeiro há um aumento, sendo que os maiores valores anuais de 40,0 g.C e 46,42 g.C ocorrem nos meses de outubro e novembro, respectivamente. Os meses de junho e julho tiveram temperaturas entre 22,8°C e 22,4°C (menores médias anuais), respectivamente. Os índices pluviométricos estão entre os menores do ano, entre 43,6 mm e 59,0 mm ou 4,1% e 5,6% da precipitação total anual, respectivamente. Por outro lado, os meses de outubro e novembro tiveram índices pluviométricos entre os maiores do ano, iguais a 127,5 mm e 147,7 mm ou 12,0% e 13,9% da precipitação total anual e temperaturas entre 24,7°C e 25,8°C (em torno da média anual, igual a 25,3°C), respectivamente.

Uma análise sazonal indica maiores valores de produtividade ocorrendo na primavera (123,4 g.C), diminuindo gradativamente no verão (105,3 g.C) e outono (100,5 g.C) até atingir seu valor mínimo no inverno (80,0 g.C). Os índices pluviométricos desses períodos representam 27,6%, 34,6%, 26,8% e 11,0% da precipitação total anual, respectivamente. Por sua vez, as temperaturas médias foram iguais a 24,7°C, 27,9°C, 25,9°C e 22,8°C, respectivamente.

Em relação às épocas úmida e seca, observa-se uma maior produtividade no período úmido, de outubro a abril com 231,3 g.C que representa 56,5% da Pnet_Total anual. Por outro lado, a menor produtividade ocorreu na época seca entre os meses de maio e setembro com 149,2 g.C, representando

36,5% da Pnet_Total anual. Vale ressaltar que fevereiro foi considerado um mês seco, embora esteja situado entre meses da estação úmida, estando sua produtividade entre as menores do ano (28,7 g.C).

Portanto, temperaturas mais baixas e menor precipitação podem estar atuando como fatores limitantes da produtividade. Por outro lado, as maiores produtividades se deram nos meses mais úmidos e com temperaturas amenas. Esse comportamento fica bem evidenciado pelo padrão sazonal da Pnet_Total, da precipitação e da temperatura (Figuras 3 e 4).

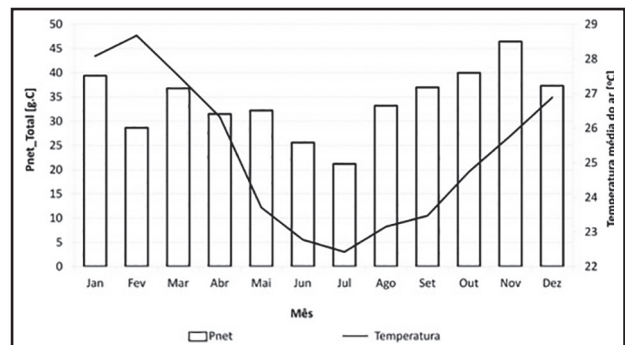


Figura 3 Variação da Pnet_Total mensal e da temperatura média mensal no período de 2002 a 2011.

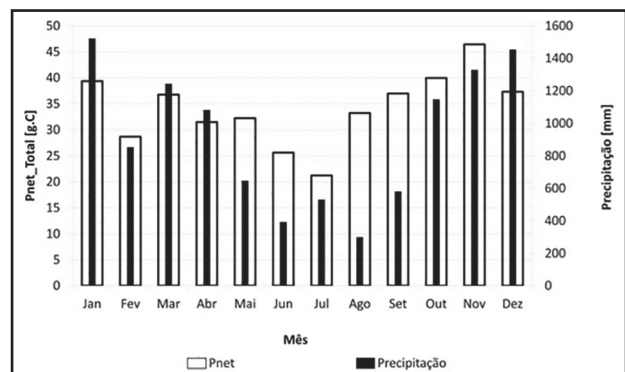


Figura 4 Variação da Pnet_Total mensal e da precipitação total mensal no período de 2002 a 2011.

De acordo com a Tabela 1 e as Figuras 5 e 6, o ano menos produtivo foi o de 2005 (32,00 kg.C) e o mais produtivo foi 2003 (46,44 kg.C), mas não estão relacionados aos menores e maiores valores de temperatura e precipitação do período, tendo em vista que nesses dois anos as magnitudes dessas grandezas foram muito próximas entre si. Em relação à temperatura, a diferença entre esses dois anos foi de 0°C e para a precipitação foi de apenas 9,3 mm. A Pnet_Total anual apresentou um valor mediano de 41,47 kg.C, com total igual a 409,22 kg.C para todo

o período de estudo. Esses resultados estão de acordo com os citados na literatura que atribuem valores entre 1000 e 3500 g.C.m⁻², com média igual a 2200 g.C.m⁻², para a Pnet_Total anual dos ecossistemas do tipo da Floresta da Tijuca, ou seja, floresta tropical úmida (Odum & Barret, 2011).

Para fins de comparação, transformou-se a Pnet_Total anual obtida neste estudo para a mesma unidade usada na literatura, ou seja, g.C.m⁻², conforme demonstrado na metodologia. Assim, os valores extremos e o mediano iguais a 32,00 kg.C, 46,44 kg.C e 41,47 kg.C passam a ser iguais a 2133,33 g.C.m⁻², 3096 g.C.m⁻² e 2764,67 g.C.m⁻², respectivamente. Estando, portanto, na faixa esperada para o ecossistema em questão.

Durante o período de estudo, a análise de regressão indicou um aumento discreto da Pnet_Total anual (0,1793 kg.C/ano). Por sua vez, a temperatura média anual e a precipitação total anual apresentaram diminuições discretas (-0,0045°C/ano e -3,6467 mm/ano, Figuras 5 e 6, respectivamente). Entretanto, esse comportamento tem pouca significância estatística, tendo em vista os baixos coeficientes de determinação obtidos pela regressão linear, igual a 0,01 para a Pnet_Total e a 0,00 para ambas as séries de temperatura do ar e precipitação. O teste não-paramétrico de Mann-Kendall também apontou ausência de tendências nas séries anuais de dados de Pnet_Total, temperatura e precipitação. A hipótese nula de ausência de tendência foi aceita com um nível de significância de 0,05, ou seja, $\alpha_1 = 0,00 < \alpha_0 = 0,05$.

Em relação a fixação de carbono (Figura 7), a porção da Floresta da Tijuca considerada neste estudo, comportou-se como sumidouro nos meses de janeiro, março, maio e entre agosto e novembro. Os valores fixados variaram entre 0,38 kg.C em maio e 6,01 kg.C em agosto. Nos demais meses, a área em questão comportou-se como uma fonte. Os valores emitidos variaram entre -2,20 kg.C em julho e -5,36 em fevereiro. Anualmente a fixação compensou a emissão, ou seja, o balanço anual foi igual a zero.

Nos meses mais secos (fevereiro e de maio a setembro), a área em estudo comportou-se como fonte, emitindo um total igual a -2,61 g.C. Por outro lado, nos meses mais úmidos a absorção foi igual a quantidade emitida nos meses mais secos (2,61 g.C), zerando o balanço anual, como já mencionado.

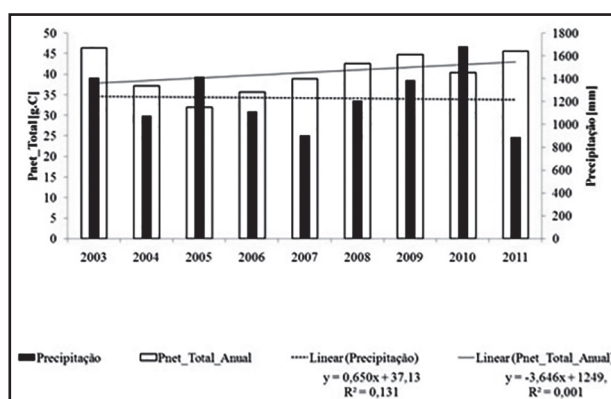


Figura 5 Variação da Pnet_Total e da precipitação total anual durante o período de 2002 a 2011.

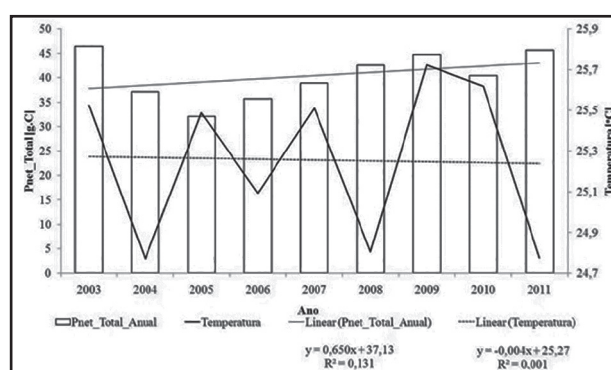


Figura 6 Variação da Pnet_total anual e da temperatura do ar média anual durante o período de 2002 a 2011.

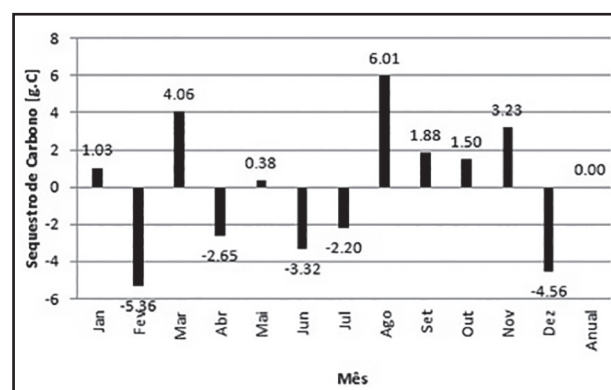


Figura 7 Fixação de carbono mensal e total anual no período de 2002 a 2011.

Durante o verão, de dezembro a fevereiro, houve uma emissão total de -8,89 g.C. Nas demais estações houve uma absorção total de 1,79 g.C (outono), 0,49 g.C (inverno) e 6,61 g.C (primavera). Dessa forma, nos períodos úmidos e com temperaturas amenas, como a primavera, houve absorção de carbono. Já nos mais frios e secos, como o inverno, houve emissão. Nos meses mais quentes e úmidos, como o verão, as emissões foram consideráveis.

Em relação a todo o período estudado (Figura 8), o balanço foi ligeiramente negativo (-0,07 kg.C), ou seja a área comportou-se como uma discreta fonte de carbono para a atmosfera. Na escala interanual, a área comportou-se como sumidouro nos anos de 2003, de 2006 a 2009 e em 2011. Nesses anos a fixação de carbono variou entre 0,34 kg.C em 2003 e 2,62 kg.C em 2011. Nos demais anos a área comportou-se como uma fonte, emitindo entre -2,19 kg.C em 2010 e -4,67 g.C em 2004.

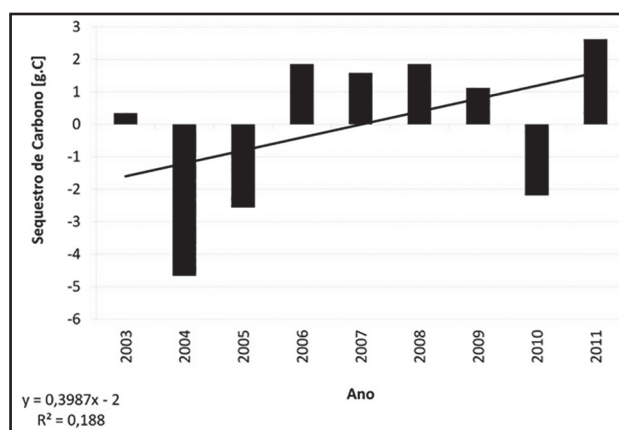


Figura 8 Variação interanual da fixação de carbono.

No entanto, observa-se uma crescente fixação de carbono entre os anos de 2003 e 2011, partindo de valores negativos, migrando para os positivos e chegando ao maior valor de fixação obtido no fim do período. Por outro lado, o teste não paramétrico de Mann-Kendall indica a ausência de tendência ($\alpha_1 = 0,046 < \alpha_0 = 0,05$). Entretanto, devido ao valor muito próximo de α_1 e α_0 , realizou-se outro teste não paramétrico para confirmação do resultado. O teste utilizado foi o do coeficiente de Spearman, que indicou ausência de tendência ($\alpha_1 = 0,013 < \alpha_0 = 0,05$). A análise de regressão apontou uma tendência positiva de 0,3987 g.C por ano, mas estatisticamente pouco significativa, tendo em vista seu baixo coeficiente de determinação ($R^2 = 0,188$). Dessa forma, não ficou caracterizado uma tendência de acréscimo de absorção de carbono.

4 Conclusões

Os resultados deste estudo permitem concluir que na escala anual, a Pnet_Total acompanhou a sazonalidade da temperatura e da precipitação. Temperaturas mais baixas e menor precipitação podem estar atuando como fatores limitantes

da produtividade. Por outro lado, as maiores produtividades se deram nos meses mais úmidos e com temperaturas amenas. Já na escala interanual, esse comportamento não foi observado, o que sugere que nessa escala fica muito mais complexa a descrição do comportamento da Pnet total anual em função da temperatura média anual e da precipitação total anual. Ou seja, a comparação dos totais anuais não traduz as interações que ocorreram nos doze meses considerados, evidenciado que o todo é maior que a soma das partes. Em termos de magnitude, os resultados obtidos estão de acordo com os citados na literatura para a Pnet_Total anual dos ecossistemas do tipo da Floresta da Tijuca, ou seja, floresta tropical úmida.

Quanto à fixação de carbono, pela porção da Floresta da Tijuca considerada neste estudo, anualmente a fixação compensou a emissão, ou seja, o balanço anual foi igual a zero. Nos períodos úmidos e com temperaturas amenas, como a primavera, houve absorção de carbono. Já nos mais frios e secos, como o inverno, houve emissão. Nos meses mais quentes e úmidos, como o verão, as emissões foram consideráveis. Em relação a todo o período estudado, o balanço foi ligeiramente negativo, ou seja, a área comportou-se como uma discreta fonte de carbono para a atmosfera, mas observou-se, que entre os anos de 2003 e 2011, a área passou por uma transição de fonte para sumidouro de carbono ao longo do período estudado. Entretanto, não foi detectada nenhuma tendência na série temporal de fixação de carbono na área de estudo durante o período analisado.

Em síntese, observou-se que as condições mais favoráveis para uma maior Produtividade Primária Líquida e maior absorção de carbono, pela porção do bioma Mata Atlântica estudada, foram as de temperaturas amenas em torno de 25°C e precipitação elevada, superior a 1200 mm.

Diante destes resultados, faz-se necessário ampliar e aprofundar as investigações do comportamento do bioma em questão em relação à sua produtividade primária líquida e à fixação de carbono, para um maior entendimento dos fatores limitantes envolvidos, principalmente na escala interanual. Na escala anual, é preciso verificar se outras porções do bioma tem o mesmo comportamento de acompanhar bem a sazonalidade

da temperatura do ar e da precipitação. Isso porque, a diversidade espacial da predominância de tipos de vegetação ou o estágio de desenvolvimento de cada porção do bioma pode acarretar uma resposta diferenciada aos fatores limitantes. Sugere-se para futuros trabalhos uma investigação em outras porções do bioma Mata Atlântica, assim como nos demais biomas brasileiros, para inferência do seu comportamento como um todo no que se refere a Produtividade Primária Líquida e ao Sequestro de Carbono. Para tanto, faz-se necessário um monitoramento contínuo a medida que se tem maiores séries de dados. A aquisição de tais conhecimentos é imperativo para o entendimento da vulnerabilidade dos biomas brasileiros às mudanças climáticas e para a formulação de ações futuras.

5 Referências

- Back, A.J. 2001. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. *Pesquisa Agropecuária*, 36(5): 717-726.
- Bastiaanssen, W.G.M. & Ali, S. 2003. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 94: 321-340.
- Bonan, G. 2008. *Ecological climatology: concepts and applications*. Cambridge, Cambridge University Press. 550p.
- Fernandes, T.J.G.; Soares, C.P.B.; Jacovine, L.A.G. & Alvarenga, A.P. 2007. Quantificação do carbono estocado na parte aérea e raízes de *hevea* sp., aos 12 anos de idade, na Zona da Mata Mineira. *Revista Árvore*, 31(4): 657-665.
- Eagleson, P.S. 2005. *Ecohydrology*. Cambridge, Cambridge University Press. 443p.
- García, M.; Riaño, D.; Chuvieco, E. & Danson, F.M. 2010. Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data. *Remote Sensing of Environment*, 114: 816-830.
- Gitelson, A.A.; Viña, A.; Masek, J.G.; Verma, S. B. & Suyker, A.E. 2008. Synoptic Monitoring of Gross Primary Productivity of Maize Using Landsat Data. *IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters*, 5(2): 133-137.
- Hilker, T.; Coops, N.C.; Wulder, M.A.; Black, T.A. & Guy, R.D. 2008. The use of remote sensing in light use efficiency based models of gross primary production: A review of current status and future requirements. *Science of the Total Environment*, 404: 411- 423.
- Husch, B. 2001. Estimacion del contenido de carbono de los bosques. In: SIMPOSIO INTERNACIONAL MEDICIÓN Y MONITOREO DE LA CAPTURA DE CARBONO EN ECOSISTEMAS FORESTALES, Valdivia, 2001, Valdivia, p.87-91.
- IBF. 2013. Instituto Brasileiro de Florestas. Disponível em: <http://www.ibflorestas.org.br/pt/bioma-mata-atlantica.html>. Acesso em : 21 maio. 2013.
- IBGE. 2002. Mapa de Climas do Brasil. Instituto Nacional de Geografia e Estatística. (http://atlascolar.ibge.gov.br/imagens/atlas/mapas_brasil/brasil_clima.pdf. Acesso em 14/04/2014).
- INMET. 2009. *Normais Climatológicas do Brasil*. Brasília, Instituto Nacional de Meteorologia. 253p.
- Jin, C.; Xiao, X.; Merbold, L.; Arnehtc, A.; Veenendaal, E. & Kutsch, W.L. 2013. Phenology and gross primary production of two dominant savanna woodland ecosystems in Southern Africa. *Remote Sensing of Environment*, 135: 189–201.
- Kalfas, J.L.; Xiao, X.; Vanegas, D.X.; Verma, S.B. & Suyker, A.E. 2011. Modeling gross primary production of irrigated and rain-fed maize using MODIS imagery and CO2 flux tower data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151: 1514-1528.
- Knyazikhin, Y.; Glassy, J.; Privette, J.L.; Tian, Y.; Lotsch, A.; Zhang, Y.; Wang, Y.; Morisette, J.T.; Votava, P.; Myneni, R.B.; Nemani, R.R. & Running, S.W. 1999. *MODIS Leaf Area Index (LAI) and Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Vegetation (FPAR) Product (MOD15) Algorithm Theoretical Basis*. Document, <http://eospsso.gsfc.nasa.gov/atbd/modistables.html>, 1999.
- Krohne, D.T. 2001. *General Ecology*. Thomson Learning. 459p.
- Laroca, S. 1995. *Ecologia: princípios e métodos*. Petrópolis, Vozes. 197p.
- Leles, P.S.S. 1995. *Crescimento, Alocação de biomassa e distribuição de nutrientes e uso da água em E. camaldulensis e E. pellita sob diferentes espaçamentos*. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Dissertação de Mestrado, 133p.
- Li, Z.; Yu, G.; Xiao, X.; Li, Y.; Zhao, X.; Ren, C.; Zhang, L. & Fu, Y. 2007. Modeling gross primary production of alpine ecosystems in the Tibetan Plateau using MODIS images and climate data. *Remote Sensing of Environment*, 107: 510-519.
- Miller, G.T. 2007. *Ciência Ambiental*. São Paulo, Thomson Learning. 123p.
- MOD17 User's Guide. 2003. *User's Guide GPP and NPP (MOD17A2/A3) Products NASA MODIS Land Algorithm*. Montana, University of Montana. 57p.
- Monteith, J.L. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9: 747-766.
- Odum, E.P. & Barret, G.W. 2011. *Fundamentos de Ecologia*. São Paulo: Cengage Learning. 612p.
- Reis, M.G.F.; Reis, G.G.; Valente, O. F. & Fernandes, H.A.C. 1994. Seqüestro e armazenamento de carbono em florestas nativas e plantadas nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. In: SEMINÁRIO EMISSÃO X SEQÜESTRO DE CO2: uma oportunidade de negócios para o Brasil, Rio de Janeiro, 1994. Rio de Janeiro, CVRD, p.155-195.
- Rizzini, C.T. 1997. *Tratado de Fitogeografia do Brasil: aspectos ecológicos, sociológicos e florísticos*. São Paulo, Âmbito Cultural Edições Ltda. 747p.
- Running, S.W.; Thornton, P.E.; Ramakrishna, N. & Glassy, J.M. 2000. Global terrestrial gross and net primary productivity from the Earth Observing System. *Methods in Ecosystem Science*, p.44-57.
- Sellers, P.J.; Dickinson, R.E.; Randall, D.A.; Betts, A.K.; Hall, F.G.; Berry, J.A.; Collatz, G.J.; Denning, A.S.; Mooney, H.A.; Nobre, C.A.; Sato, N.; Field, C.B. & Henderson-sellers, A. 1997. Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. *Science*, 275: 502–509.

- Sims, D.A.; Rahman, A.F.; Cordova, V.D.; El-Masri, B.Z.; Baldocchi, D.D.; Bolstad, P.V.; Flanagan, L.B.; Goldstein, A.H.; Hollinger, D.Y.; Misson, L.; Monson, R.K.; Oechel, W.C.; Schmid, H.P.; Wofsy, S.C & Xu, L. 2008. A new model of gross primary productivity for North American ecosystems based solely on the enhanced vegetation index and land surface temperature from MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 112(4): 1633-1646.
- Sneyers, N. 1990. *On the statistical analysis of series of observations*. Geneva. World Meteorological Organization. 192p.
- Thangata, P.H. & Hildebrand, P.E. 2010. Carbon stock and sequestration potential of agroforestry systems in smallholder agroecosystems of sub-Saharan Africa: Mechanisms for 'reducing emissions from deforestation and forest degradation' (REDD+). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 158: 172-183.
- Thornton, P.E.; Lawb, B.E; Gholz, H.L.; Clark, K.L.; Falge, E.; Ellsworth, D.S; Goldstein, A.H.; Monson, R.K.; Hollinger, D.; Falk, M.; Chen, J. & Sparks, J.P. 2002. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113: 185-222.
- Towsend, C.R.; Begon, M. & Harper, J.L. 2010. *Fundamentos em ecologia*. Tradução de Leandro da Silva Duarte. Porto Alegre: Artmed. 576p.
- Turner, D.; Ritts, W.D.; Zhao, M.; Kurc, S.A.; Dunn, A.L.; Wofsy, S.C.; Small, E.E & Running, S.W. 2006. Assessing interannual variation in MODIS-based estimates of gross primary production. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 44: 1899-1907.
- Wu, C.; Niu, Z.; Tang, Q.; Huang, W.; Rivard, B. & Feng, J. 2009. Remote estimation of gross primary production in wheat using chlorophyll-related vegetation indices. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149: 1015-1021.
- Xiao, X.M.; Zhang, Q.Y.; Braswell, B.; Urbanski, S.; Boles, S.; Wofsy, S.; Moore, B. & Ojima, D. 2004. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. *Remote Sensing of Environment*, 91(2): 256-270.
- Zhao, M.; Heinsch, F.A.; Nemani, R.R. & Running, S.W. 2005. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote Sensing of Environment*, 95: 164-176.