

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1.Considerações iniciais

As interações mais importantes entre a biosfera e a atmosfera envolvem a transferência de energia, água e carbono. O carbono é assimilado pela biosfera através da fotossíntese e liberado através dos processos de respiração e decomposição. Durante milhões de anos, as emissões e a absorção de CO₂ se encontravam em estado de relativo equilíbrio nos ecossistemas terrestres. No entanto, mais recentemente, esse balanço tem sofrido profundas alterações causadas por atividades antrópicas. Conseqüentemente, dentre os gases de efeito estufa (GEE), o dióxido de carbono é considerado o principal responsável pelo aquecimento global em virtude de sua excessiva concentração na atmosfera (IPCC, 2013).

Os ecossistemas terrestres são componentes importantes dos ciclos biogeoquímicos, sendo responsáveis por atuarem como fontes e sumidouros de diversos compostos, como por exemplo, dióxido de carbono, metano e óxidos de nitrogênio e outros, influenciando assim as respostas globais às emissões antrópicas de GEE. A dinâmica dos ecossistemas terrestres, particularmente o ciclo do carbono, pode ser diretamente afetada por mudanças climáticas naturais ou pela ação direta do homem.

Os combustíveis fósseis, como, por exemplo, o carvão mineral e o petróleo, são resultado do acúmulo de biomassa que em escalas geológicas de tempo se depositaram no subsolo. A extração dessas reservas e sua utilização como combustível através da combustão liberam carbono armazenado no subsolo para a atmosfera em períodos de tempo milhões de vezes menores que o tempo que o carbono levaria para se transformar em petróleo ou carvão mineral. A diferença entre as escalas de tempo de uso é um dos fatores que promove o desequilíbrio do ciclo do carbono. Outro fator de acúmulo de carbono na atmosfera é o desmatamento, onde o carbono contido na madeira, na forma de biomassa, é liberado como dióxido de carbono para atmosfera.

Estimativas feitas sobre a utilização global de energia e mudanças no uso do solo para os próximos anos sugerem um aumento das emissões e, conseqüente, aumento da concentração de CO₂ na atmosfera a menos que mudanças sejam feitas nos modelos de produção e uso de energia, principalmente em relação ao manejo do carbono.

Nesse sentido, desde o início da década 90, organizações governamentais e não

governamentais têm discutido estratégias para mitigar as emissões de gases de efeito estufa na atmosfera. Estas estratégias consistem basicamente em dois enfoques para minimização do problema: (i) a redução das emissões dos gases causadores do efeito estufa; (ii) as alternativas para absorção do CO₂, através dos projetos de sequestro de carbono (Denman *et al.*, 2007).

Embora a capacidade de regulação climática e atmosférica desempenhada pelas florestas seja amplamente conhecida, o potencial de sequestro de carbono de um ecossistema depende do tipo e da condição do mesmo, isto é, tipos de espécies, estrutura, estágio de desenvolvimento e saúde da vegetação. As características da região também são importantes, incluindo principalmente o clima, as condições do solo e a disponibilidade hídrica (Townsend, 2008).

As florestas desempenham um importante papel no ciclo do carbono através do sequestro e estocagem em seu sistema planta-solo. Existem diversos mecanismos relacionados com a otimização da gestão (ex. combate a queimadas, redução do desmatamento, adoção de práticas agrícolas de baixo impacto) ou alteração do uso do solo (ex. densificação de florestas, reflorestamento, florestamento) em uma determinada região pelos quais as florestas podem contribuir com a absorção de carbono da atmosfera (Gullison *et al.*, 2007).

A maior parte dos ecossistemas brasileiros, por estarem dispostos em grandes áreas e possuírem clima favorável, permite grandes taxas de produtividade primária. O principal deles, a Floresta Amazônica, cobre uma área aproximada de $3,65 \cdot 10^6$ km², representando 40% do total das florestas tropicais do mundo. Calcula-se que em cada hectare de floresta existam em torno de 180 a 300 espécies de árvores. Essa densidade permite o estoque de cerca de 30% do carbono vegetal do planeta (Nobre *et al.*, 2002).

Assim, constata-se que a caracterização dos fluxos e estoques de carbono é de fundamental importância não só para uma abordagem dos benefícios socioambientais associados às florestas, como também, para o entendimento do seu valor econômico.

1.2.Objetivos

1.2.1.Objetivo geral

O principal objetivo deste trabalho é estudar a produtividade primária líquida (PPL) e o sequestro de carbono em áreas de remanescente florestal e pastagem no Estado de Rondônia.

1.2.2.Objetivo específico

Para se alcançar o objetivo mencionado, os seguintes passos deverão ser cumpridos:

- i) Extrair a PPL disponibilizada pelo produto MOD17A2;
- ii) Investigar o comportamento sazonal e anual da PPL nas áreas de interesse;
- iii) Investigar a relação da PPL com as variáveis meteorológicas, precipitação, temperatura do ar e radiação solar registradas *in loco* por meio dos dados da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental de Rondônia (SEDAM);
- iv) Estimar o sequestro sazonal e anual de carbono nas áreas de floresta e pastagem;

1.3.Escopo

Este documento foi organizado da seguinte forma, o Capítulo 1 versa sobre a motivação, justificativas e objetivos envolvidos no tema. Em seguida, no Capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica que aborda os conceitos teóricos e o estado da arte no que se refere à descrição do fenômeno da produtividade primária vegetal e sua estimativa. No capítulo 3, descreve-se a região de estudo, os dados e métodos utilizados

para o cumprimento dos objetivos em questão. Por fim, nos Capítulos 4 e 5, são apresentados os resultados e as conclusões deste estudo, respectivamente.

CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Ciclo global do carbono

Diversos gases são responsáveis pelo efeito estufa, porém, aquele que possui o menor potencial de aquecimento por molécula, o dióxido de carbono (CO_2), é o que mais tem contribuído para o aquecimento global (Solomon *et al.*, 2007).

Recentemente a Administração Nacional de Oceanos e Atmosfera dos Estados Unidos – NOAA – divulgou que a concentração de dióxido de carbono na atmosfera do Hemisfério Norte superou pela primeira vez na história recente a fronteira simbólica das 400 partes por milhão (ppm). As emissões provocadas pela queima de combustíveis fósseis em conjunto com as mudanças no uso da terra atingiram 10 bilhões Mg de carbono em 2007, sendo esperado um aumento anual de 1,3% nas emissões de CO_2 até 2030 (IEA, 2012).

O CO_2 integra o ciclo global do carbono, um ciclo complexo que interage com diferentes reservatórios e diferentes fluxos, sendo continuamente ciclado entre o oceano, a terra e a atmosfera. As estimativas quantitativas do ciclo global do carbono são muitas e seus valores variam relativamente dependendo da metodologia adotada. Um exemplo de uma estimativa quantitativa de reservatórios e fluxos está ilustrado na figura 2.1.

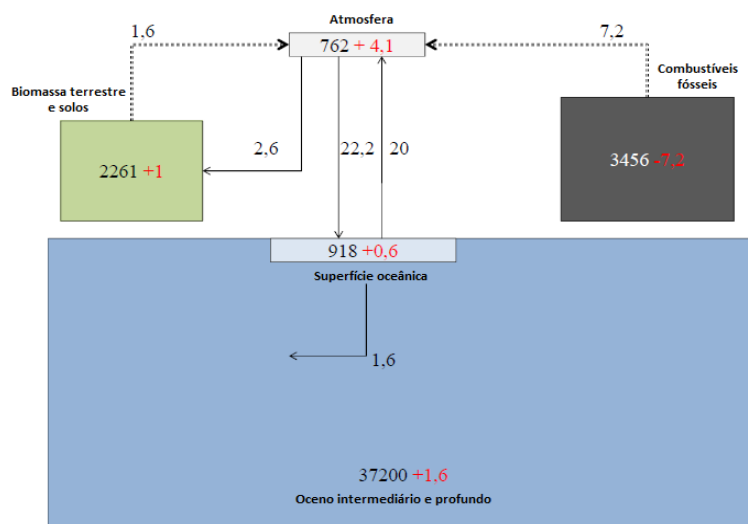


Figura 2.1 - Ciclo simplificado do Carbono. Os estoques são dados em GtC e os fluxos em GtC/ano. O tamanho dos reservatórios é proporcional ao estoque. As flechas cheias representam os fluxos naturais, e as flechas pontilhadas sinalizam os fluxos antrópicos (combustão de energia fóssil e mudança no uso do solo). Fonte: Denman *et al.*, (2007).

A figura anterior representa, para uma média entre os anos de 2000 e 2005, os estoques e fluxos da atmosfera, oceano, combustíveis fósseis, biomassa terrestre e solos. Conforme demonstrado, a variação de estocagem de cada reservatório (valores em vermelho) é acompanhada pelo seu respectivo fluxo de entrada, ou seja, representando um processo de captura do carbono atmosférico, podendo ser definido como sumidouro, e também pelos seus fluxos de saída, liberando CO₂ para a atmosfera vindo de outro reservatório qualquer, definidos como fonte. Embora os fluxos das atividades naturais sejam em torno de vinte vezes maiores em relação às atividades humanas, as transferências naturais de CO₂ podem ser consideradas balanceadas, pois os fluxos de entradas e saídas acabam por se anular (Keeling *et al.*, 1996). São as mudanças provocadas pelo homem, na intensidade desses fluxos, que originam uma perturbação e uma acumulação atmosférica anormal do CO₂ (IPCC, 2007).

O carbono pode ser repartido em cinco grandes reservatórios: as rochas carbonáticas ($C_{carbonáticas}$), o oceano (C_{oceano}), a atmosfera ($C_{atmosfera}$), a superfície terrestre ($C_{terrestre}$) e a parte fóssil ($C_{fóssil}$). Esses cinco reservatórios constituem um sistema fechado de forma que a conservação do carbono pode ser escrita como:

$$\frac{d(C_{carbonáticas} + C_{oceano} + C_{atmosfera} + C_{terrestre} + C_{fóssil})}{dt} = 0 \quad (2.1)$$

Segundo Denman *et al.* (2007), o reservatório que compreende as rochas carbonáticas representa o estoque terrestre mais importante, na ordem de 22×10^6 GtC. No entanto, os fluxos ligados a esse tipo de reservatório são muito pequenos (cerca de 0,1 GtC/ano) sendo assim considerados como inertes em escala temporal ($\frac{dC_{carbonáticas}}{dt} = 0$).

2.1.1. Reservatório oceânico

A absorção líquida de carbono nos oceanos resulta da diferença entre a pressão parcial do CO₂ na atmosfera e no oceano. O carbono encontra-se presente em organismos planctônicos e na forma de carbonatos dissolvidos na água. O oceano absorve uma maior quantidade de CO₂ quando suas águas estão frias, em latitudes mais altas, e o libera perto dos trópicos. Denman *et al.*, (2007) indicaram que o oceano se comporta como um

sumidouro de carbono, sendo sua absorção líquida igual a $2,2 \pm 0,5$ GtC/ano para o período compreendido entre 2000 e 2005.

$$\frac{dC_{\text{oceano}}}{dt} = F_{\text{oceano}} = 2,2 \quad (2.2)$$

2.1.2. Reservatório terrestre (biomassa e solo)

A variação do carbono no reservatório terrestre é a soma da variação do estoque ligado às mudanças de uso do solo (desmatamento, reflorestamento e florestamento), e a variação do estoque relacionado com as mudanças do sequestro de carbono nos ecossistemas por ações, diretas ou indiretas, do homem. Essa variação ($F_{\text{terrestre}}$) é extremamente difícil de mensurar *in situ* para um ecossistema florestal, podendo ser calculada através de dois métodos:

- Seja calculando a diferença pelas variações de estoque dos outros reservatórios (seguindo o princípio da equação 1).

- Seja por análise inversa, considerando que as variações no sequestro na superfície do oceano se correlacionam com as variações no sequestro da biomassa terrestre (Denman *et al.*, 2007).

A média dos resultados dos dois métodos demonstra que a variação total foi positiva – o reservatório terrestre se trata globalmente de um sumidouro – igual a $1 \pm 0,6$ GtC/ano. A variação das mudanças de uso do solo é negativa – se tratando assim de uma fonte – em média igual a $1,6$ GtC/ano. Pela diferença, o sumidouro terrestre residual assume um valor aproximado de $2,6$ GtC/ano.

$$\frac{dC_{\text{terrestre}}}{dt} = F_{\text{terrestre}} = F_{\text{uso do solo}} + F_{\text{residual}} = -1,6 + F_{\text{residual}} = 1,0 \quad (2.3)$$

2.1.3. Reservatório fóssil

Devido às emissões relacionadas à combustão de hidrocarbonetos por atividades antrópicas, o reservatório fóssil é considerado uma fonte. No período de 2000 a 2005, a soma dessas emissões foi igual a $7,2 \pm 0,3$ GtC/ano (Denman *et al.*, 2007).

$$\frac{dC_{fóssil}}{dt} = -7,2 \quad (2.4)$$

2.1.4. Reservatório atmosférico

Pela diferença é possível obter a evolução do reservatório atmosférico. Essa evolução é positiva e igual a $4,1 \pm 0,1$ GtC/ano para o período entre 2000 e 2005 (Denman *et al.*, 2007).

$$\frac{dC_{atmosfera}}{dt} = -\frac{dC_{fóssil}}{dt} - \frac{dC_{terrestre}}{dt} - \frac{dC_{oceano}}{dt} = 4,1 \quad (2.5)$$

Em suma, pode-se observar que a análise dos fluxos mostra que as duas fontes que mais contribuem para as emissões de CO₂ são realmente as mudanças no uso do solo e a combustão de energia de origem fóssil.

2.2. Importância das florestas nas trocas entre a atmosfera - biosfera

As florestas ocupam uma área superior a 40 milhões de km² em áreas tropicais, temperadas e boreais, o que representa cerca de 30% da superfície terrestre (Lewis *et al.*, 2011). Elas prestam inúmeros serviços ecológicos, econômicos, sociais e estéticos para os sistemas naturais e a humanidade, incluindo refúgios para a biodiversidade, fornecimento de alimentos, medicamentos, regulação do ciclo hidrológico, proteção do solo, usos recreativos e valores estéticos. Além disso, as florestas influenciam o clima através de trocas de energia, água, CO₂ e outros compostos químicos com a atmosfera.

O ciclo global do carbono é influenciado pelas florestas em pelo menos duas formas. Primeiramente, os ecossistemas terrestres removem cerca de 3 bilhões de toneladas de carbono antropogênico anualmente, absorvendo cerca de 30% de todo o CO₂ emitido pela queima de combustíveis fósseis e desmatamentos (Canadell *et al.*, 2008). As florestas

são grandes contribuintes para este sumidouro terrestre e seus benefícios econômicos associados. Além disso, 4 bilhões de hectares de ecossistemas florestais estocam grandes reservatórios de carbono, armazenando mais que o dobro da quantidade de carbono presente na atmosfera (FAO, 2005).

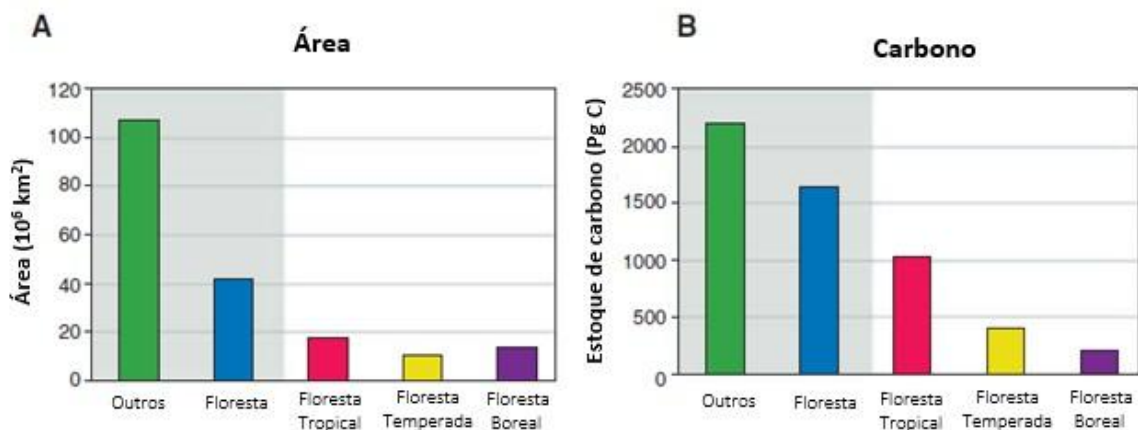


Figura 2.2 - Área ocupada pelos biomas florestais (A) e estoque de carbono dos biomas florestais (B).
Fonte: Bonan (2008).

Aproximadamente 25% de todo o carbono presente na biosfera está contido nas florestas tropicais, representando algo em torno de 33% de toda produtividade primária líquida terrestre (Bonan, 2008).

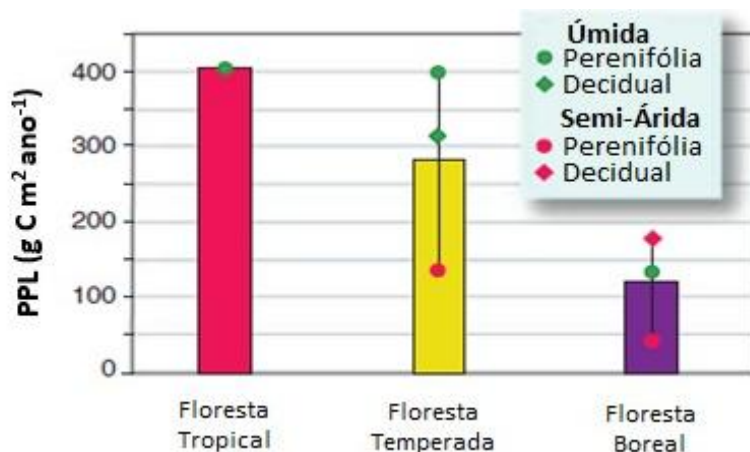


Figura 2.3 - Produtividade primária líquida de diferentes biomas florestais.
Fonte: Bonan (2008).

Diversos estudos baseados em análises atmosféricas têm apontado que apesar das florestas tropicais se tratarem aparentemente de relevantes sumidouros atmosféricos,

dependendo do local analisado, elas também podem se comportar como fontes. Na Amazônia, por exemplo, a conversão em larga escala da floresta em pastagem através da queima da biomassa e desmatamento resulta na emissão de cerca de 0,2 GtC/ano (Nobre *et al.*, 2002).

Em um primeiro momento, poder-se-ia pensar que a Amazônia serviria como fonte de CO₂ para a atmosfera em função de sua alta taxa anual de remoção da cobertura vegetal, de fato, as perdas de florestas naturais nos trópicos totalizaram 152.000 km² durante a década de 90 (Malhi *et al.*, 2008). O desmatamento e as queimadas foram responsáveis por emissões médias de 200 ± 100 MtC/ano durante o mesmo período, sendo a Amazônia responsável por 10 a 15% dessas emissões (Houghton, 2000). No entanto, estudos do ciclo do carbono através do Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA) vêm mostrando que as florestas não perturbadas da Amazônia comportam-se como um forte sumidouro de carbono, com taxas na faixa de 1 a 7 toneladas por hectare por ano, ao passo que as áreas inundadas e os rios podem estar agindo como fonte de carbono de até 1,2 toneladas por hectare por ano (Nobre *et al.*, 2002). Ainda que sejam necessários estudos mais aprofundados das interações floresta-atmosfera, é provável que o balanço líquido de todos esses processos gere um benefício climático através do sequestro de carbono e do resfriamento evaporativo.

A variabilidade climática interanual também desempenha um papel importante na relação floresta-atmosfera. Durante anos quentes e secos de El Niño ocorre um alto incremento na taxa de CO₂ atmosférico devido à liberação de carbono da biosfera para atmosfera (Denman *et al.*, 2007). Já nos anos de La Niña, onde as chuvas são mais abundantes, ocorreria o fenômeno inverso.

Com relação ao aquecimento global, existem algumas divergências e incertezas associadas às previsões dos seus impactos. Alguns autores (Malhi *et al.*, 2008; Betts *et al.*, 2004; Cox *et al.*, 2000) apontam para vulnerabilidade das florestas tropicais a climas cada vez mais quentes e secos, o que poderia agravar o aquecimento global através de um *feedback* positivo que liberaria ainda mais CO₂ na atmosfera, iniciando assim um processo de savanização na floresta. Ao passo que Huntingford *et al.* (2013) e Marengo (2012), em estudos realizados na Floresta Amazônica, indicam que mesmo que parte do seu estoque de carbono seja perdida, isso não implicaria em um processo de colapso do bioma, já que a Floresta Amazônica apresentaria alta resiliência face às mudanças climáticas.

2.3. Fotossíntese

A fotossíntese é um mecanismo anabólico¹ que permite aos organismos fotossintéticos a síntese de compostos orgânicos. Esses organismos, através da absorção de uma pequena fração da luz visível que incide na superfície terrestre, são capazes de transformar CO₂ e água em carbono orgânico, além de liberarem oxigênio molecular. A fotossíntese fornece a energia necessária para a sobrevivência de praticamente todo tipo de vida no planeta, bem como o oxigênio necessário para a sobrevivência dos organismos aeróbios. Grande parte da fotossíntese ocorre nas folhas, mas ela também é realizada em ramos, hastes, casca, cotilédones, brotos e frutos (Waring e Schlesinger, 1985; Kozlowski et al., 1991).

A equação química que descreve o processo fotossintético pode ser escrita da seguinte forma:



A quantidade de radiação solar na faixa do infravermelho próximo e visível (400 nm a 700 nm) representa aproximadamente 50% da radiação solar global (Waring e Schlesinger, 1985). Dessa fração, aproximadamente 85% da energia é absorvida pelas folhas, sendo que apenas 5% são efetivamente utilizados para a fotossíntese, enquanto o restante é perdido na forma de calor (Salisbury e Ross, 1992). As clorofilas a e b, presentes nos cloroplastos, são responsáveis pela absorção do espectro na faixa do azul e vermelho, representando comprimentos de onda entre 430 nm e 660 nm (Curran, 1983). Outros pigmentos como o β -caroteno, ficoeritrina e a ficocianina possuem um máximo de absorção na faixa do vermelho, azul e verde (Jensen, 2000). Normalmente a clorofila a e b representam cerca de 60-75% dos pigmentos da planta, enquanto os carotenoides estão presentes em torno de 25-35% (Tucker e Sellers, 1986).

¹ Uma reação é dita anabólica ao permitir a síntese de um metabólico necessário para o funcionamento de um organismo, no caso da fotossíntese, um açúcar. Uma reação anabólica requer necessariamente um aporte de energia externa. As reações opostas são chamadas catabólicas. O conjunto destas duas reações denomina-se metabolismo.

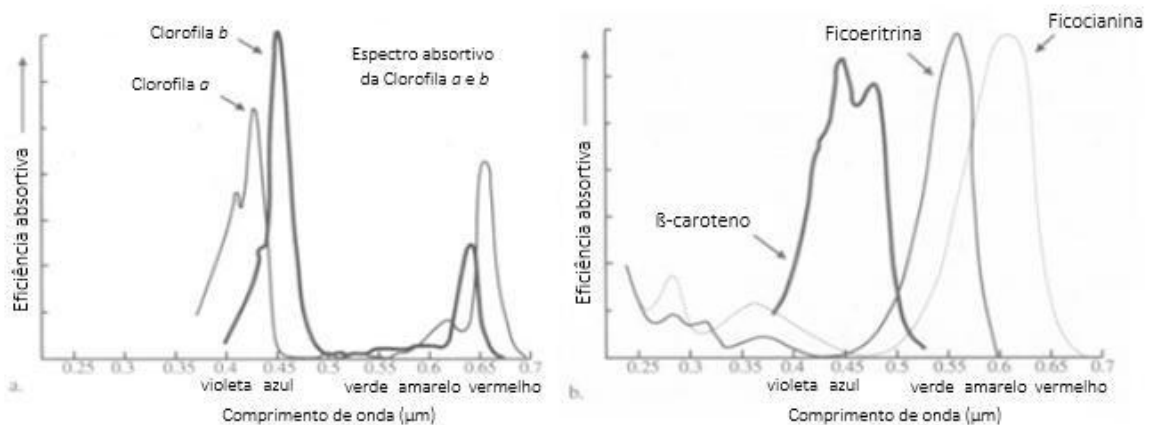


Figura 2.4 - Espectro absorvido da clorofila a e b centrados nos comprimentos do azul e vermelho (esquerda) e espectro absorvido do β-caroteno, ficoeritrina e ficocianina (direita).

Fonte: Jensen (2000).

A quantidade da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) depende de diversos fatores físicos e biológicos como: disponibilidade hídrica, temperatura, concentrações de CO₂ e vapor d'água, fertilidade do solo e também do tipo de cobertura vegetal (Rosenberg *et al.*, 2000; Jackson, 1997; Campbell e Normann, 1998). Geralmente, a atividade fotossintética não é limitada apenas por um desses fatores, mas sim por um conjunto deles, dependendo das condições geográficas.

A fotossíntese é conceitualmente dividida em dois estágios: a “fase clara”, que consiste em reações de transferência de prótons e elétrons, enquanto que a “fase escura”² consiste na biossíntese de carboidratos a partir do CO₂. Como o próprio nome sugere, as reações da fase clara dependem da presença de luz e são elas que proveem os produtos necessários para a fase escura (Salisbury e Ross, 1992).

2.3.1. Respiração autotrófica

As plantas liberam CO₂ durante a fotorrespiração e a respiração. A fotorrespiração ocorre simultaneamente à fotossíntese, enquanto que a respiração segue as atividades metabólicas diurnas e noturnas dos vegetais. Estima-se que um átomo de carbono é emitido

² A Fase Escura ou Ciclo de Calvin pode ser dividido em dois grupos (C3 e C4) segundo o processo bioquímico utilizado para fixação do CO₂. As plantas C3 compreendem a grande maioria das espécies e todos os tipos de árvores. As plantas C4 são um grupo que inclui apenas algumas espécies, tais como as gramíneas de origem tropical, como a cana-de-açúcar, o milho e o sorgo. As gramíneas (C4) possuem um sistema fotossintético mais eficiente que as outras plantas (C3).

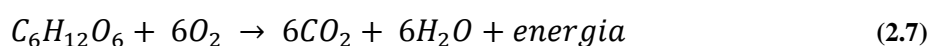
durante a respiração autotrófica para cada dois átomos capturados, ou seja, a respiração consome ao menos 50% do carbono assimilado durante a fotossíntese (Denman *et al.*, 2007).

2.3.2. Fotorrespiração

A fotorrespiração provoca a liberação de CO₂ para a atmosfera devido às propriedades do Rubisco. Esta enzima, que fixa o CO₂ atmosférico durante a fotossíntese, pode igualmente fixar o oxigênio (O₂) (Kozłowski *et al.*, 1991). Quando o O₂ se associa à enzima ao invés do CO₂, o carbono previamente fixado é oxidado, o que provoca sua liberação. A fotorrespiração utiliza de 30 a 50% do carbono fixado durante a fotossíntese (Kozłowski *et al.*, 1991). Assim, uma atmosfera rica em CO₂ leva a uma diminuição da fotorrespiração, pois o aumento da relação CO₂/O₂ favorece a fixação do CO₂ pelo Rubisco em detrimento do O₂.

2.3.3. Respiração metabólica

A respiração é o processo metabólico que permite as plantas liberarem e utilizarem a energia armazenada nos carboidratos sintetizados durante a fotossíntese.



Existem dois tipos de respiração: a respiração de crescimento e a respiração de manutenção. A respiração é mais intensa em locais onde ocorre um crescimento ativo na planta, e é mais lenta em tecidos maduros e partes pouco ativas.

- Respiração de Crescimento

A respiração de crescimento utiliza a energia dos carboidratos, como a glicose, para criar estruturas vegetais ou outros componentes orgânicos. Ela começa com o início da estação de crescimento e permanece ativa enquanto a planta cresce. A Tabela 2.1 mostra as quantidades de glicose, expressas em gramas, necessárias para sintetizar alguns compostos orgânicos.

Tabela 2.1- Quantidades associadas à síntese de alguns compostos orgânicos.

COMPOSTOS QUÍMICOS SINTETIZADOS	QUANTIDADE DE GLICOSE NECESSÁRIA PARA A SÍNTESE DE DIVERSOS COMPOSTOS QUÍMICOS
1 g de lipídeos	3,02 g de glicose
1 g de lignina	1,90 g de glicose
1 g de proteínas	2,35 g de glicose
1 g de polissacarídeos	1,18 g de glicose

Fonte: Waring e Schlesinger (1985).

- Respiração de Manutenção

A respiração de manutenção é usada para fornecer a energia necessária para múltiplas funções das células vivas que compreendem as diversas estruturas da planta. Waring e Schlesinger (1985) indicam que a respiração de manutenção dobra cada vez que ocorre um aumento de 10°C na temperatura. Os tecidos que contêm concentrações elevadas de enzimas possuem taxas de manutenção mais elevadas em relação aos tecidos que servem apenas para o estoque de amidos e carboidratos. A taxa de respiração não é fortemente relacionada às necessidades energéticas, podendo ocorrer até mesmo uma degradação de carboidratos caso as temperaturas noturnas não sejam tão elevadas (Kozłowski *et al.*, 1991).

2.4. Produtividade Primária

O conceito de produtividade permite a compreensão do funcionamento e da evolução do ecossistema florestal. Ele reflete o aumento da quantidade de vegetação (biomassa) por unidade de tempo e espaço. A unidade comumente utilizada é a tonelada de matéria seca por hectare por ano ($t\ MS\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ ou $g\ MS\ m^{-2}\ ano^{-1}$) ou o volume de madeira por hectare por ano ($m^3\ ha^{-1}\ ano^{-1}$). A produtividade em um ecossistema florestal pode ser dividida em:

- Produtividade primária bruta (PPB): Representa a quantidade total de carbono fixada pela vegetação durante a fotossíntese.

- Produtividade primária líquida (PPL): Corresponde à PPB diminuída da respiração vegetal: $PPL = PPB - Resp$. Ela equivale à biomassa produzida pelas plantas.
- Produção líquida do ecossistema (PLE): Corresponde à PPB diminuída da respiração dos seres autótrofos e heterótrofos: $PLE = PPB - Resp - Rh$. O conceito de PLE não inclui, entre outros, as perdas de carbono causadas por incêndios florestais, desmatamento e erosão.

Durante o crescimento da floresta, a PPB passa a aumentar rapidamente, para em seguida se estabilizar. A medida que a comunidade cresce, sua respiração também irá aumentar, de modo que a PPL tenderá gradualmente a zero (Figura 2.5). A PPL é uma medida extremamente importante, pois ela varia de acordo com o tipo de cobertura vegetal, com sua idade e estado de desenvolvimento, com sua forma de gestão e com o ambiente externo (Waring e Schlesinger, 1985).

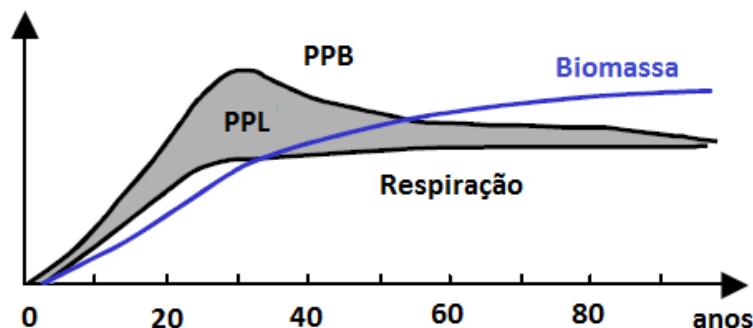


Figura 2.5 - Variação das produtividades primária bruta e líquida, da respiração e da biomassa no decorrer de uma sucessão florestal.

Fonte: Ramade (1984).

2.4.1. Produtividade primária líquida

Na maior parte dos ecossistemas, a vegetação desempenha um papel importante no fluxo de energia, matéria e troca de momento entre a superfície terrestre e a atmosfera. Conforme mencionado anteriormente, a produtividade primária bruta (PPB) representa a fotossíntese total do ecossistema, sendo uma grande parte utilizada para as necessidades metabólicas dos vegetais, resultando na liberação de CO_2 para a atmosfera através da

respiração. A parte restante, denominada produtividade primária líquida (PPL), fica disponibilizada para a síntese de material orgânico pela planta.

A PPL compreende todos os materiais que, em conjunto, representam: (1) a quantidade de matéria orgânica recém produzida que é retida pelas plantas ao final de um intervalo de tempo, e (2) a quantidade de matéria orgânica, que foi produzida e perdida pelas plantas durante o mesmo intervalo. Nas florestas, esses materiais são: incremento de biomassa vegetal, serapilheira, as perdas acima do solo para os consumidores, as emissões de compostos orgânicos voláteis biogênicos (COVs), perdas de solo de compostos orgânicos líquidos lixiviados e incrementos na biomassa de raízes (Clark *et al.*, 2001). Nota-se, dessa forma, que a PPL é uma variável ecológica fundamental não somente para determinação da assimilação do CO₂, mas também da quantidade de energia disponível para níveis tróficos superiores bem como na estimativa da magnitude e volume da ciclagem de nutrientes de um ecossistema (Jackson, 1997).

A proporção entre a PPL e a PPB é chamada de eficiência de utilização de carbono (CUE), que é em média de 30% para as florestas tropicais que se encontram em estágio maduro na região Amazônica (Aragão *et al.*, 2009). Assim, cerca de 70% de carbono assimilado pela fotossíntese é devolvido rapidamente para a atmosfera através da respiração autotrófica. A PPL é então alocada de forma relativamente equivalente entre o dossel (34 ± 6%), tecidos (39 ± 10%) e raízes das plantas (27 ± 11%), dependendo do local esse particionamento pode apresentar uma variação substancial, principalmente em relação à alocação nos tecidos e raízes (Malhi *et al.*, 2009).

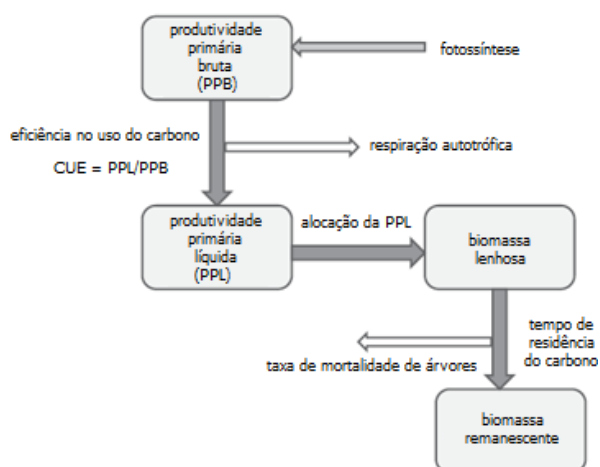


Figura 2.6 - Dinâmica dos principais processos que relacionam a fotossíntese e a biomassa de uma floresta.

Fonte: Malhi *et al.*(2009).

A PPL varia com o tempo e está fortemente ligada às mudanças físicas (abióticas) e ecológicas (bióticas). Em escala de segundos a horas, a produtividade primária durante o período vegetativo responde a fatores ambientais relacionados à fotossíntese, geralmente aumentando com a densidade de fluxos fotossintéticos (DFFF) ou com o espectro de radiação solar disponível. Em escala sazonal, o regime de precipitação é o responsável pelo controle dos ciclos de alta e baixa produtividade em regiões tropicais. Anual ou interanualmente, as mudanças na PPL estão ligadas às variações de longo termo como períodos de seca prolongados e mudanças na temperatura média e na insolação (Gough, 2012).

2.4.2. Fatores limitantes

Conforme mencionado anteriormente, aproximadamente 50% da radiação solar ocorrem em comprimentos de onda apropriados para a fotossíntese. Ainda assim, as plantas não conseguem utilizar toda essa energia e conseqüentemente a produtividade fica muito abaixo de seu potencial. O valor médio dessa eficiência em condições naturais se situa entre 0,2-2,0% para a grande maioria das plantas, sendo que segundo Ort *et al.*, (2010), o máximo teórico da conversão da energia solar em biomassa pode atingir 4,6%³ para plantas C3 e 6%³ para plantas C4. Em culturas agrícolas, onde há um suprimento abundante de recursos, é possível alcançar até mesmo valores próximos a 10% de eficiência (Townsend, 2008).

Os ecossistemas que mostram os mais altos níveis de PPL são aqueles que possuem temperaturas médias anuais elevadas e recebem grandes quantidades de precipitação, ao passo que baixas produtividades estão associadas a climas frios e baixos índices de precipitação, podendo a limitação ocorrer por apenas um desses fatores ou pela combinação entre ambos. A radiação solar também exerce influência sobre a produtividade de um ecossistema, principalmente os tropicais, haja vista que a nebulosidade nesses locais acarreta em uma menor absorção de radiação pelas plantas e conseqüentemente em uma limitação em sua produtividade.

O aumento da PPL com a elevação da temperatura é causado principalmente por um aumento na duração da estação de crescimento vegetal, embora a escassez de água possa fazer com que o crescimento real da vegetação seja mais curto do que o período

³ Valores obtidos para fotossíntese a 30 °C e concentrações atuais de 380 ppm [CO₂].

permitido pela temperatura (FAO, 2001). Nas florestas tropicais, devido a sua grande biomassa vegetal, as altas temperaturas levam a altos índices de evapotranspiração, aumentando assim a umidade e influenciando diretamente o ciclo hidrológico. Na Amazônia, a relação entre o clima e a evapotranspiração é tão importante que entre 25 - 50% das chuvas na região são ocasionadas pela água evapotranspirada (Eltahir & Bras, 1994; Hutrya *et al.*, 2005; Marengo, 2006). Os desertos, por outro lado, ainda que estejam localizados na zona subtropical do planeta e possuam altas temperaturas, possuem baixa PPL em razão do efeito direto da escassez de água sobre a taxa de crescimento vegetal. O mesmo ocorre com as regiões polares, que além de serem frias e secas, também apresentam baixíssimos índices pluviométricos. Já as florestas temperadas e savanas, devido à grande sazonalidade climática, tendem a ter níveis anuais intermediários de temperatura e precipitação, possuindo alta produtividade durante as estações mais quentes e úmidas, e menor produtividade durante as estações mais frias e secas.

Nemani *et al.*, (2003) baseado em dados de temperatura, água e radiação de diversos modelos de eficiência produtiva, divulgou um mapa global das potenciais limitações para o crescimento vegetativo.

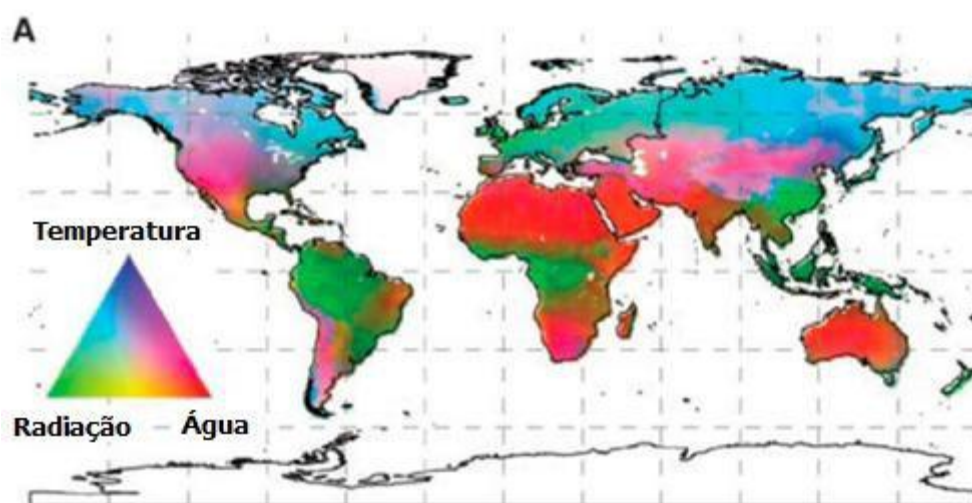


Figura 2.7 - Distribuição geográfica dos limitantes climáticos para o crescimento vegetativo.

Fonte: Nemani *et al.*, (2003).

Mesmo que haja grande incidência de luz, que as precipitações sejam frequentes e que a temperatura seja uniforme, a produtividade será baixa se não houver solo em uma comunidade terrestre ou se o solo for deficiente em nutrientes minerais essenciais

(Townsend, 2008). De todos os nutrientes minerais, o nitrogênio é geralmente o fator limitante. No entanto, o fósforo pode limitar a produtividade em situações específicas, tais como em solos antigos em razão da lixiviação de nutrientes e em solos ácidos e solos desérticos, onde o fósforo precipita e se torna indisponível para as plantas.

2.4.3. Distribuição da produtividade primária líquida

Devido às mudanças nas taxas naturais de troca de carbono entre a atmosfera e a biosfera por meio de alterações do uso da terra e atividades florestais, torna-se importante analisar a dinâmica dos fluxos de carbono entre os diferentes reservatórios terrestres e como os estoques mudam em resposta às atividades como o desmatamento, reflorestamento e florestamento.

A avaliação dos diferentes ecossistemas a partir de variáveis como a PPL permite compreender a importância das florestas no ciclo global do carbono. Segundo Roy e Saugier (2001), as florestas tropicais estão entre os ecossistemas mais produtivos da terra, sendo responsáveis por cerca de um terço da produtividade primária líquida terrestre global. As estimativas globais da PPL terrestre variam de 48,0 a 69,0 Pg C ano⁻¹.

Tabela 2.2 - Estimativas globais e ecossistêmicas das PPBs e PPLs médias para os maiores biomas terrestres.

1 Pentagram (Pg) = 10¹⁵ gramas.

Bioma	PPB Global (Pg C ano ⁻¹)	PPL Global (Pg C ano ⁻¹)	PLE (g C ha ⁻¹ ano)
Floresta Tropical	40,8	16,0 - 23,1	871 - 1098
Floresta Temperada	9,9	4,6 - 9,1	465 - 741
Floresta Boreal	8,3	2,6 - 4,6	173 - 238
Savana e Campos	31,3	14,9 - 19,2	343 - 393
Chaparral	8,5	3,4 - 7,0	129 - 342
Desertos	6,4	0,5 - 3,5	28 - 151
Tundra	1,6	0,5 - 1,0	80 - 130
Áreas Agrícolas	14,8	4,1 - 8,0	288 - 468
TOTAL	121,7	48,0 - 69,0	2377 - 3561

Fonte: Beer *et al.* (2010).

A PPL varia consideravelmente ao longo da superfície terrestre e em cada tipo de ecossistema. Sua variação latitudinal se dá devido aos gradientes de composição da

comunidade vegetal, duração da estação de crescimento, precipitação, temperatura e radiação solar. Embora menos flagrante que a variação latitudinal, existe também uma diferença longitudinal, conforme ilustrado na figura 2.8.

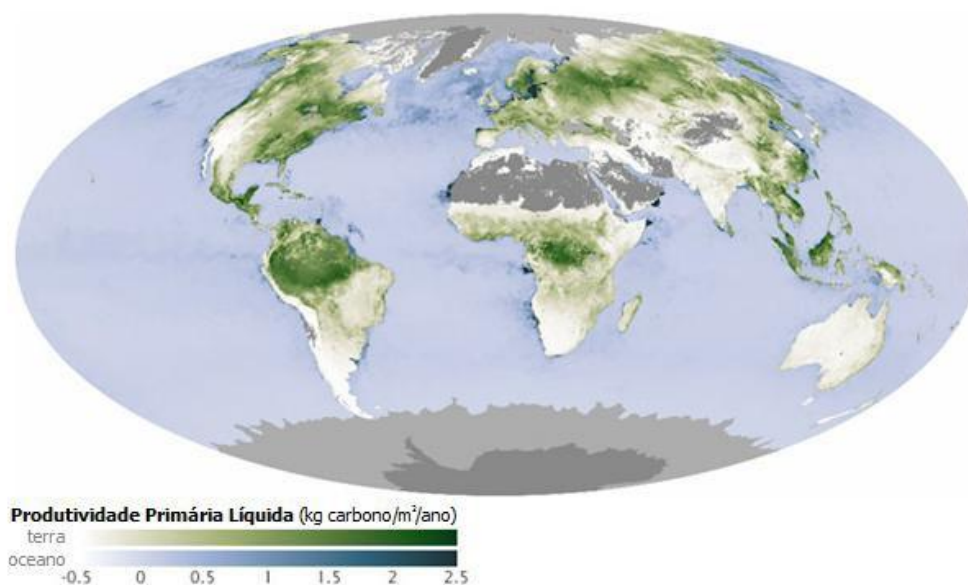


Figura 2.8 - Distribuição global da PPL no ano de 2010.

Fonte: NASA Earth Observatory (2010).

As florestas tropicais apresentam uma produtividade muito maior que qualquer outro ecossistema terrestre, já as florestas temperadas, savanas, áreas de cultivo e florestas boreais exibem níveis médios de produtividade. Os desertos e os biomas de tundra tem sua produtividade limitada pela precipitação e pela temperatura, respectivamente.

Além da regulação climática da PPL, distúrbios, mudanças de gestão das terras e a urbanização influenciam de maneira crítica nas diferenças de produtividade terrestre (Gough, 2012). Pesquisas recentes sugerem que pode estar ocorrendo uma queda da PPL em resposta ao aquecimento global, principalmente quando acompanhado por grandes períodos de estiagem. Zhao e Running (2010) estimaram uma redução de 1% ou 0,55 Pg na PPL global de 2000 a 2009. Um declínio contínuo da produtividade levaria não só a uma redução no sequestro de carbono atmosférico como também comprometeria as funções ecossistêmicas de modo geral.

Haberl *et al.* (2007) estimou que os seres humanos utilizem aproximadamente um quarto da PPL anual na produção de alimentos, fibras, produtos madeireiros e papel, além de exercerem uma influência adicional através das queimadas. Existe ainda uma crescente

preocupação junto à comunidade científica que com o aumento populacional, ocorrerá uma influência humana cada vez maior na produtividade líquida global, em detrimento de sua utilização para manutenção das cadeias alimentares e como sustentação da biodiversidade.

2.5. Impacto das secas na Região Amazônica

As secas são provocadas pela redução de água no solo devida à baixa quantidade de chuvas e pela elevada taxa de evapotranspiração, caracterizando assim um período de insuficiente disponibilidade de água para as plantas. Esse processo não é abrupto, diferentemente de outros fatores de estresse para vegetação, pois ele aumenta gradualmente ao longo do tempo fazendo com que sua duração seja um fator determinante para a sobrevivência da planta. As secas têm o potencial de reduzir o estoque de biomassa acima do solo (Rolim *et al.*, 2005; Phillips *et al.*, 2009; Lewis *et al.*, 2011), assim, como, em longo prazo, alterar a sucessão e composição das espécies (Engelbrecht *et al.*, 2007; Nepstad *et al.*, 2007; Fonty *et al.*, 2009).

Especificamente no caso da Amazônia, espera-se que as respostas a eventos de seca em seus diversos ecossistemas ocorram de forma distinta, dada a grande diversidade de tipos, composição de solos e vegetação (Sombroek, 1966).

2.5.1. Influência na produtividade primária local

Existem, atualmente, dois grandes experimentos de referência que tratam da exclusão parcial de chuvas na região amazônica. O primeiro deles, já encerrado, ocorreu entre 1999 e 2005 na Floresta Nacional do Tapajós, localizada a oeste do estado do Pará. O segundo, iniciado em 2001 e ainda em curso, está sendo desenvolvido na Floresta Nacional de Caxiuanã, também no estado do Pará. Nos dois locais como forma de resposta ao déficit hídrico em períodos maiores que dois anos, foi observada uma redução em torno de 20% no índice de área foliar (Brando *et al.*, 2008; Fisher *et al.*, 2007), bem como um declínio da fotossíntese em algumas espécies, haja vista que cada tipo de vegetação apresenta diferentes mecanismos de adaptação ao estresse, influenciando dessa forma na sua resiliência ou não às secas severas (Nepstad *et al.*, 2002; Fisher *et al.*, 2007). Williamson *et al.* (2000) também constaram que em condições mais secas e quentes, como anos de *El*

*Niño*⁴ ou anos secos, onde a diminuição da umidade do solo é acentuada, as florestas podem se comportar como emissoras de carbono para a atmosfera devido à redução da fotossíntese e o aumento da respiração. Em um estudo realizado com o auxílio de um modelo de ecossistemas terrestres baseado em processos biogeoquímicos, estimou-se que em anos de *El Niño*, a Amazônia agiu como uma fonte emissora de carbono para a atmosfera em até 0,2 Pg.C, nos El Niños de 1987 e 1992, este fato acarretou em uma redução na PPL entre 20% e 30%, sendo que, em anos normais, estudos baseados em dados de campo sugerem que florestas primárias da Amazônia absorvem 0,49 Pg C por ano (Baker *et al.*, 2004) ou, aproximadamente 0,89 Mg/ha ano (Phillips *et al.*, 2009). Brando *et al.* (2006) analisando os impactos de quatro anos de exclusão de chuvas na Floresta Nacional do Tapajós, chegaram às seguintes conclusões:

- Atrasos progressivos na formação de folhas novas;
- Declínio rápido na produção de flores, frutos e sementes;
- Anos de El Niño trazem secas e condições mais ensolaradas e, portanto, pode-se esperar que as maiores ofertas de luz solar durante as secas tenham um efeito positivo na produção de frutos em florestas úmidas;

Portanto, existem indícios de que as reduções da PPL, assim como as emissões comprometidas em áreas de florestas primárias em anos de seca, têm o potencial de diminuir a entrada de carbono nesse ecossistema, neutralizando ou tornando-os fontes emissoras de carbono para a atmosfera.

2.5.2. Classificação dos anos de seca na Região Amazônica

A região Amazônica, devido a sua grande extensão territorial, possui regimes climáticos diferenciados. De norte a sul, observa-se uma grande variabilidade espacial e temporal da precipitação. Os eventos de secas na Amazônia não são recentes e, atualmente, já se tem um razoável entendimento científico de suas causas e ocorrências nessa região.

Alves *et al.* (2013) realizou uma análise da distribuição espacial sazonal da chuva na Amazônia e de suas anomalias com base no conjunto de dados do *Global Precipitation Climatology Center* (GPCC). O GPCC compreende uma análise global de precipitação

⁴ Conceitualmente constitui-se do aquecimento anômalo das águas superficiais do setor centro-leste do Oceano Pacífico, predominantemente na sua faixa equatorial. O “El Niño” é um fenômeno oceânico-atmosférico que afeta o clima regional e global, mudando a circulação geral da atmosfera, também é um dos responsáveis por anos considerados secos ou muito secos.

mensal baseada em dados *in situ* com resolução de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ no período de 1951 a 2010. Quatro áreas foram analisadas e definidas como: noroeste da Amazônia (NW) (75°W - $62,5^{\circ}\text{W}$; 5°N - $2,5^{\circ}\text{S}$), nordeste da Amazônia (NE) ($62,5^{\circ}\text{W}$ - 50°W ; 5°N - $2,5^{\circ}\text{S}$), oeste da Amazônia (W) (75°W - $62,5^{\circ}\text{W}$; $2,5^{\circ}\text{N}$ - 10°S), leste da Amazônia (E) ($62,5^{\circ}\text{W}$ - 50°W ; $2,5^{\circ}\text{N}$ - 10°S). Em cada uma dessas regiões a quadra chuvosa ocorreu entre abril e julho (NW), março e junho (NE), janeiro e abril (W e E). Por sua vez, a quadra seca ocorreu entre novembro e fevereiro (NW), agosto e novembro (NE) e entre junho e setembro (W e E). A seguir serão descritas as características do regime de chuvas somente da porção W da Amazônia onde se localiza a área de interesse deste trabalho e o período considerado será o de 2002 a 2010.

Segundo essa análise, os quadrimestres mais chuvoso e seco na região W vão de janeiro a abril (estação chuvosa) e de junho a setembro (estação seca), respectivamente. Durante o período de 2002 a 2010 ocorreram anomalias negativas de precipitação durante a estação seca em 2002, 2005, 2007, 2008 e 2010. Anomalias positivas em 2003 e 2004. Os anos de 2006 e 2009 foram normais. Durante a estação chuvosa, não ocorreram anomalias negativas. Por outro lado, anomalias positivas foram observadas em todos os anos, exceto em 2004 e 2010, que foram normais.

Nos anos de seca extrema, como em 2005 e 2010, os totais de chuva durante a quadra seca ficaram abaixo da média. Por outro lado, durante a quadra chuvosa ficou acima e na média, respectivamente. O ano de 2005 é o segundo ano mais seco na área oeste e 2009/10 é o terceiro ano. Esses dois anos não foram classificados entre os sete primeiros anos muito secos na estação chuvosa, indicando que o impacto maior ocorreu durante a estação seca.

Ressalta-se que a região foi dividida em quatro setores, que incluíam áreas menores que não foram muito afetadas pelas grandes secas de 2004/05 e 2009/10. Assim, esses anos não foram classificados como os primeiros mais secos em todos os setores. Durante a estação seca, o ano de 2009/10 é o primeiro mais seco na região NW (NDJF), os anos de 2005 e 2010 o segundo e terceiro mais seco na região W (JJAS), respectivamente, e o ano de 2005 o sétimo mais seco na região E (JJAS). Na região NE (ASON), esses anos não entraram na lista dos sete mais secos.

Não há, na Amazônia, um padrão de distribuição da chuva nos anos de seca, isto é, para cada ano de ocorrência de seca há uma classificação diferente de distribuição da chuva nas diferentes áreas de estudo. Além disso, os fenômenos de grande escala podem

influenciar cada área de modo diferenciado, atuando mais intensamente em uma determinada área e menos intensamente em outra, mas não de modo sistemático. Os eventos de seca que ocorreram em mais de uma das quatro regiões da Amazônia e se estenderam por mais de uma estação ocorreram entre os anos de 2004/05 e 2009/10, sendo que essas condições foram mais pronunciadas do meio para o fim do ano (de julho a setembro de 2005 e 2010). Em termos de extensão, a seca do ano de 2010 abrangeu uma área maior que a de 2005, quando as condições se restringiram à região sudoeste da Amazônia (Marengo *et al.*, 2012).

Os eventos de seca observados na Amazônia em 2005 e 2010 foram principalmente causados pelos padrões de circulação atmosférica de grande escala forçados pelas anomalias de TSM no Pacífico equatorial e no Atlântico tropical norte.

Anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) foram registradas no Pacífico leste e central e no Atlântico norte em dezembro de 2003 e em abril e dezembro de 2004. Em 2005, as maiores anomalias negativas de precipitação ocorreram nos setores noroeste e oeste da Amazônia em janeiro, abril, maio, junho, julho, agosto e setembro, e nesses últimos meses elas se concentraram na área noroeste. Em janeiro de 2005, ainda persistiam as anomalias positivas de TSM no Pacífico central e no Atlântico tropical norte. As anomalias positivas de TSM no Atlântico tropical norte se intensificaram nos meses seguintes, sendo associadas por Marengo *et al.* (2008) à ocorrência da intensa seca na Amazônia nesse ano. Esse foi o primeiro ano a registrar anomalias com essas intensidades em toda a extensão do Atlântico tropical. Em outros anos, as anomalias ocorreram no Pacífico, caracterizando anos de El Niño, ou no setor leste do Atlântico. As águas mais aquecidas do Atlântico norte resultaram em uma circulação com movimento subsidente e divergência anômala sobre a Amazônia, reduzindo a formação de precipitação (Yoon e Zeng, 2010).

Anomalias positivas de TSM foram observadas de outubro de 2009 a maio de 2010 no Pacífico (El Niño) e de janeiro a setembro de 2010 no Atlântico tropical norte. Em julho de 2010, anomalias negativas foram registradas no Pacífico equatorial (La Niña).

A diferença da seca de 2010 em relação a de 2005 foi a ação das duas células, Walker no Pacífico e Hadley no Atlântico norte, agindo em conjunto por vários meses em 2010.

2.6. Determinação da produtividade primária através de sensoriamento remoto

É necessário que existam estimativas contínuas temporais e espaciais da fotossíntese para uma compreensão abrangente do ciclo de carbono terrestre e da determinação da absorção do CO₂ pelas plantas (Barr *et al.*, 2004).

Ao longo das últimas décadas, as medições da covariância de vórtices turbulentos (*eddy flux*) de troca do CO₂ entre o dossel e sua coluna de ar circundante tem auxiliado muito a compreensão do ciclo de carbono em nível local (Baldocchi, 2003). No entanto, é preciso dispor de técnicas apropriadas para que estes resultados se apliquem à paisagem e escalas globais (Chen *et al.*, 2003; Reichstein *et al.*, 2007b). Os dados de sensoriamento remoto fornecem inúmeras informações temporais e espaciais, auxiliando dessa forma a compreensão de processos, dinâmicas e distúrbios na biosfera, e dos impactos dessas mudanças nos ecossistemas. Desde a utilização de dados do AVHRR - *Advanced Very High Resolution Radiometer* - para o estudo da vegetação no início dos anos 80, grandes progressos foram feitos no estudo dos fluxos e estoques de carbono.

As estimativas de PPB por sensoriamento remoto tem se baseado na eficiência do uso da luz (Monteith, 1972; Field *et al.*, 1995), expressa em função da radiação fotosinteticamente ativa (PAR), da fração da radiação fotosinteticamente ativa absorvida (fPAR) e da eficiência do uso da luz (ϵ).

2.6.1. Radiação fotossinteticamente ativa (PAR)

A radiação fotossinteticamente ativa (PAR) é um parâmetro fundamental para modelagem dos ecossistemas terrestres, tendo uma relação diretamente proporcional com a PPB. De acordo com Alados e Arboledas (1999), o termo “radiação fotossinteticamente ativa” não engloba apenas o conceito de fótons fotossintéticos, mas também o de energia. Para fins fisiológicos, as unidades da PAR são expressas em ($\mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}$). Já para aplicações meteorológicas, ela é normalmente expressa em termos de densidade de fluxo de energia radiante (MJ m^{-2} ou W m^{-2}). A PAR representa a radiação solar entre 400 e 700 nm, e é definida como:

$$PAR = \int_{400}^{700} I(\lambda) d\lambda \quad (2.8)$$

As estimativas da PAR em ampla escala começaram a ser obtidas a partir de redes de piranômetros, esta metodologia, no entanto, logo se provou insuficiente para modelos globais, pois as estimativas da PAR eram restritas a algumas poucas observações discretas (Frouin e Pinker, 1995). Com o advento dos satélites, a PAR passou a ser estimada pela refletância no topo da atmosfera, dando origem assim a inúmeras abordagens em grande escala.

Embora a radiação que chega ao topo da atmosfera e sua respectiva distribuição possam ser conhecidas e estimadas com relativa facilidade, os produtos atualmente disponíveis da PAR sofrem com limitações espaciais e temporais, além disso, a recepção da PAR se altera de maneira dinâmica de acordo com as condições da atmosfera (van Laake e Sanchez-Azofeifa, 2004).

Ainda que não exista um produto padronizado específico que forneça observações regulares da PAR, algumas técnicas foram desenvolvidas para obter estimativas bastante precisas da PAR utilizando o sensor MODIS (van Laake Sanchez-Azofeifa, 2004; Liang *et al.*, 2006). Já sendo possível, por exemplo, obter quase que em tempo real o estado de crescimento da vegetação, incluindo sua produtividade primária em um intervalo de oito dias com uma resolução espacial de um quilômetro (Running *et al.*, 2004).

2.6.2. Fração absorvida da radiação fotossinteticamente ativa (fPAR)

As abordagens para inferir a fração da PAR, que é absorvida pelo dossel vegetal a partir de técnicas de sensoriamento remoto podem ser divididas em técnicas empíricas, que baseiam-se no ajuste da curva de medidas de refletância, e abordagens físicas, que modelam as relações entre a folha, dossel, características biofísicas e a radiação refletida e emitida (Myneni e Williams, 1994; Hall *et al.*, 1995).

2.6.3. Determinação empírica (fPAR)

Grande parte das abordagens empíricas é baseada em índices de vegetação, que são combinações lineares e não lineares de bandas espectrais discretas onde se busca maximizar a sensibilidade do índice às influências do dossel em estudo (Hall *et al.*, 1995).

Índices de vegetação (IV) são medidas óticas do estado da vegetação, sendo amplamente usados para estimar variáveis relacionadas à caracterização do dossel (índice

de área foliar, fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida, teor de clorofila) e seus processos biofísicos (fotossíntese, transpiração, PPL). Para aplicações e pesquisas em sensoriamento remoto, dezenas de índices de vegetação já foram desenvolvidos para diferentes necessidades.

Para o monitoramento do estado fenológico da vegetação, é necessário que se consiga isolar a variável de interesse (vegetação verde) para que se tenha uma informação espaço-temporal precisa da atividade vegetacional. Nesse sentido, tem sido feito uso geralmente do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). O NDVI é definido como a relação da refletância entre o vermelho (ρ_{VERM} ; 635 a 700 nm) infravermelho próximo (ρ_{IVP} ; 760 a 1500 nm).

$$NDVI = \frac{\rho_{IVP} - \rho_{VERM}}{\rho_{IVP} + \rho_{VERM}} \quad (2.9)$$

A alta refletância pelas folhas na região do infravermelho próximo ocorre pelo fato dos pigmentos e da celulose serem opacos para esses comprimentos de onda, o que ocasiona pouca absorção (Tucker e Sellers, 1986). A refletância da folha no espectro do infravermelho próximo é algo em torno de 50%, dependendo de parâmetros estruturais das folhas como o número de células e suas quantidades de camadas (Jensen, 2000). Folhas jovens, por exemplo, possuem camadas celulares mais compactas, o que diminui a presença de ar entre elas, causando menor refletância em comparação a folhas mais velhas. A presença de água também é um fator preponderante, a queda na pressão de turgor sinaliza pouca água disponível na folha e conseqüentemente a refletância aumenta, pois a folha encontra-se preenchida com uma maior quantidade de ar (Tucker, 1980; Hunt e Rock, 1989). O efeito da diminuição do conteúdo de água na folha em função do comprimento de onda está ilustrado abaixo.

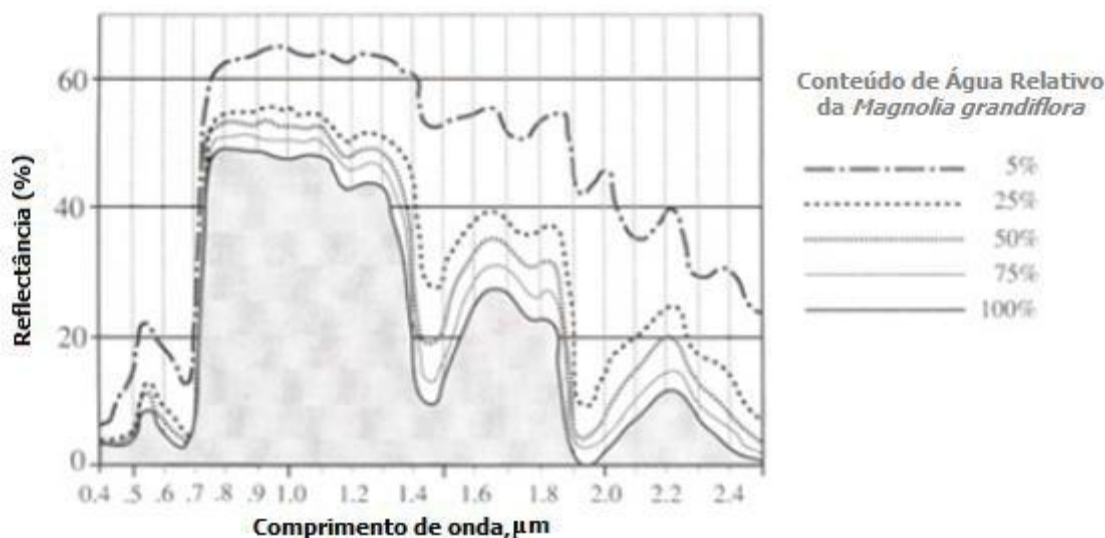


Figura 2.9 - Resposta da refletância com a variação do conteúdo de água em uma folha de Magnólia.
 Fonte: Carter (1991).

O primeiro uso do NDVI para o monitoramento da dinâmica da vegetação em escala continental e global ocorreu em 1985. Tucker *et al.* (1985), descobriu que as diferenças na dinâmica temporal da vegetação refletida pelo NDVI estão associadas com variações do clima e são dependentes do tipo de bioma, enquanto Goward *et al.* (1985) foi o primeiro a demonstrar a existência de uma relação linear entre épocas de cultivo integradas com o NDVI e observações em superfície da PPL, para diferentes biomas na América do Norte. Ruimy *et al.*, (1994) introduziu a relação entre a *fPAR* e o NDVI com a seguinte equação:

$$fPAR = 1,25 \times NDVI - 0,025 \quad (2.10)$$

Embora o NDVI forneça uma forma de monitoramento da vegetação, sua tendência de causar saturação em áreas com vegetação muito densa, torna o uso dessa técnica um fator limitante em muitos tipos de vegetação (Huete *et al.*, 2002).

O Índice de Vegetação Realçado (EVI) é geralmente empregado como uma alternativa ao NDVI devido a sua menor sensibilidade à saturação, porém requer informações de refletância na faixa do azul, o que muitos satélites não disponibilizam e também é de difícil de extração a partir de medições de radiação. O EVI se caracteriza por ser um índice de vegetação otimizado, com maior sensibilidade em regiões de alta biomassa e redução das influências atmosféricas (Huete *et al.*, 2002).

$$EVI = G \times \frac{\rho_{IVP} - \rho_{VERM}}{\rho_{IVP} + C_1 \times \rho_{VERM} - C_2 \times \rho_{AZUL} + L} \quad (2.11)$$

onde:

G = Fator de ganho (2,5); ρ_{Nir} = refletância no infravermelho; ρ_R = refletância no vermelho; ρ_B = refletância no azul; C_1 e C_2 = Coeficientes de correção da resistência atmosférica ao azul e ao vermelho (6 e 1); L = Fator de correção de brilho do dossel (7,5).

2.6.4. Modelos físicos (fPAR)

Os modelos físicos vêm sendo desenvolvidos ao longo dos anos a partir da utilização de dados de satélite (Tucker e Sellers, 1986) , experimentos de campo (Asrar *et al.*, 1984; Sellers *et al.*, 1992; Hall *et al.*, 1992; Sellers *et al.*, 1997; Running *et al.*, 1999) e trabalhos teóricos (Myneni *et al.*, 1992; Hall *et al.*, 1990; Sellers, 1985, 1987; Sellers *et al.*, 1992; Sellers *et al.*, 1996b). Com o conhecimento adquirido dos modelos físicos, são então desenvolvidos algoritmos com intuito de relacionar características biofísicas com as medidas de refletância em pequenas e grandes escalas (Hall *et al.*, 1995).

Os parâmetros utilizados na aplicação dos modelos dependem de propriedades físicas (estrutura do dossel e tipo de vegetação) ou podem ser obtidos por inversão matemática, a partir de medidas de refletância. Nos últimos anos, os modelos que permitem a aquisição de parâmetros por inversão matemática despontaram como a técnica mais eficiente para estimar a fPAR, podendo ser utilizados tanto para ambientes agrícolas como florestais (Myneni *et al.*, 1997). A precisão dessas estimativas é dependente do modelo utilizado, do tipo e da qualidade dos dados de sensoriamento remoto, bem como do procedimento de inversão adotado (Jacquemoud *et al.*, 2000).

2.6.5. Eficiência do uso da luz fotossintética (ϵ)

Tradicionalmente os modelos de eficiência se baseiam no conceito de eficiência do uso da luz (LUE) originalmente proposto por Monteith (1972), que considerava a acumulação de biomassa um processo contínuo correlacionado entre a PAR e a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR).

$$APAR = fPAR \times PAR \quad (2.12)$$

Subsequentemente, Monteith (1977) mostrou que a produção vegetal correspondia aproximadamente ao produto da APAR pela constante de eficiência de conversão (ϵ). A equação de Monteith pode ser expressa como:

$$PPB = \epsilon \times APAR \quad (2.13)$$

onde:

PPB é medida em $\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, APAR é medida em MJ m^{-2} e ϵ é medida em g MJ^{-1} .

Logo quando introduzida, pensou-se que a eficiência de conversão da APAR em produtividade primária fosse uma constante empírica, com um limite superior na ordem de 3 g MJ^{-1} na ausência de condições de estresse (Monteith, 1972). Estudos posteriores, no entanto, revelaram importantes diferenças de eficiência entre tipos de vegetação (Russell *et al.*, 1989). Ruimy *et al.*, (1994), por exemplo, no intuito de aplicar a abordagem da LUE em escala global, realizou uma extensa pesquisa bibliográfica e tabulou valores de eficiência para diferentes tipos de vegetação. Tal estudo indicou que não só os diferentes tipos de vegetação convertem a radiação com diferentes eficiências, mas também que a fenologia da vegetação exerce um impacto considerável sobre essas variações. Essa é a variável que introduz o maior grau de incerteza em estimativas de PPL, podendo até mesmo variar significativamente ao longo de paisagens homogêneas (Nouvellon *et al.*, 2000).

O aumento das técnicas de sensoriamento remoto para estimar ϵ se deu apenas durante a última década, através do advento de dispositivos de medição espectrais de alta resolução (Hilker *et al.*, 2008). De forma geral, essas técnicas podem ser classificadas tanto em abordagens indiretas, as quais determinam ϵ a partir de estresses ambientais, e abordagens diretas, que tentam prever ϵ por meio de medições das mudanças de refletância espectral das folhas (Hilker *et al.*, 2008).

2.6.6. Determinação da eficiência fotossintética através de estresses ambientais

Os fatores de estresse que influenciam a eficiência fotossintética são numerosos e de difícil detecção em grandes áreas, principalmente devido à alta variabilidade espaço-temporal associada às condições locais e meteorológicas. O sensoriamento remoto tem focado especialmente sobre as condições relacionadas com a água, nitrogênio e temperatura (Liu e Kogan, 2006).

Recentemente, a determinação de ϵ tem sido feita pelo produto MODIS (MOD17), que estima a PPB em relação às médias de oito dias da PAR, $fPAR$ e ϵ . Para modelagem de ϵ , o algoritmo MOD17 faz uso de informações específicas sobre o bioma referentes à máxima eficiência do uso da luz ($\epsilon_{m\acute{a}x}$), conforme apresentado na metodologia deste estudo (item 3.2. do Capítulo 3).

2.6.7. Estimativa direta da eficiência fotossintética

A estimativa direta de ϵ não só oferece o potencial para a determinação do efeito dos estresses na vegetação, mas também inclui a informação sobre o grau em que estes estresses são limitantes para a fotossíntese (Demmig-Adams e Adams, 1996).

Através de técnicas de sensoriamento remoto, ϵ pode ser determinado de duas formas:

- Seja por mudanças na refletância das folhas decorrentes da fluorescência da clorofila, entretanto, sua aplicação é complexa, pois sob luz natural a fluorescência emitida pela vegetação representa menos de 3% da luz refletida na região do infravermelho próximo do espectro eletromagnético (Moya *et al.*, 2004).

- Seja utilizando o mecanismo de fotoproteção das folhas, baseando-se em observações de mudança de refletância nas folhas. Essas alterações se manifestam em duas bandas de absorção (531nm e 570nm) e podem ser quantificadas por meio de índices de vegetação, como o índice fotoquímico de refletância (PRI) (Gamon *et al.*, 1993).

$$PRI = \frac{\rho_{531} - \rho_{570}}{\rho_{531} + \rho_{570}} \quad (2.14)$$

A questão da escala continua a ser um problema para ambas as abordagens, uma vez que as aproximações ocorrem apenas em nível foliar. Além disso, as dinâmicas temporais existentes na fotossíntese (Los *et al.*, 2005), os requisitos temporais e espaciais para que essas observações possuam representatividade do estado fisiológico vegetativo e a relação entre PRI e ϵ com a idade, a estrutura do dossel e a área foliar (Rahman *et al.*, 2001), ainda não são bem compreendidas e conferem certa dose de incerteza a essas técnicas.

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

A área de estudo corresponde a dois sítios experimentais no estado de Rondônia, representativos das condições de pastagem e floresta, situados na Fazenda Nossa Senhora Aparecida (FNOSA) e na Reserva Biológica do Jaru (RBJ), localizadas nos municípios de Ouro Preto do Oeste e Ji-Paraná, respectivamente. Nesses sítios estão instaladas e em funcionamento estações meteorológicas automáticas de superfície, que compõem a Rede Estadual de Estações Meteorológicas de Rondônia (REMAR) em parceria com a Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental (SEDAM).

A Reserva Biológica do Jaru (figura 3.1A) é uma unidade de conservação federal do tipo proteção integral, sob a responsabilidade do órgão ambiental do governo brasileiro, Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). Situando-se no limite estadual entre Rondônia e Mato-Grosso, nos municípios de Ji-Paraná, Vale do Anari e Machadinho D'Oeste, a RBJ tem sua importância na conservação do bioma amazônico representada, principalmente, pela sua localização no interflúvio Madeira - Tapajós, uma das regiões brasileiras menos conhecidas cientificamente e de maior interesse para conservação do ponto de vista biológico, apontada como uma das principais zonas de endemismos na Amazônia Meridional (Cracraft, 1985; Haffer, 1997b). Possui uma área de 352.000 ha classificados como *Floresta Ombrófila Aberta* (Culf *et al.*, 1996) com uma vegetação características de terra-firme e altura média do dossel de aproximadamente 35 m, podendo chegar a 45 m. Os demais tipos de uso e cobertura da terra dizem respeito a áreas de pastagem (22%), sucessão secundária (10%) e corpos de água (2%) (Oliveira, 2012). A altitude da área da reserva varia entre 120 m e 150 m, e o solo é caracterizado como Podzólico vermelho-amarelo (Hodnett *et al.*, 1996). Com estações seca e chuvosas bem definidas, essa área tem um índice de precipitação médio anual superior a 2000 mm (Webler, 2007; Aguiar *et al.*, 2006), sendo a estação chuvosa compreendida entre os meses de novembro a março e a estação seca de julho a setembro. A temperatura média anual registrada é de 25°C e a umidade relativa média é de aproximadamente 82%.

A Fazenda Nossa Senhora (FNOSA) fica no município de Ouro Preto d'Oeste – RO (10°45'44"S, 62°21'27" W), a 50 km noroeste de Ji-Paraná (Figura 3.1B). Distam aproximadamente 180 km da REBIO Jaru (RBJ). Foi desmatada no ano de 1977, com raio

de aproximadamente 50 km, encontra-se na maior área plana com pastagem da região, com aproximadamente 4 km² de área, tendo uma altitude de 220 m acima do nível do mar (Culf *et al.*, 1996). A maior parte da região é composta por pastagem (74%), enquanto o restante se refere a áreas de sucessão secundária (16%) e floresta ombrófila aberta (10%) (Oliveira, 2012). A cobertura vegetal predominante é a gramínea *Brachiaria brizantha*, além de pequenas palmeiras dispersas. O solo é classificado como Podzólico vermelho-amarelo (Hodnett *et al.*, 1996). A temperatura média anual varia entre 25 e 26°C, com eventos de friagem entre maio e julho, conforme mostrado na figura 3.2. Já na figura 3.3, observa-se que a precipitação média anual é de 1754 mm (Webler, 2007; Aguiar *et al.*, 2006). A umidade relativa é em média de 80% para a estação chuvosa e 70% para a estação seca.

As torres micrometeorológicas nas duas localidades estão instaladas em estações experimentais da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMPRAPA), situadas nas coordenadas 10° 51' 46'' S e 61° 57' 24'' W (RBJ) e 9° 23' 49'' S e 62° 01' 10'' W (FNSA).

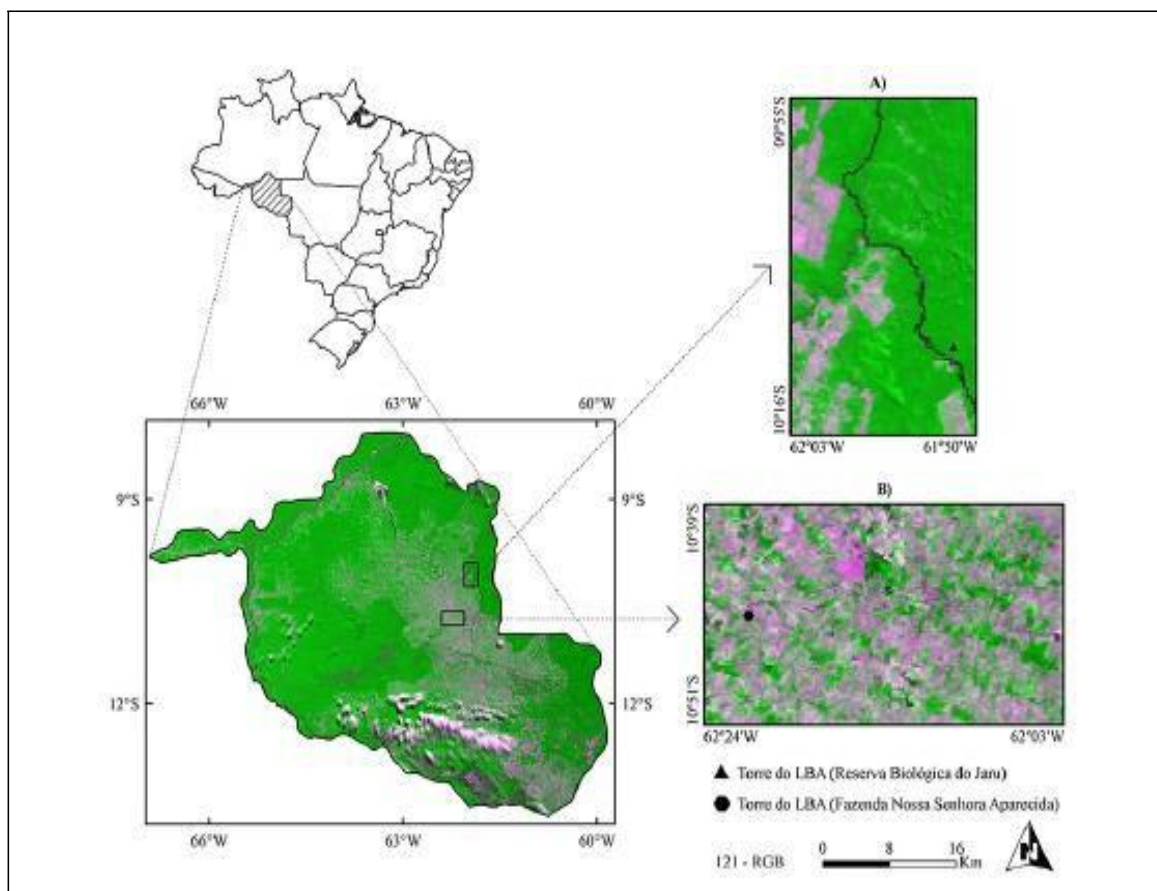


Figura 3.1 - Localização das regiões de estudo no estado de Rondônia (RO). A) Região da RBJ; B) Região da FNSA.

Fonte: Oliveira e Moraes (2013)

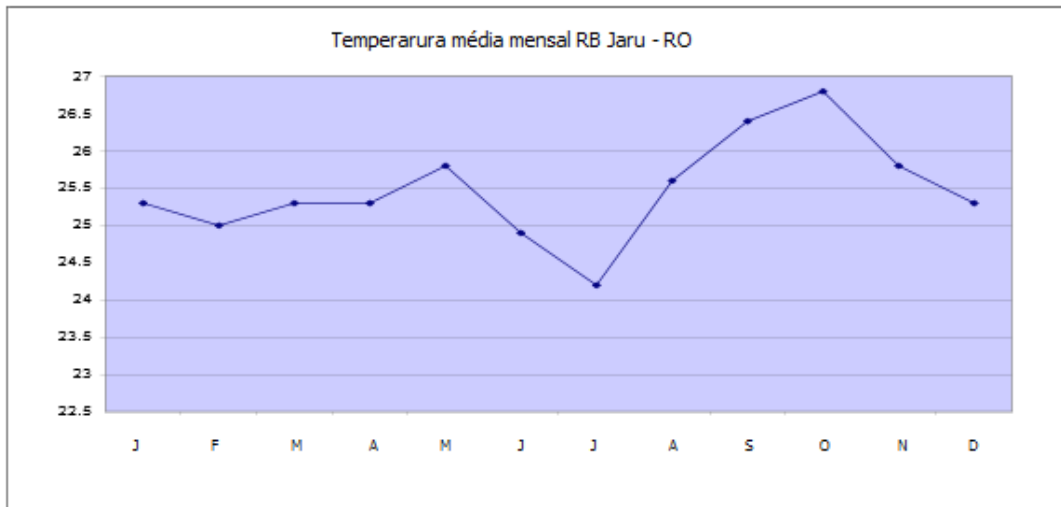


Figura 3.2 - Temperatura média mensal da Reserva Biológica do Jaru.

Fonte: Planaflores (1998).

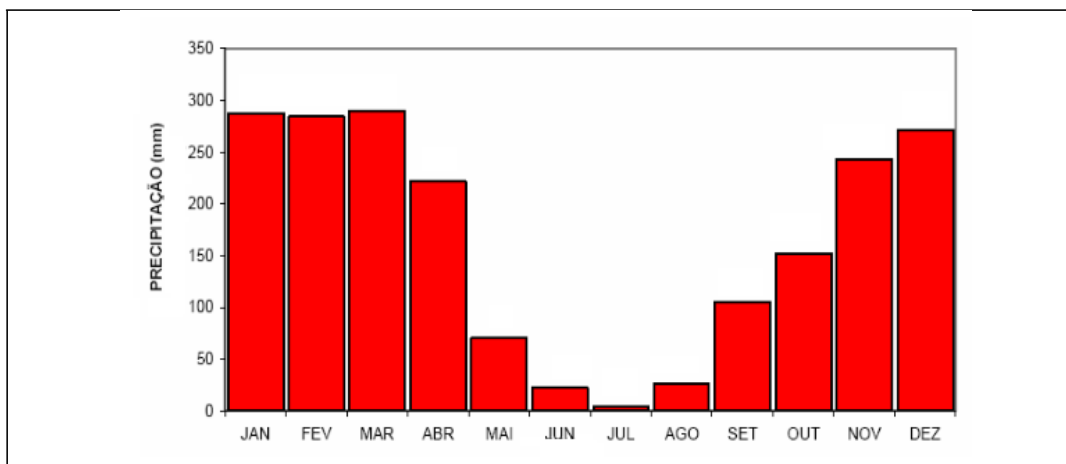


Figura 3.3 - Distribuição anual da Precipitação na região de Ji-Paraná.

Fonte: Ferreira da Costa *et al.* (1998).

3.2. O produto MOD17A2

O Sistema de Observação da Terra (EOS - Earth Observing System) da Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço (NASA - *National Aeronautics and Space Administration*) 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 Espectrorradiômetro Imageador de Resolução Moderada (MODIS - *The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo dos satélites Aqua e Terra, gerando os produtos MOD17A2/A3 (MOD17 User's Guide, 2003), armazenados no Centro de Distribuição de Arquivos Ativos (DAAC - Distributed Active Archive Center) da NASA.

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

$$PPL = PPB - RM \quad (3.1)$$

onde,

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].

$$PPB = \varepsilon \times APAR \quad (3.2)$$

onde,

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

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

$$\varepsilon = \varepsilon_{max} \times T_{escalar} \times DPV_{escalar} \quad (3.3)$$

onde,

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 $\varepsilon = 0,0$, 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 zero 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 $\varepsilon = 0,0$, 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_{max} e DPV_{min} , 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 banco de dados de Parâmetros dos Biomas (BPLUT - *Biome Parameter Look-Up Table*) acessado pelo algoritmo do produto MOD17A2.

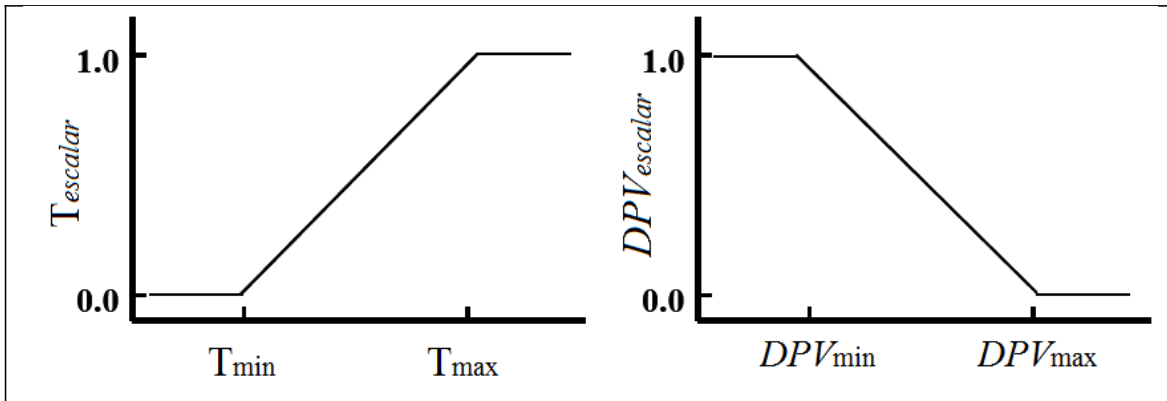


Figura 3.4 - Gráfico da função linear entre os fatores de atenuação da eficiência do uso da luz, $T_{escalar}$ e $DPV_{escalar}$, e a temperatura do ar e DPV .

$$APAR = PAR \times fPAR \quad (3.4)$$

onde,

$APAR$: 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; disponibilizada pelo produto MOD15.

$$PAR = R_g \times 0,45 \quad (3.5)$$

onde,

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 $1,25^\circ$.

$$RM = RM_{folha} + RM_{raiz} \quad (3.6)$$

$$RM_{folha} = Massa_{folha} \times RM_{basal_{folha}} \times PCR^{\left(\frac{T-20}{10}\right)} \quad (3.7)$$

$$Massa_{folha} = \frac{IAF}{PAF} \quad (3.8)$$

$$RM_{raiz} = Massa_{raiz} \times RM_{basal_{raiz}} \times PCR^{\left(\frac{T-20}{10}\right)} \quad (3.9)$$

$$Massa_{raiz} = Massa_{folha} \times \frac{C_{raiz}}{C_{folha}} \quad (3.10)$$

onde,

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°C; obtido no banco de dados de Parâmetros dos Biomas (BPLUT - *Biome Parameter Look-Up Table*) acessado pelo algoritmo do produto MOD17A2;

PCR : Parâmetro de controle da respiração em função da temperatura média do ar; obtido no banco de dados de Parâmetros dos Biomas (BPLUT - *Biome Parameter Look-Up Table*) acessado pelo algoritmo do produto MOD17A2;

T : Temperatura média ar [°C]; dado disponibilizado no banco de dados meteorológico de larga escala da NASA, com resolução de 1° por 1,25°;

IAF : Índice de área foliar [m².m⁻²]; obtido pelo produto MOD15;

PAF : Projeção da área foliar por unidade de massa [kg⁻¹]; obtido no banco de dados de Parâmetros dos Biomas (BPLUT - *Biome Parameter Look-Up Table*) acessado pelo algoritmo do produto MOD17A2;

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

$RM_{basal_{raiz}}$: Respiração de manutenção basal das raízes em [kg C.kg C⁻¹] a 20°C; obtido no banco de dados de Parâmetros dos Biomas (BPLUT - *Biome Parameter Look-Up Table*) acessado pelo algoritmo do produto MOD17A2;

$\frac{C_{raiz}}{C_{folha}}$: Razão entre o Carbono nas raízes e nas folhas; obtido no banco de dados de Parâmetros dos Biomas (BPLUT - *Biome Parameter Look-Up Table*) acessado pelo algoritmo do produto MOD17A2.

Vale ressaltar que os dados de PPL extraídos do produto MOD17A2, neste trabalho, são referentes a valores médios correspondentes a 300 píxeis de 1 x 1 km dessa imagem em área de floresta e pastagem, respectivamente. Cada valor obtido em um pixel corresponde ao valor médio da PPL nesse pixel em kg.C.m^{-2} . Dessa forma, os dados extraídos nas áreas de pastagem e floresta tem a unidade de kg.C.m^{-2} .

3.3. Estudo do comportamento sazonal e anual da produtividade primária líquida

O comportamento sazonal e anual da produtividade primária líquida será investigado e relacionado às variáveis meteorológicas radiação solar global, temperatura do ar e precipitação medidas *in situ*, na tentativa de se apontar a participação de cada uma delas no fenômeno investigado. Neste caso, o estudo será focado na área de floresta, tendo em vista um maior entendimento do comportamento do bioma em seu estado característico. Para tanto, serão utilizados os dados da Rede Estadual de Estações Meteorológicas de Rondônia (REMAR) obtidos no município de Ji-Paraná.



Figura 3.5 - Instrumentos de medida da precipitação (Pluviômetro) (a), da temperatura do ar e umidade relativa do ar (termohigrômetro) (b) e da radiação (radiômetro) (c).

Fonte (Gomes, 2011).

3.4. 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:

$$Seq C_{Anual_{anoj+1}} = (Pnet Total_{Anoj+1} - Pnet Total_{Anoj}) \times 0,5 \quad (3.11)$$

onde,

$Seq C_{Anual}$: 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 (PPL) da vegetação é constituída de carbono (Fernandes *et al.*, 2007; Garcia *et al.*, 2010; Leles *et al.*, 1995; Marklund e Schoene, 2006; Reis *et al.*, 1994; Husch, 2001; Thangata e Hildebrand, 2012); e $Pnet Total_{Ano}$: obtida pelo produto MOD17A2.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análise anual da produtividade primária

4.1.1. Área de floresta

Na Tabela 4.1 estão discriminados os valores de Produtividade Primária Líquida (PPL) total mensal e precipitação total mensal do período compreendido entre os anos de 2002 e 2010. A partir desses valores e dos percentis associados, os meses do ano foram classificados como meses de menor, intermediária e maior produtividade e precipitação, conforme exposto na tabela 4.2.

Observa-se que a PPL total do período entre os anos de 2002 e 2010 foi igual a 9,3 kg.C.m⁻². O comportamento da produtividade obtido pela contribuição de cada mês ao longo do período de estudo apresenta valores mais elevados de março a abril e entre outubro e novembro, por outro lado os menores valores foram registrados entre julho e setembro e no mês de fevereiro, ao passo que nos meses de dezembro a janeiro e entre maio e junho foram observados valores intermediários. A contribuição total dos meses de mais elevada produtividade resultou em 4,3 kg.C.m⁻², ou seja, este valor indica que durante o período analisado esses meses foram responsáveis por 46,1% da produtividade primária total do período. Destaca-se ainda o fato de que no conjunto desses quatro meses, todos eles apresentaram contribuições acima de 10%, sendo que o maior valor ocorreu em abril e o menor em março com 1,13 kg.C.m⁻² (12,1%) e 1,03 kg.C.m⁻² (11,0%), respectivamente. Nos meses de produtividade intermediária a contribuição total foi de 3,6 kg.C.m⁻², representando 38,2% do total do período, variando entre 0,79 kg.C.m⁻² (8,4%) em dezembro e 0,99 kg.C.m⁻² (10,6%) em maio. Já no período de menor produtividade, o total foi de 1,5 kg.C.m⁻², equivalendo a 15,7% do total do período, variando entre 0,07 kg.C.m⁻² (0,8%) em agosto e 0,63 kg.C.m⁻² (6,7%) em fevereiro. Os valores extremos dos totais mensais de produtividade ocorreram em agosto com 0,07 kg.C.m⁻² (0,8%) e abril 1,13 kg.C.m⁻² (12,1%), respectivamente.

Tabela 4.1 - Valores totais mensais da Produtividade Primária Líquida e da precipitação para REBIO-Jarú para o período de 2002 a 2010.

Mês	PPL total (kg.C.m ⁻²)	PPL total (%)	Precipitação total (mm)	Precipitação total (%)
Jan	0,93	9,9	2515,1	14,6
Fev	0,63	6,7	2764,3	16,1
Mar	1,03	11,0	3081,7	17,9
Abr	1,13	12,1	1920,2	11,2
Mai	0,99	10,6	875,7	5,1
Jun	0,87	9,3	62,3	0,4
Jul	0,42	4,5	102,8	0,6
Ago	0,07	0,8	192,1	1,1
Set	0,35	3,7	837,9	4,9
Out	1,06	11,4	1497,0	8,7
Nov	1,08	11,6	1372,9	8,0
Dez	0,79	8,4	1993,7	11,6
Total	9,34	100,0	17215,7	100,0

Tabela 4.2 – Classificação em percentis da Produtividade Primária Líquida total e da precipitação.

Percentil (%)	PPL total (%)	Precipitação total (%)
< 33 menores valores	0,0-7,8	0,0-5,0
34-66 valores intermediários	7,9-10,7	5,1-11,3
67-100 valores mais altos	10,8-12,1	11,4-17,9

Na região de estudo, as estações do ano são denominadas como períodos Úmido (janeiro a março - U), Úmido Seco (abril a junho - US), Seco (julho a setembro - S) e Seco Úmido (outubro a dezembro - SU). De acordo com a Tabela 4.3, durante o período Úmido, a PPL total foi igual a 2,59 kg.C.m⁻², equivalendo a 27,7% do total do período. No período Úmido Seco, o total foi de 2,99 kg.C.m⁻², representando 32,0% do total do período. Por sua vez, no período Seco Úmido a PPL total foi de 2,93 kg.C.m⁻² que equivale a 31,4% do total do período. Por fim, no período Seco, ocorreu a menor PPL total igual 0,84 kg.C.m⁻², representando apenas 9,0% do total do período. Vale ressaltar que com exceção do período Seco, os demais tiveram valores de PPL totais muito próximos, com diferenças entre si de no máximo 13,5%. Utilizando como base a divisão em percentis mostrada na tabela 4.4, nota-se que os períodos Úmido Seco e Seco Úmido foram classificados como períodos de PPL mais elevada, o Úmido de PPL intermediária e o Seco de menor produtividade.

Ainda em função do cálculo dos percentis, os períodos Úmido e Seco Úmido tiveram os maiores valores de precipitação representando 48,6% e 28,3% do total do período, respectivamente. O período Úmido Seco representou valores intermediários com 16,6% da precipitação total do período e o período Seco equivaleu a apenas 6,6%, sendo o de menor precipitação. Os períodos úmidos (úmido, Úmido Seco e Seco Úmido) foram também os de PPL mais elevada e o seco o de menor PPL (Seco). As diferenças de PPL total entre os períodos úmidos e seco foram consideráveis, tendo em vista que os primeiros tiveram uma PPL total sempre superior a 27,0% do total do período, com uma soma percentual igual a 91% do total do período, enquanto que o seco representou apenas 9,0%. Vale ressaltar, que em termos absolutos, o mês de abril foi o que teve maior PPL total mensal e precipitação intermediária e o mês de agosto a menor PPL e baixa precipitação. Dessa forma, observa-se uma relação entre a PPL e a precipitação, sendo que nos períodos úmidos ocorrem os maiores valores de PPL, enquanto no seco os menores.

Tabela 4.3 - Porcentagem associada às estações do ano da Produtividade Primária Líquida total e da precipitação para REBIO-Jarú no período de 2002 a 2010.

Período	PPL total (%)	Precipitação total (%)
U	27,7	48,6
US	32,0	16,6
S	9,0	6,6
SU	31,4	28,3

Tabela 4.4 – Classificação em percentis das estações (U, US, S, SU) de acordo com os valores de Produtividade Primária Líquida total e de precipitação.

Percentil (%)	PPL total (%)	Precipitação (%)
< 33 menores valores	0,0-27,5	0,0-16,5
34-66 valores intermediários	27,6-31,3	16,6-28,0
67-100 valores mais altos	31,4-32,0	28,1-48,6

As figuras 4.1 e 4.2 ilustram, respectivamente, o comportamento da PPL e da precipitação total mensal e sazonal em relação ao percentual do período estudado, indicando, como já descrito, menores valores de PPL nos meses do período seco (julho a

setembro) e valores significativamente superiores nos demais meses pertencentes aos períodos mais úmidos (outubro a junho). Vale ressaltar que junho teve uma precipitação equivalente aos meses mais secos e PPL total ainda elevada, o que pode ser o efeito da presença de água no solo armazenada durante o período úmido que progressivamente vai diminuindo devido à redução das chuvas nos meses de junho, julho e agosto, causando uma diminuição da PPL nesses meses. No mês de setembro, observa-se um aumento da precipitação acompanhada por um aumento da PPL total nesse mês. Outro mês que chama a atenção é o de fevereiro, pelo fato de ter precipitação muito próxima aos meses de janeiro e março, mas PPL total significativamente inferior, equivalendo a 68% e 61% das PPLs totais de janeiro e março, respectivamente. Esse comportamento indica que apesar das boas condições de precipitação, outro fator atuou como limitante da PPL em fevereiro.

Os resultados indicam uma coerência, tendo em vista que mesmo nos meses em que a PPL não respondeu a diminuição da precipitação, observou-se que períodos mais úmidos precederam e abasteceram o solo de água, como no caso mais crítico no mês de junho que teve precipitação entre os menores valores e PPL entre os maiores. Casos menos críticos como em abril, outubro e novembro, em que a precipitação foi intermediária e a PPL entre as maiores do período, indicam que o volume de chuva, embora menor, permaneceu em um limiar suficiente para abastecer o solo e evitar o estresse hídrico da vegetação. Por outro lado, os casos em que a precipitação não foi fator limitante, como de dezembro a fevereiro, outros fatores podem ter limitado a PPL. Por fim, nos meses de março e de julho a setembro, a PPL respondeu bem a precipitação ficando na mesma classe de percentil.

Na escala sazonal, percebe-se o mesmo comportamento da PPL com valores menores no período seco e significativamente maiores e equivalentes nos períodos úmidos (U, US e SU), sendo que o período úmido com menor PPL apresentou um total de 68% superior à PPL do período Seco. Nos períodos US e SU, tem-se valores de PPL praticamente idênticos, equivalendo a 32,0% e 31,4% do total anual, respectivamente, para valores de precipitação significativamente diferentes. No período US, a precipitação total foi 40% inferior ao do período SU. Novamente aqui, observa-se uma queda da precipitação sem impacto na PPL durante os períodos mais úmidos, reforçando que a água armazenada no solo supriu as necessidades hídricas da vegetação, propiciando uma PPL elevada nesse período de queda da precipitação (US). Os valores de PPL muito próximos nos períodos SU, U, US para valores de precipitação diferenciados em cada um desses períodos, indica novamente, que a oscilação da precipitação durante os períodos úmidos não afetam a

PPL.

devido ao fato do solo estar bem abastecido de água e estar suprindo as necessidades hídricas da vegetação.

Dessa forma, tanto na escala mensal quanto na sazonal os maiores valores de PPL ocorreram imediatamente após o período Úmido, em abril e no período Úmido Seco, respectivamente. Essa é a época em que o solo alcança seu máximo teor de umidade devido ao excedente hídrico do período Úmido. Por outro lado, a menor PPL ocorre em agosto, dois meses após o início do período Seco, quando as precipitações diminuem drasticamente e, portanto, não há reposição das perdas de água pelo solo. Nessa época, o solo atinge seu menor teor de umidade, podendo não atender as exigências de água da vegetação, com um consequente estresse hídrico que atua como fator limitante para a PPL.

A precipitação é fator limitante de julho a setembro, ou seja, no período seco. Nos demais meses e períodos a PPL responde diretamente à umidade do solo, que por sua vez responde à precipitação. Outros fatores limitantes ocorrem nos meses de dezembro a fevereiro e no período Úmido e podem estar relacionados à menor intensidade de radiação solar devido a maior cobertura de nuvens durante o período chuvoso da região. A relação entre a PPL e outros elementos meteorológicos, tais como a radiação solar e temperatura do ar será investigada mais adiante.

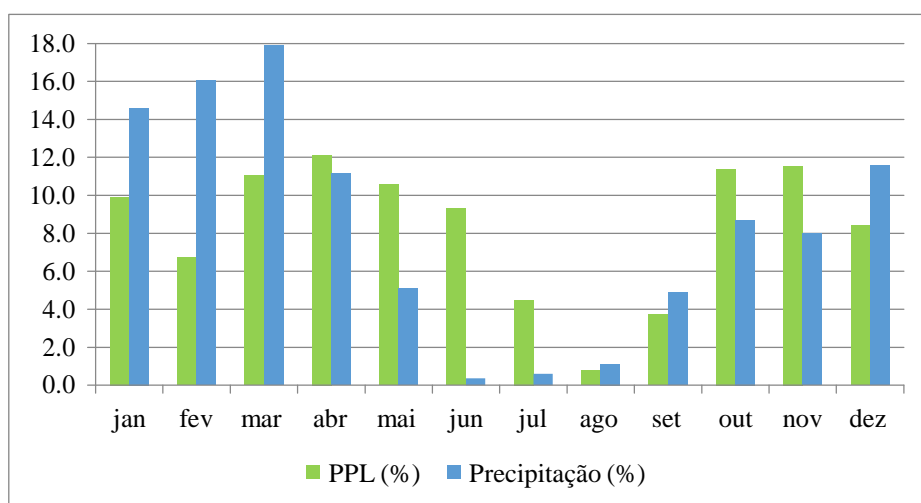


Figura 4.1 - Distribuição mensal da Produtividade Primária Líquida e da precipitação.

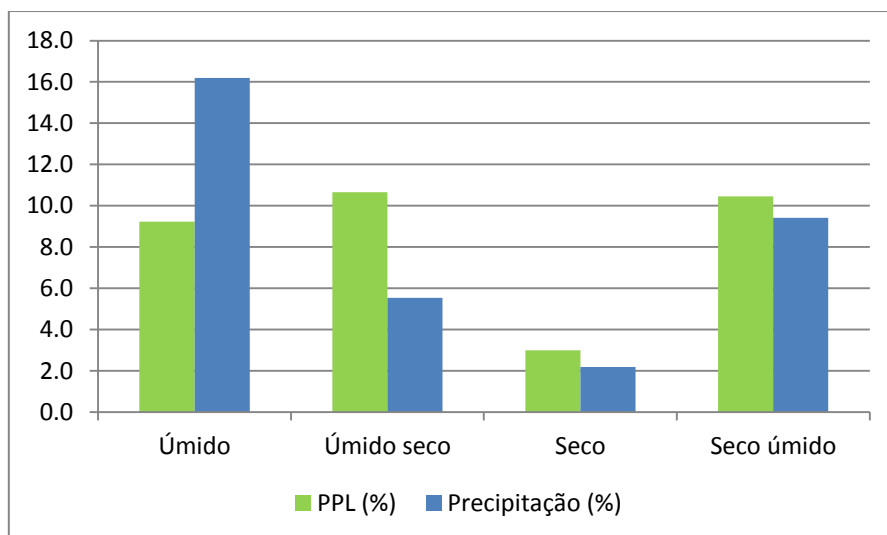


Figura 4.2 - Distribuição sazonal da Produtividade Primária Líquida e da precipitação.

4.1.2. Área de floresta versus pastagem

A tabela 4.5 e a figura 4.3 mostram que, conforme era esperado, a produtividade primária da floresta superou a da pastagem. A PPL total registrada durante o período de estudo na área de pastagem foi, em média, cerca de 40% inferior ao observado na área de floresta. As diferenças extremas entre os dois locais foram observadas nos meses de agosto e setembro, variando entre 0,44% (agosto) e -57,23% (setembro), em épocas de menor produtividade, ou seja, no período seco. Portanto, nota-se que os extremos das diferenças entre as duas localidades não só ocorreram no mesmo período, como também se produziram em meses que se sucederam.

Em termos de magnitude, a maior produtividade na pastagem ocorreu em março, já na floresta, abril foi o mês mais produtivo. Em relação aos menores valores, em ambos os casos agosto foi o mês mais crítico. Ressalta-se ainda, a ocorrência de uma pequena diferença de classificação entre as duas localidades baseada em seus respectivos percentis. Enquanto maio se enquadrava como intermediário na área de floresta, o mesmo não ocorre na área de pastagem, onde esse mês alinhou-se com os valores mais elevados. Em outubro, por sua vez, ocorre o inverso, esse mês é caracterizado como intermediário na pastagem e de elevada produtividade na floresta.

Tabela 4.5 - Valores comparativos mensais da Produtividade Primária Líquida entre a REBIO-Jarú e a Fazenda Nossa Senhora no período de 2002 a 2010.

Mês	PPL total_Floresta (kg.C.m ⁻²)	PPL total_Pastagem (kg.C. m ⁻²)	PPL_Pastagem/PPL_Floresta (%)
Jan	0,93	0,58	62,38
Fev	0,63	0,38	60,91
Mar	1,03	0,66	63,65
Abr	1,13	0,65	57,82
Mai	0,99	0,61	61,86
Jun	0,87	0,55	62,80
Jul	0,42	0,28	67,75
Ago	0,07	0,07	100,44
Set	0,35	0,15	42,77
Out	1,06	0,52	48,96
Nov	1,08	0,61	56,28
Dez	0,79	0,51	64,72
Total	9,34	5,57	59,62

Tabela 4.6 - Distribuição em percentis da Produtividade Primária Líquida da REBIO-Jarú e Fazenda Nossa Senhora no período entre 2002 e 2010.

Percentil (%)	PPL total_Floresta (kg.C.m ⁻²)	PPL total_Pastagem (kg.C.m ⁻²)
< 33 menores valores	0,0-0,73	0,0-0,46
34-66 valores intermediários	0,74-1,00	0,47-0,59
67-100 valores mais altos	1,01-1,13	0,60-0,66

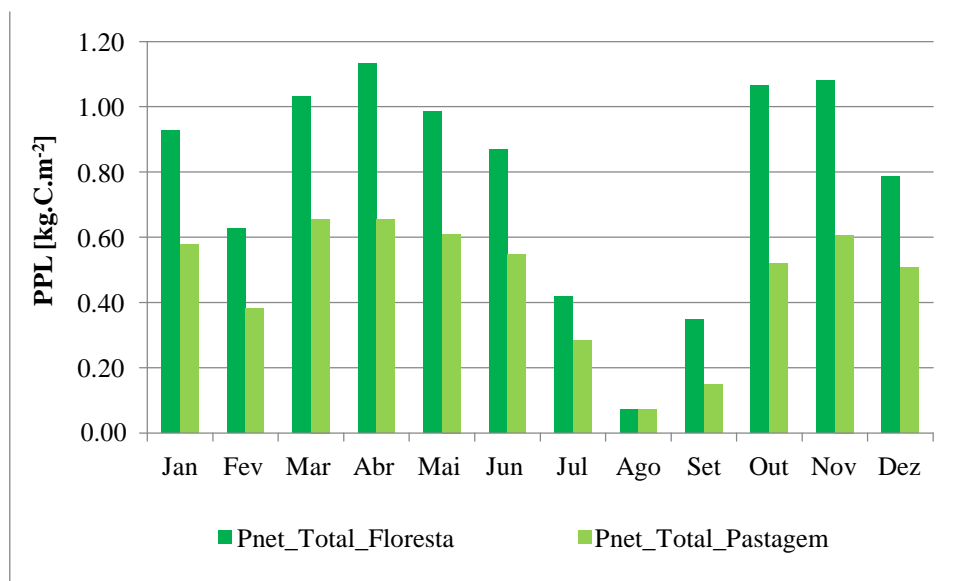


Figura 4.3 – Produtividade Primária Líquida mensal da REBIO-Jarú e da Fazenda Senhora.

Nota-se que de acordo com a figura 4.4, as produtividades registradas na REBIO-Jarú apresentaram uma associação positiva com os valores da área de pastagem, localizada na Fazenda Nossa Senhora. Como se pode observar, o coeficiente de determinação entre as PPLs dos dois locais foi de 94%, indicando, portanto, similaridade em seus comportamentos. Essa similaridade se reflete também na influência da precipitação como fator limitante da PPL no período seco tanto na floresta quanto na pastagem e da radiação solar como possível fator limitante no mês de fevereiro.

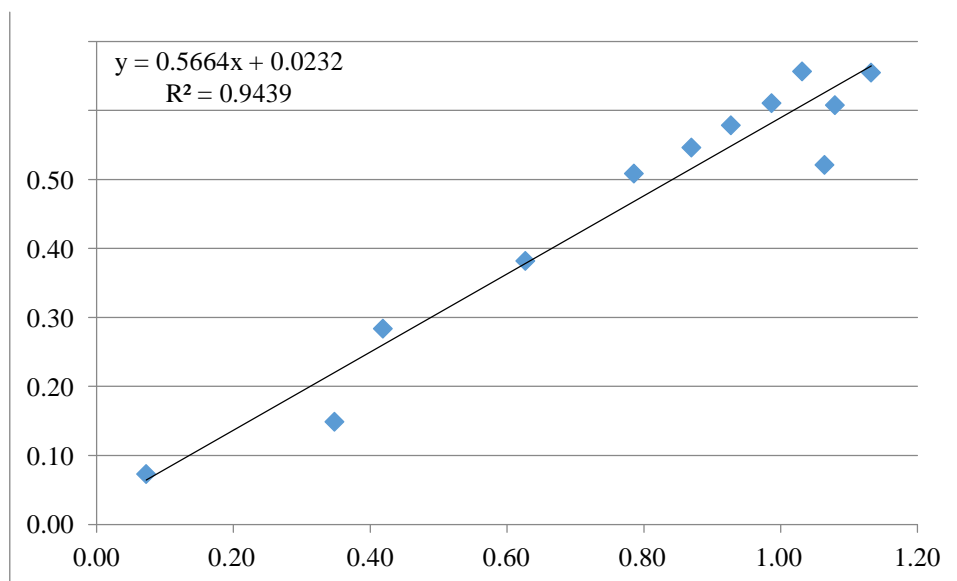


Figura 4.4 - Gráfico de dispersão entre a Produtividade Primária Líquida mensal em [kg.C.m⁻²] da REBIO-Jarú e da Fazenda Senhora.

4.2. Análise interanual da produtividade primária

4.2.1. Área de floresta

Na Tabela 4.7 estão discriminados os valores de PPL total anual e precipitação total anual dos anos de 2002 a 2010. A partir desses valores e dos percentis associados, os anos foram classificados como de menor, intermediária e maior produtividade e precipitação.

Observa-se que o comportamento da produtividade obtido pela contribuição de cada ano ao longo do período de estudo apresenta valores mais elevados nos anos de 2002, 2003 e 2009. Por sua vez os menores valores foram registrados entre 2004 e 2006, enquanto que nos anos de 2007, 2008 e 2010 foram observados valores intermediários. A contribuição total dos anos de mais elevada produtividade resultou em 4,48 kg.C.m⁻², ou seja, este valor indica que durante o período analisado esses anos foram responsáveis por 47,9% da produtividade primária total do período. Destaca-se ainda o fato de que no conjunto desses três anos, todos eles apresentaram contribuições acima de 13%, sendo que o maior valor ocorreu em 2002 e o menor em 2009 com 1,74 kg.C.m⁻² (18,6%) e 1,30 kg.C.m⁻² (13,9%), respectivamente. Nos anos de produtividade intermediária a contribuição total foi de 3,13 kg.C.m⁻², representando 33,5% do total do período, variando entre 1,02 kg.C.m⁻² (10,9%) em 2007 e 2010 e 1,09 kg.C.m⁻² (11,7%) em 2008. Já no período de menor produtividade, o total foi de 1,73 kg.C.m⁻², equivalendo a 18,6% do

total, variando entre 0,41 kg.C.m⁻² (4,4%) em 2005 e 0,69 kg.C.m⁻² 2004 (7,4%). Como já mencionado, a PPL total do período estudado foi igual a 9,34 kg.C.m⁻².

De acordo com a classificação em percentis mostrada na tabela 4.8, os anos de mais elevada PPL total (2002, 2003 e 2009) foram classificados como tendo índices pluviométricos entre os intermediários e mais elevados do período, indicando que em anos úmidos, as precipitações garantem um permanente abastecimento de água para o solo proporcionando assim boa produtividade. Por sua vez, os anos de menor PPL total (2005 a 2006) foram classificados entre os de maior e menor precipitação total. O ano de 2005 em que ambas foram as menores do período indica que a chuva atua diretamente como um fator limitante da PPL total durante anos secos devido ao baixo armazenamento de água no solo. O ano de 2006 em que a PPL total foi menor e a precipitação total foi maior indicam que outros fatores limitantes atuaram reduzindo a PPL, apesar das boas condições de precipitação. O ano de 2010 combinou PPL total e precipitação total na classe intermediária. Já os anos de 2007 e 2008 tiveram PPL total na classe intermediária, apesar dos menores valores de precipitação. Nota-se ainda que 2005 apresentou comportamento da PPL diferenciado dos anos de 2007 e 2008, que também tiveram totais de precipitação na classe de menores valores. Tendo em vista esses fatos, fica claro que na escala interanual é muito mais complexa a descrição do comportamento da PPL total anual em função da precipitação total anual, ou seja, a comparação de dois totais anuais não traduz as interações que ocorreram nos doze meses considerados. Na Figura 4.5 observa-se essa ausência de uma relação evidente entre a PPL total anual e a precipitação total anual, uma vez que o baixo valor do coeficiente de determinação (0,08).

Tabela 4.7 - Valores totais anuais da Produtividade Primária Líquida e da precipitação para REBIO-Jarú para o período de 2002 a 2010.

Ano	PPL (kg.C.m ⁻²)	PPL (%)	Precipitação (mm)	Precipitação (%)
2002	1,74	18,6	1921,7	11,2
2003	1,44	15,5	2424,7	14,1
2004	0,69	7,4	-	-
2005	0,41	4,4	1676,4	9,7
2006	0,63	6,8	2060,5	12,0
2007	1,02	10,9	1246,9	7,2
2008	1,09	11,7	1711,2	9,9
2009	1,30	13,9	1786,5	10,4
2010	1,02	10,9	1962,8	11,4
Total	9,34	100,0	17215,7	100,0

Tabela 4.8 – Classificação em percentis da Produtividade Primária Líquida total e da precipitação.

Percentil (%)	PPL (%)	Precipitação (%)
< 33 menores valores	0,0-9,6	4,4-10,2
34-66 valores intermediários	9,7-12,3	10,3-11,6
67-100 valores mais altos	12,4-18,6	11,7-14,1

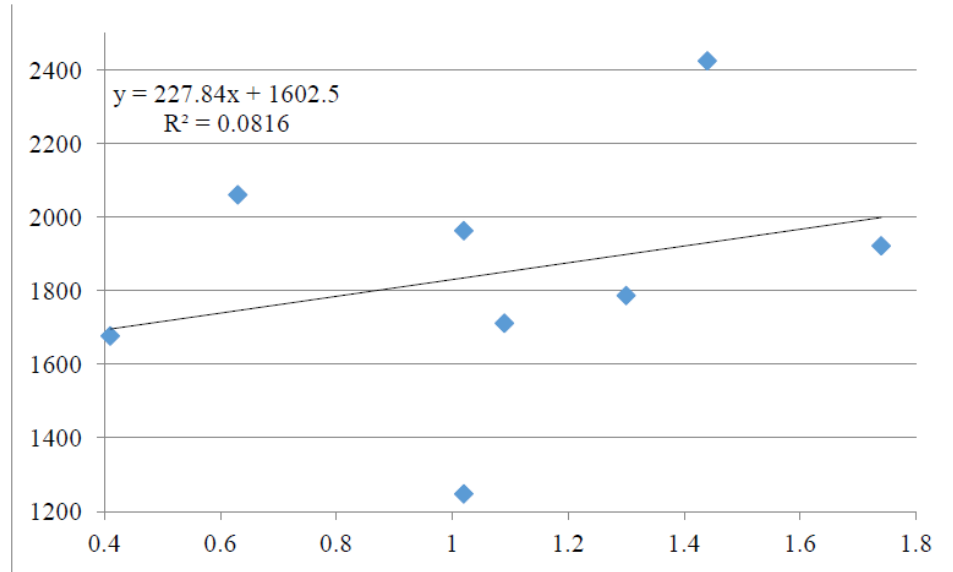


Figura 4.5 – Gráfico de dispersão entre a Produtividade Primária Líquida anual e a precipitação total anual na REBIO-Jarú.

Ao se analisar especificamente as estações Úmida, Úmida Seca, Seca e Seca Úmida, percebe-se que ocorreram treze casos de menor PPL (Tabela 4.9). Este comportamento foi observado no período Seco de 2004 a 2008 e em 2010 e no período US de 2005, que coincidiram com baixos valores de precipitação (Tabela 4.11). Os demais casos ocorreram nos períodos úmidos (U, US e SU) em que a precipitação caracterizou-se como intermediária ou elevada, o que indica a ação de outros fatores limitantes além da precipitação. Em contrapartida, no período Seco dos anos de 2002, 2003 e 2009 e no período Úmido Seco de 2007 e 2010 as precipitações ficaram entre as mais baixas, mas a PPL, no entanto, atingiu valores entre intermediários e elevados. Pode-se observar que nos anos de 2002, 2003 e 2009 o período Seco foi menos intenso do que nos demais anos, conservando a umidade do solo em níveis suficientes para atender a demanda hídrica da vegetação. Os anos de 2007 e 2010 tiveram provavelmente uma estação Úmida Seca com

boas condições de água no solo pelo fato desta ter sido precedida por períodos bastante úmidos, o que acabou garantindo uma boa PPL apesar da redução da chuva.

Tabela 4.9 - Porcentagem da PPL associada às estações do ano para REBIO-Jarú de 2002 a 2010.

		PPL total (%)								
		2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
U		4,9	3,3	2,7	2,9	2,7	3,1	2,4	3,2	2,5
US		4,3	4,5	3,0	1,2	2,1	4,9	4,3	3,4	4,4
S		3,8	2,8	-1,5	-2,5	-0,8	-0,1	1,9	3,9	1,5
SU		5,6	4,8	3,3	2,8	2,8	3,1	3,2	3,4	2,5

Tabela 4.10 – Classificação em percentis da Produtividade Primária Líquida.

Percentil (%)	PPL total (%)
< 33 menores valores	0,0-2,7
34-66 valores intermediários	2,8-3,3
67-100 valores mais altos	3,4-5,6

Tabela 4.11 - Porcentagem da precipitação associada às estações do ano para REBIO-Jarú de 2002 a 2010.

		Precipitação (%)								
		2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
U		4,1	7,1	-	4,1	5,6	3,6	3,9	5,8	7,1
US		2,0	2,6	-	1,2	1,9	0,7	1,8	2,7	1,1
S		1,1	1,2	-	0,3	0,6	0,6	0,1	1,1	0,2
SU		3,9	3,1	-	4,1	3,8	2,4	4,1	0,8*	3,0

*O período SU do ano de 2009 foi considerado na classe de valores intermediários tendo em vista que seu total pluviométrico foi contabilizando sem os meses de novembro e dezembro (dados faltantes). Em vista dos valores de novembro e dezembro dos demais anos, 2009 com certeza alcançaria a classe intermediária.

Tabela 4.12 – Classificação em percentis da precipitação.

Percentil (%)	Precipitação (%)
< 33 menores valores	0,0-1,2
34-66 valores intermediários	1,3-3,6
67-100 valores mais altos	3,7-7,1

Conforme as tabelas 4.13 e 4.15, ao se reduzir ainda mais a escala temporal para base mensal, tem-se que dos trinta e dois casos em que a PPL total mensal ficou dentro da classe dos menores valores, desconsiderando o ano de 2004 por falta de dados de precipitação, dezoito se enquadraram na classe de menores totais de precipitação do período (56% dos casos), sendo que quatro ocorreram no período Úmido Seco e quatorze no período Seco. Os casos restantes tiveram precipitações nas classes dos valores intermediários e dos maiores valores do período. Assim, os dezoito casos mencionados indicam que a precipitação pode ser um fator limitante da PPL. Os outros casos indicam que mesmo em boas condições de precipitação, outros fatores que não a precipitação limitaram a PPL. Por outro lado, ocorreram valores mais baixos de precipitação totais mensais associados a valores intermediários e mais altos de PPL total mensal. Quinze casos exemplificam essas condições, são eles: abril de 2007, maio de 2007 e 2010, junho de 2002 e 2003 e de 2007 a 2010, julho de 2002 e de 2008 a 2010 e agosto de 2003 e 2009. Nove ocorreram após o período Úmido, meses de abril a junho, indicando que apesar da diminuição das chuvas, o solo ainda estava bem abastecido de água e suprimindo as necessidades hídricas da vegetação, proporcionando boa produtividade. Por sua vez, os seis casos restantes, meses de julho e agosto, ocorrem totalmente dentro do período seco, como em 2002 e 2003 e de 2008 a 2010. Entretanto, os anos de 2002, 2003, 2009 e 2010 foram classificados como tendo precipitações de intermediária as mais elevadas, o que pode ter mitigado seus períodos secos com um bom armazenamento de água no solo durante o período chuvoso. Nos anos de 2002, 2003 e principalmente em 2009, fica bem evidente o baixo impacto do período seco na PPL total anual, tendo em vista que em 2002 e 2003 apenas um mês, em 2009 nenhum mês, do período seco teve PPL na classe de menores valores. Em 2010 o impacto do período seco na PPL foi maior, mas ocorreu somente três meses depois do início desse período, indicando que as boas condições de umidade do solo perduraram por mais tempo. Por sua vez, o ano de 2007 foi classificado como tendo precipitação dentro dos menores valores do período estudado, mas foi precedido por um ano classificado como chuvoso, o que pode ter atrasado a resposta da PPL ao seu período seco, devido ao armazenamento de água no solo. Por fim, o ano de 2008, apesar de ter sua precipitação na classe dos menores valores do período e ter sido precedido por um ano similar, apresentou PPL na classe intermediária, o que pode ainda ser um reflexo das boas condições hídricas do ano de 2006, que permitiu um armazenamento de água no solo mais duradouro.

Nos meses de fevereiro, março e dezembro, em vários anos, a PPL foi limitada por outros fatores que não a precipitação. Isso ocorreu também em janeiro de 2010, abril de 2009, setembro de 2006 e outubro de 2006 e 2010. Nos demais meses, somente a precipitação cumpriu esse papel em todos os anos (de maio a agosto e em novembro).

Tabela 4.13 - Porcentagem da Produtividade Primária Líquida associada aos meses de cada ano para REBIO-Jarú de 2002 a 2010.

		PPL total mensal (%)								
Mês	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	
Jan	1,4	1,3	0,9	1,2	1,0	1,1	0,9	1,3	0,7	
Fev	1,0	1,2	0,5	0,5	0,6	0,8	0,6	0,9	0,5	
Mar	2,4	0,8	1,3	1,1	1,1	1,2	0,8	1,0	1,3	
Abr	1,7	1,3	1,5	1,2	1,3	1,5	1,4	1,0	1,3	
Mai	1,7	1,6	1,0	0,1	0,7	1,7	1,3	1,2	1,4	
Jun	0,9	1,7	0,5	-0,1	0,2	1,7	1,6	1,2	1,6	
Jul	1,1	0,1	0,1	-0,7	0,1	0,5	1,2	1,2	1,0	
Ago	0,7	0,9	-1,1	-0,9	-0,5	-0,3	0,3	1,5	0,2	
Set	2,1	1,8	-0,5	-0,9	-0,4	-0,4	0,4	1,3	0,3	
Out	2,2	2,3	1,1	1,1	0,6	1,0	0,9	1,3	0,6	
Nov	2,3	1,6	1,0	1,2	1,4	0,9	0,9	1,2	1,1	
Dez	1,0	0,9	1,1	0,4	0,7	1,2	1,4	0,9	0,8	

Tabela 4.14 – Classificação em percentis da Produtividade Primária Líquida.

Percentil (%)	PPL total mensal (%)
< 33 menores valores	0,0-0,8
34-66 valores intermediários	0,9-1,2
67-100 valores mais altos	1,3-2,4

Tabela 4.15 - Porcentagem da Produtividade Primária Líquida associada aos meses de cada ano para REBIO-Jarú de 2002 a 2010.

Mês	Precipitação total mensal (%)									
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	
Jan	1,3	2,0	-	0,9	1,2	0,9	0,9	2,3	3,0	
Fev	1,3	2,1	-	1,4	2,4	1,1	1,5	1,9	2,2	
Mar	1,5	3,0	-	1,8	2,0	1,6	1,5	1,6	1,9	
Abr	1,4	1,5	-	0,8	1,6	0,3	1,3	1,9	0,9	
Mai	0,6	1,0	-	0,4	0,3	0,3	0,5	0,8	0,2	
Jun	0,0	0,1	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Jul	0,1	0,0	-	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	0,1	
Ago	0,2	0,3	-	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,0	
Set	0,8	0,9	-	0,3	0,5	0,4	0,1	0,7	0,1	
Out	0,7	0,9	-	1,3	1,3	0,9	1,0	0,8	0,9	
Nov	1,0	0,8	-	0,8	1,1	0,9	1,3	-	1,2	
Dez	2,2	1,4	-	1,9	1,4	0,6	1,8	-	0,9	

4.16 - Classificação em percentis da precipitação.

Percentil (%)	Precipitação total mensal (%)
< 33 menores valores	0,0-0,4
34-66 valores intermediários	0,5-1,3
67-100 valores mais altos	1,4-3,0

4.2.2. Área de floresta versus pastagem

De acordo como a tabela 4.17, nota-se que em todos os anos a PPL registrada na área de floresta foi superior à da pastagem. A PPL total registrada durante o período de estudo na área de pastagem foi, em média, cerca de 40% inferior ao observado na área de floresta. Os valores máximos em ambos os casos ocorreram no ano de 2002, atingindo 1,7 kg.C.m⁻² na floresta e 1,0 kg.C.m⁻² na pastagem. Os valores mínimos também coincidiram no mesmo ano, 2005, em que a PPL na floresta foi de 0,4 kg.C.m⁻² enquanto a área de pastagem registrou 0,3 kg.C.m⁻². Tendo como base seus respectivos percentis, observa-se que os períodos de produtividade alta, intermediária e baixa foram muito semelhantes, exceção feita aos anos de 2003 e 2008. Nestes dois casos, a PPL foi classificada como alta para floresta e intermediária para pastagem em 2003, e intermediária para floresta e alta para pastagem em

2008. Verificou-se também que nesses anos ocorreram a maior e a menor diferença na relação entre a produtividade dos dois locais, haja vista que em 2003 a PPL da pastagem representou 49,3% da PPL da floresta, ao passo que em 2008, a produtividade da pastagem equivaleu a 66,5% da PPL da floresta. O comportamento da PPL foi idêntico nos dois locais, havendo um decréscimo nos mesmos períodos, compreendidos entre 2002-2005 e 2009-2010, e um aumento entre 2005-2009.

Tabela 4.17 - Valores comparativos anuais da Produtividade Primária Líquida entre a REBIO-Jarú e a Fazenda Nossa Senhora no período de 2002 a 2010.

Ano	PPL_Total_Floresta (Kg.C.m ⁻²)	PPL_Total_Pastagem (Kg.C.m ⁻²)	PPL_Pastagem/PPL_Floresta (%)
2002	1,7	1,0	55,3
2003	1,4	0,7	49,3
2004	0,7	0,4	60,1
2005	0,4	0,3	61,5
2006	0,6	0,4	65,2
2007	1,0	0,6	60,4
2008	1,1	0,8	66,5
2009	1,3	0,8	62,2
2010	1,0	0,7	65,5
Total	1,0	0,7	59,6

Tabela 4.18 - Distribuição em percentis da Produtividade Primária Líquida da REBIO-Jarú e Fazenda Nossa Senhora no período entre 2002 e 2010.

Percentil (%)	PPL Floresta (%)	PPL Pastagem (%)
< 33 menores valores	0,0-0,9	0,0-0,5
34-66 valores intermediários	1,0-1,2	0,6-0,7
67-100 valores mais altos	1,3-1,7	0,8—1,0

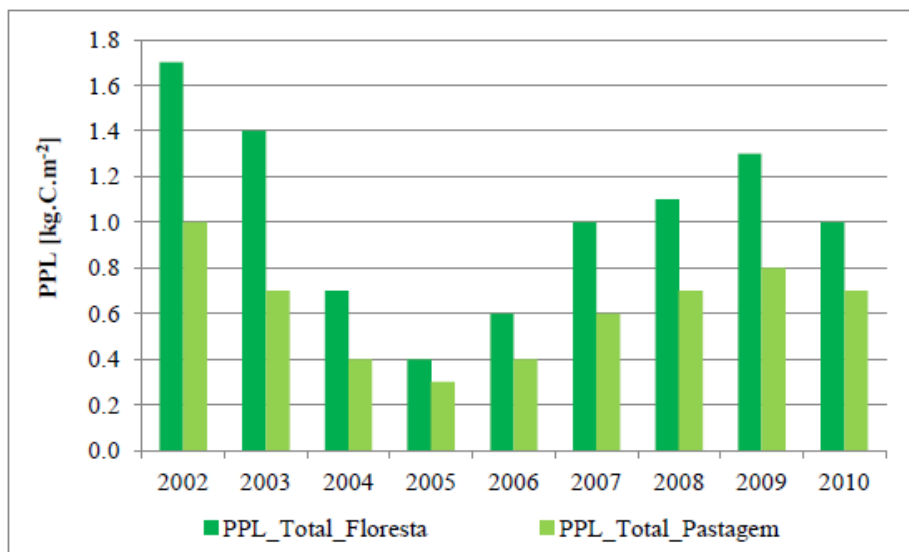


Figura 4.6 – Produtividade Primária Líquida das áreas de floresta e pastagem.

A figura 4.7 mostra a alta similaridade do comportamento entre floresta e pastagem, em que o índice de determinação foi de 0,93.

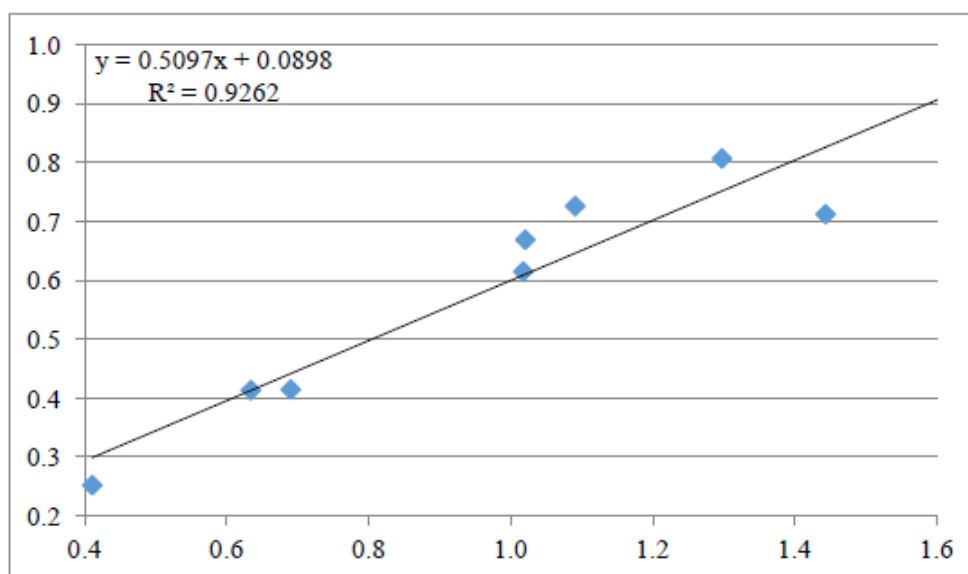


Figura 4.7 – Gráfico de dispersão entre a Produtividade Primária Líquida interanual da REBIO-Jarú e da Fazenda Nossa Senhora.

Aqui se tem a oportunidade de verificação da coerência dos resultados da PPL obtidos pelo sensor MODIS através do produto MOD17A2, em comparação com outros trabalhos realizados na Floresta Amazônica. No experimento de exclusão de chuva realizado em Caxiuanã, Metcalfe *et al.* (2010b) calculou um total da PPL igual a 1,06 kg.C.m⁻².ano⁻¹ (10,6 t.C.ha⁻¹.ano⁻¹) na parcela controle, sem exclusão de chuva,

enquanto, na parcela com exclusão de chuvas, a PPL foi de $0,82 \text{ kg.C.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$ ($8,2 \text{ t.C.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$).

No presente trabalho, a PPL total anual na área de floresta variou entre $0,4 \text{ kg.C.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$ no ano de 2005 e $1,7 \text{ kg.C.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$ no ano de 2002. Por sua vez, a área de pastagem teve valores entre $0,3$ e $0,4 \text{ kg.C.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$ em 2005 e 2002, respectivamente. Esses anos foram classificados pelo método de percentis entre os menos chuvosos e intermediários em relação ao período de estudo, respectivamente, demonstrando coerência em relação ao estudo de Metcalfe *et al.* (2010b).

4.3. Produtividade primária versus radiação solar global

Através da figura 4.8 é possível notar que os totais da radiação solar nos locais de estudo apresentam valores mais elevados no período compreendido entre os meses de julho a novembro. Este intervalo corresponde a meses com produtividades líquidas baixas (julho a setembro) e elevadas (outubro e novembro). No entanto, ressalta-se que existe uma diferença no comportamento da radiação durante esse período, pois se observa uma ascensão até o mês de agosto, onde atinge seu valor máximo, para então ocorrerem seguidas reduções até o mês de novembro. Consequentemente, torna-se evidente que ao se analisar a relação da precipitação com a radiação solar, a partir do momento em que há uma queda nos índices pluviométricos a radiação solar sofre um incremento devido à redução da nebulosidade. A lógica inversa se aplica a maioria dos meses restantes, pois o aumento da precipitação e da presença de nuvens causa a diminuição da radiação solar. Nota-se, ainda, que de modo geral a radiação solar parece não atuar como fator limitante da PPL, exceto em dezembro e fevereiro, visto que apesar de possuírem uma boa disponibilidade hídrica, já que são caracterizados respectivamente como Seco Úmido e Úmido, suas produtividades líquidas se encontram comparativamente bem abaixo em relação aos outros meses dos períodos úmidos.

Dessa forma, observa-se que durante o período seco, quando se tem mais radiação solar incidente, o fator hídrico atuou como limitante da PPL. Nos meses de julho a agosto, a radiação solar aumentou, enquanto a precipitação e a PPL diminuíram. Nos meses de outubro e novembro, a radiação solar ainda apresentou valores mais elevados e a precipitação aumentou juntamente com a PPL. Ou seja, a PPL só respondeu aos maiores valores de radiação quando a precipitação atingiu valores superiores ao do período seco,

evidenciando que a disponibilidade hídrica atuou como um fator limitante da PPL. Por sua vez, fora do período seco, a radiação solar atuou como fator limitante da PPL nos meses de fevereiro e dezembro, quando apresentou um decréscimo significativo em relação aos demais meses devido provavelmente ao aumento da cobertura de nuvens. Entretanto, a redução da PPL não foi tão drástica quando comparada ao que ocorreu no período seco. Nos demais meses, quando se observou boas condições hídricas e valores intermediários de radiação solar, a PPL não apresentou variações significativas.

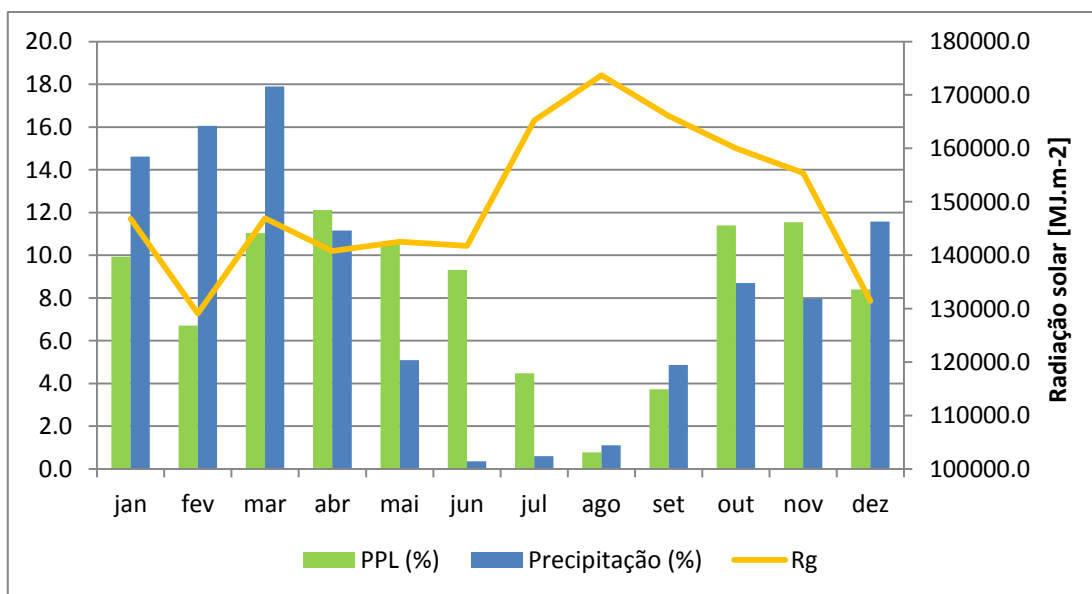


Figura 4.8 - Relação entre a Produtividade Primária Líquida mensal, precipitação e a Radiação solar global na REBIO-Jarú.

A relação entre a PPL e a radiação pode ser vista na figura 4.9. Em que pese sua importância para a produtividade primária dos vegetais, fica claro que a radiação não atua de forma tão limitante como a água dado o baixo coeficiente de determinação entre as duas variáveis (0,27). Obviamente, esse resultado era esperado, pois como mencionado anteriormente, na maioria dos casos os meses de maior radiação possuem menor precipitação e valores de PPL baixos, enquanto que os meses com valores intermediários de radiação apresentam maior precipitação e um aumento na PPL.

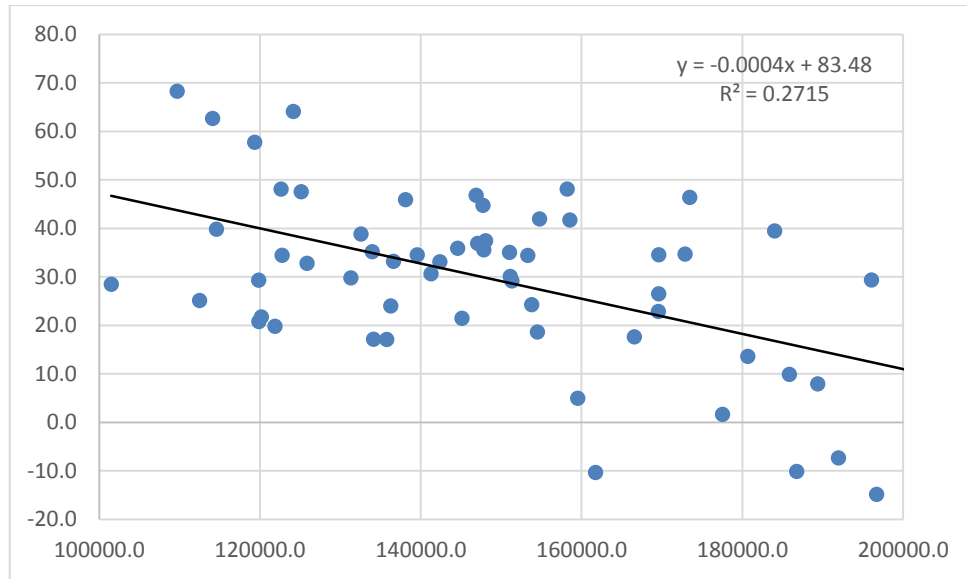


Figura 4.9 – Gráfico de dispersão entre a Produtividade Primária Líquida e a radiação na REBIO-Jarú entre 2002 e 2010.

4.4. Produtividade primária versus temperatura do ar

Na figura 4.10 é possível observar que a temperatura do ar na região de estudo é bastante homogênea durante todo o ano. A diferença das médias mensais entre o mês com maior temperatura (setembro) em relação aos de menores médias (junho e julho) foi de apenas 1,7 °C. Dessa forma, pode-se supor que a temperatura não exerce grandes influências nas variações da PPL observadas entre os períodos Úmido, Úmido Seco, Seco e Seco Úmido.

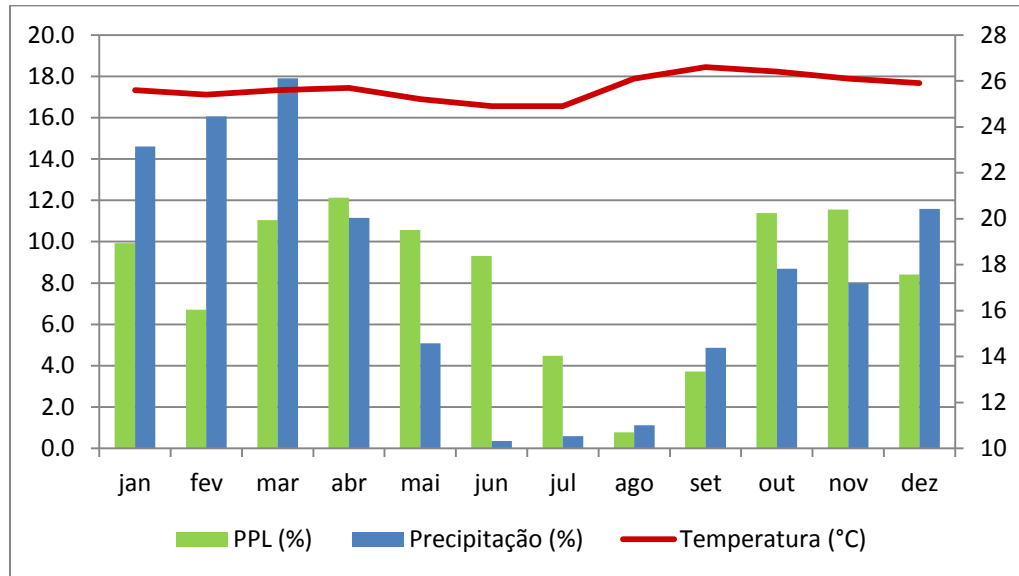


Figura 4.10 - Relação entre a Produtividade Primária Líquida mensal, precipitação e a Radiação solar global na REBIO-Jarú.

Pelo fato de apresentar pouca variação durante o ano, a regressão linear não apresentou boa correlação entre a temperatura e a PPL (0,11), ou seja, a temperatura não exerceu nenhum tipo de limitação em nenhum momento durante o período estudado (Figura 4.11).

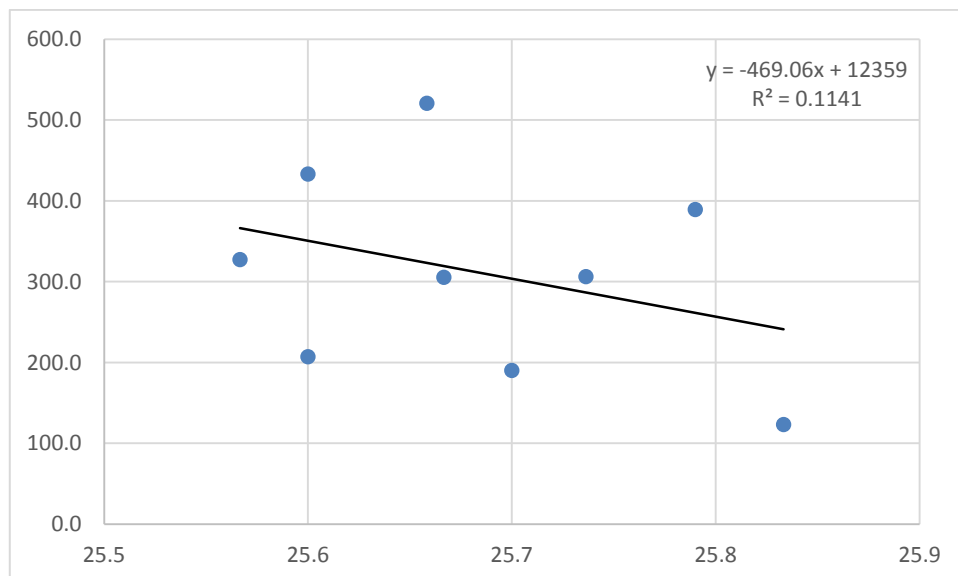


Figura 4.11 - Gráfico de dispersão entre Produtividade Primária Líquida e a temperatura na REBIO-Jarú entre 2002 e 2010.

4.5. Sequestro de carbono

4.5.1. Análise anual do sequestro de carbono

A absorção e a emissão mensal de carbono pela floresta e pela pastagem são apresentadas na figura 4.12, onde se pode observar um comportamento praticamente idêntico entre a floresta e a pastagem ao longo dos meses do ano em termos de absorção e emissão. Somente em abril ocorreu um comportamento diferenciado entre floresta e pastagem, quando houve absorção e emissão, respectivamente. Dessa forma, nos meses de fevereiro, de maio a agosto e em dezembro, incluindo abril no caso da pastagem, as áreas investigadas comportaram-se como fontes de carbono. O período de maio a agosto coincide com a época em que a precipitação teve seus valores significativamente reduzidos e atuou como fator limitante da PPL. Por sua vez, em fevereiro e dezembro, foi a radiação solar que teve valores significativamente reduzidos, atuando como fator limitante da PPL. Por outro lado, nos meses de janeiro, março, de setembro a novembro, incluindo abril no caso da floresta, essas áreas comportaram-se como sumidouros de carbono. A maior absorção se deu no mês de outubro, no período Seco Úmido, que se estende de outubro a dezembro. A maior emissão ocorreu nos meses de julho e agosto, durante o período Seco que vai de julho a setembro.

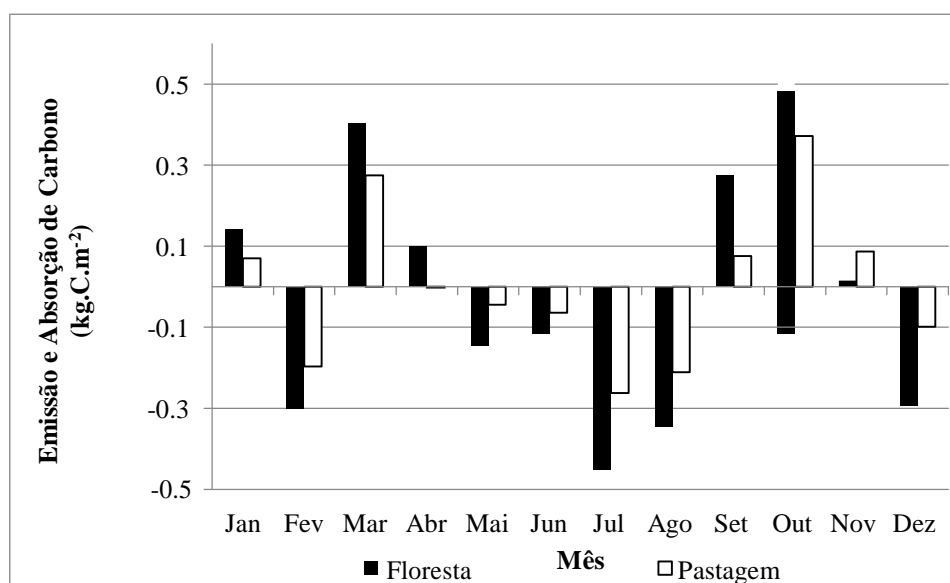


Figura 4.12 - Absorção e emissão mensal de carbono na REBIO-Jarú e na Fazenda Nossa Senhora.

Na escala anual, figura 4.13, tanto a floresta quanto a pastagem absorveram e emitiram a mesma quantidade de carbono ao longo dos meses, fazendo o balanço anual igual a zero. Ou seja, essas áreas não se comportaram nem como fonte, nem como sumidouros, tendo em vista que suas emissões e absorções se anularam. A floresta emitiu e absorveu uma quantidade equivalente a $1,65 \text{ kg.C.m}^{-2}$ e a pastagem $0,88 \text{ kg.C. m}^{-2}$. Entretanto, a floresta emitiu e absorveu 47% a mais que a pastagem.

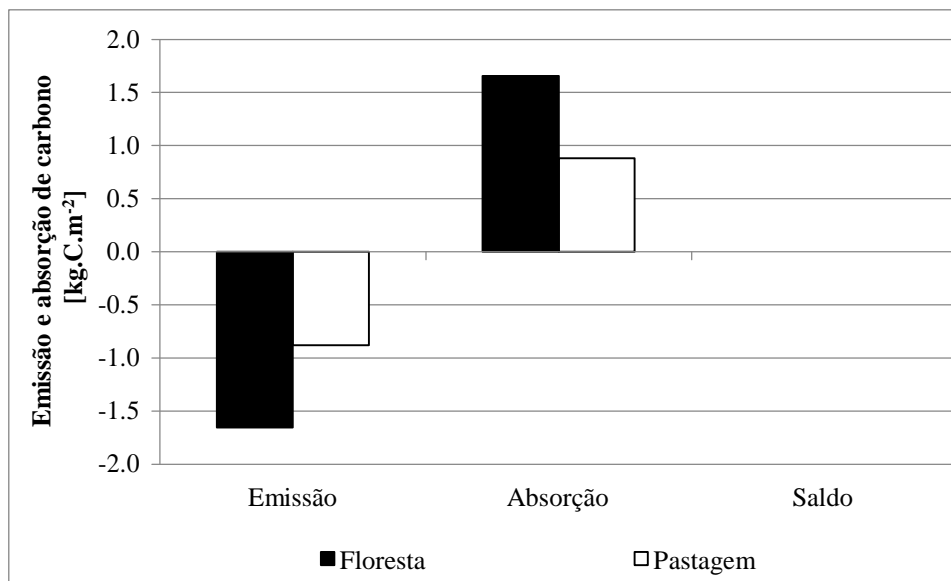


Figura 4.13 - Absorção e emissão anual de carbono na REBIO-Jarú e na Fazenda Nossa Senhora.

O comportamento das emissões e absorções das áreas em estudo foi praticamente idêntico durante os meses do ano. Pode-se dizer que o padrão mensal é o mesmo, mas as magnitudes diferentes. Na figura 4.14 tem-se a análise de regressão evidenciando a alta similaridade entre floresta e pastagem em termos de absorção e emissão mensal de carbono ao longo do ano, tendo em vista o elevado valor do coeficiente de determinação (0,91).

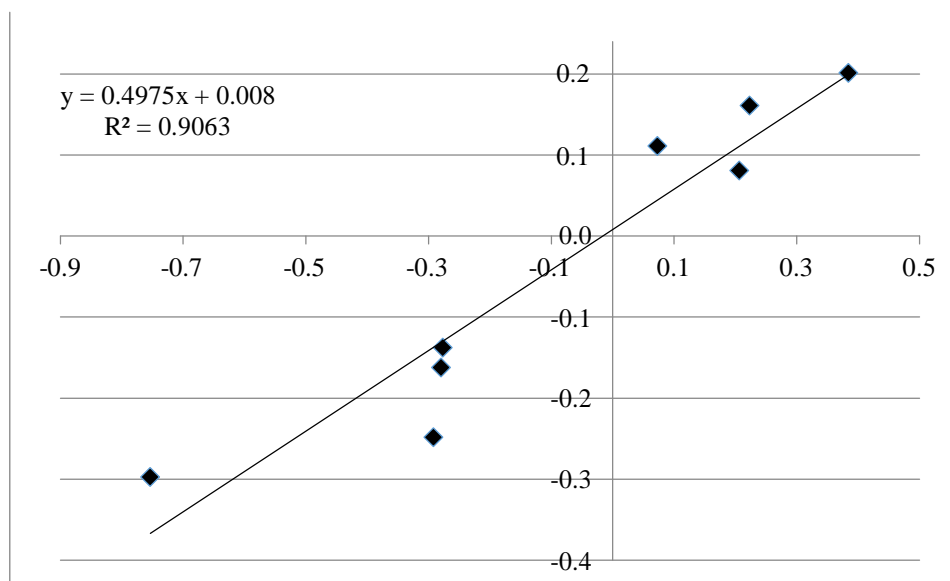


Figura 4.14 – Gráfico de dispersão entre o sequestro de carbono da REBIO-Jarú e da Fazenda Nossa Senhora.

4.5.2. Análise interanual do sequestro de carbono

A absorção e a emissão interanual de carbono pela floresta e pela pastagem são apresentadas na figura 4.15. Observa-se um comportamento similar entre os dois locais ao longo dos anos em termos de absorção e emissão. As emissões ocorreram nos anos de 2003, 2004, 2005 e 2010, classificados pelos valores dos percentis como úmido (2003 e 2004), seco (2005) e intermediário (2010). Por outro lado, as absorções se deram nos anos de 2006 a 2009, classificados como úmido (2006), seco (2007 e 2008) e intermediário (2009). Dessa forma, não se percebe na escala interanual uma relação clara entre a precipitação e absorção e emissão de carbono pelas áreas de floresta e pastagem.

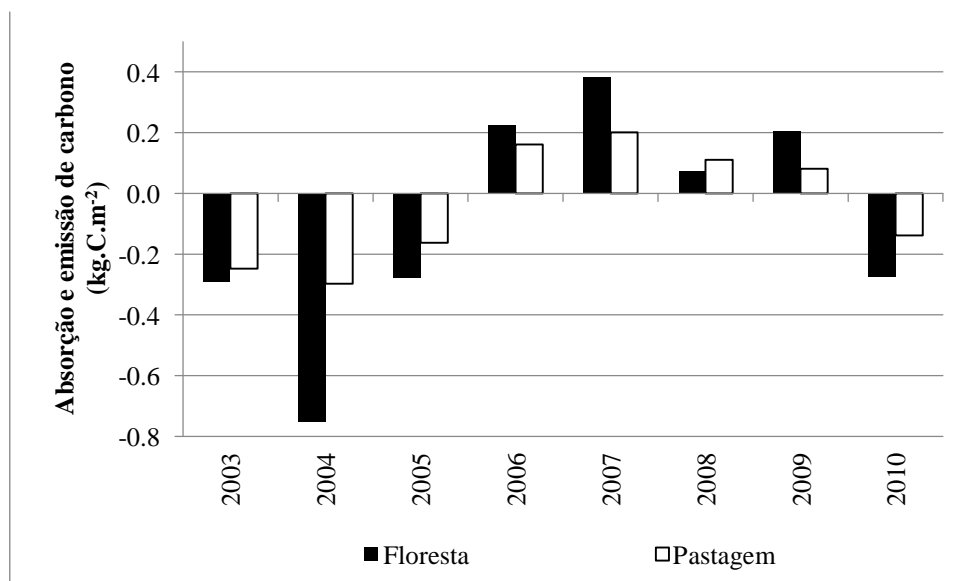


Figura 4.15 – Absorção e emissão interanual de carbono na REBIO-Jarú e na Fazenda Nossa Senhora.

Na escala interanual, figura 4.16, a floresta emitiu e absorveu mais que a pastagem o equivalente a 47% e 38%, respectivamente. No saldo total do período, tanto a floresta quanto a pastagem se comportaram como fontes de carbono. Entretanto, a floresta emitiu 60% a mais que a pastagem.

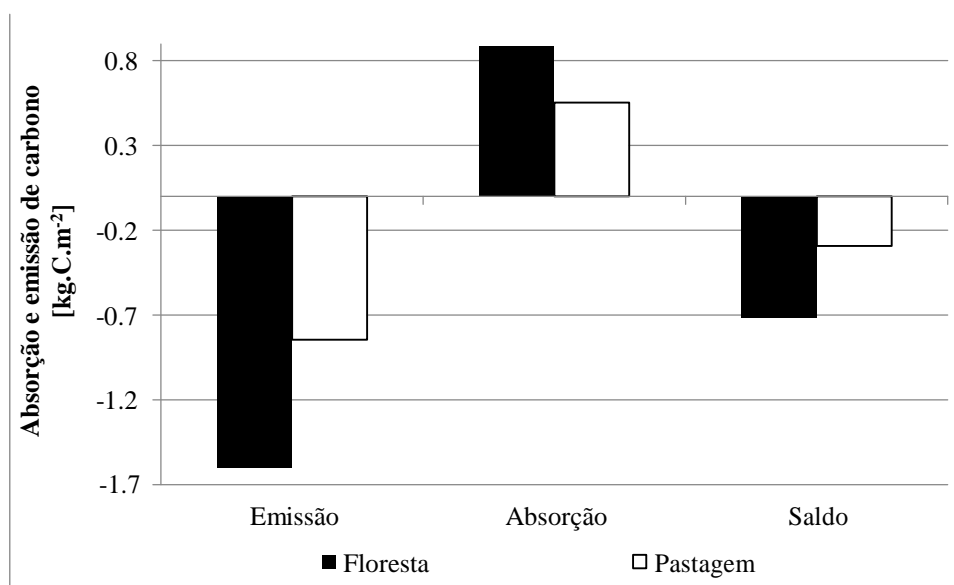


Figura 4.16 - Absorção e emissão interanual de carbono na REBIO-Jarú e na Fazenda Nossa Senhora.

O comportamento das emissões e absorções das áreas em estudo foi praticamente idêntico durante os anos de 2002 a 2010. Pode-se dizer que o padrão é o mesmo, mas as

magnitudes diferentes. Na figura 4.17 tem-se a análise de regressão evidenciando a alta similaridade entre floresta e pastagem em termos de absorção e emissão interanual de carbono ao longo do período de estudo, tendo em vista o elevado valor do coeficiente de determinação (0,91).

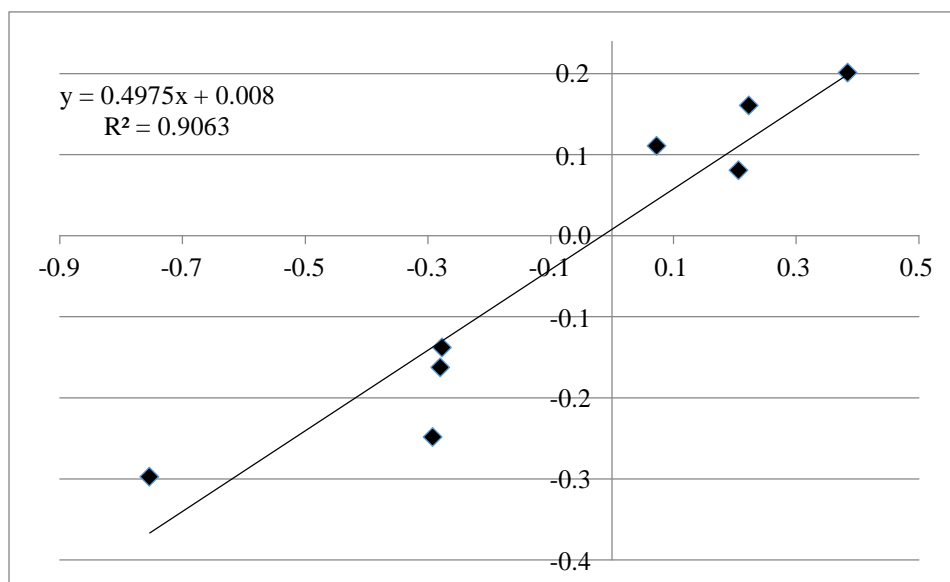


Figura 4.17 – Correlação entre o sequestro de carbono da REBIO-Jarú e da Fazenda Nossa Senhora.

4.6 Análises de tendência

O valor da probabilidade α_1 foi calculado por meio de uma tabela da distribuição normal reduzida. A hipótese nula é rejeitada, ou não, a um nível de significância α_0 se $\alpha_1 > \alpha_0$ ou $\alpha_1 < \alpha_0$, respectivamente. Considerou-se o nível de significância do teste $\alpha_0 = 0,05$. A hipótese nula é rejeitada quando existe uma tendência significativa na série temporal.

Os resultados obtidos indicam ausência de tendência nas três séries temporais investigadas, a saber: PPL, precipitação e sequestro de carbono (tabela 4.19). Vale ressaltar, portanto, que o comportamento da área de floresta como fonte de carbono diz respeito ao período investigado, de 2002 a 2010, mas não é uma tendência. Para se avaliar o potencial do sequestro de carbono pela floresta, faz-se necessário investigar áreas e períodos maiores.

Tabela 4.19 – Valores da probabilidade α_1 do teste de Man Kendal para a área de floresta ($\alpha_0 = 0,05$).

<u>Mês</u>	<u>α_1</u>
PPL 2002-2010	1,25E-04
Precipitação 2002-2010	1,36E-05
<u>Sequestro de Carbono 2002-2010</u>	<u>3,08E-03</u>

4.7 Influência da TSM na região de estudo

Durante o período de estudo entre os anos de 2002 e 2010 foram registrados os episódios de anomalias de TSM listados na tabela 4.20 (Marengo *et al.*, 2008). De acordo com os resultados deste estudo, somente o período de maio a setembro de 2010 ficou na classe de menores valores de precipitação do período (tabela 4.15). Entretanto, os meses de junho a agosto também estiveram nessa classe em todos os demais anos do período, indicando que esses menores valores de precipitação são característicos dessa época do ano que corresponde aos períodos Úmido Seco (junho) e Seco (julho e agosto). Com os meses de maio e setembro ocorre o mesmo, sendo que em outros anos em que não ocorreram episódios de anomalias negativas de TSM eles também se encontram na classe de menores valores de precipitação, como em 2006 e 2007 (maio) e em 2007 e 2008 (setembro). Todos os demais episódios da tabela 4.20 ocorreram em meses classificados como de precipitação intermediária ou mais elevada.

Adicionalmente, os anos com totais pluviométricos na classe de menores valores ocorreram tanto em anos de anomalias positivas de TSM quanto em anos neutros (tabela 4.20), como em 2005 (TSM+), 2007 e 2008 (neutros). Por fim, o ano de 2010 está na classe de totais de precipitação intermediário, mesmo com a ocorrência de episódios de anomalias positivas de TSM. Dessa forma, não fica evidente a influência das anomalias de TSM no regime de chuvas da região de estudo. Corroborando com essa afirmação, a PPL também não demonstra indícios de ter sido afetada, uma vez menores produtividades ocorreram tanto em anos de anomalias positivas de TSM quanto em anos neutros, como em 2005, 2007 e 2008. As análises de Alves *et al.* (2013), conforme discutido no item 2.5.2 do capítulo 2, também demonstram a pouca ou nenhuma influência desses episódios de anomalias positivas de TSM no regime de chuva da região oeste da Amazônia.

Tabela 4.20 – Episódios de anomalias positivas (TSM+) e anomalias negativas (TSM-) entre os anos de 2002 e 2010 no Pacífico leste e central (PLC) e no Atlântico tropical norte (AN).

Ano	TSM+	TSM-
2003	Dezembro (PLC e AN)	
2004	Abril e dezembro (PLC e AN)	
2005	Janeiro (PLC e AN) Meses seguintes (AN)	
2010	Outubro de 2009 a maio de 2010 (El Niño) Janeiro a setembro de 2010 (AN)	Julho (La Niña)

5 - CONCLUSÕES

No presente estudo as análises da PPL, precipitação, radiação solar e temperatura do ar em áreas de floresta e pastagem no estado de Rondônia permitiram as conclusões descritas a seguir.

Na escala anual valores mais elevados de PPL ocorreram em meses que tiveram precipitações entre as classes intermediária e mais elevada. Os menores valores de PPL foram registrados em meses de menor precipitação. Na escala sazonal, os períodos Úmido Seco e Seco Úmido foram classificados pelos valores dos percentis como períodos de PPL mais elevada, o Úmido de PPL intermediária e o Seco de menor produtividade. Os períodos Úmido e Seco Úmido tiveram os maiores valores de precipitação. O período Úmido Seco representou valores intermediários e o período Seco os menores. Dessa forma, nessas escalas, observa-se uma relação entre a PPL e a precipitação, sendo que nos períodos úmidos ocorrem os maiores valores de PPL, enquanto no seco os menores.

A precipitação foi fator limitante no período seco. Nos demais períodos a PPL respondeu diretamente à umidade do solo e à precipitação. Durante o período seco, quando se tem mais radiação solar incidente, o fator hídrico atuou como limitante da PPL. A PPL só respondeu aos maiores valores de radiação quando a precipitação atingiu valores superiores ao do período seco, evidenciando que a disponibilidade hídrica atuou como um fator limitante da PPL. Por sua vez, fora do período seco, a radiação solar atuou como fator limitante da PPL nos meses de fevereiro e dezembro, quando apresentou um decréscimo significativo em relação aos demais meses devido provavelmente ao aumento da cobertura de nuvens. A temperatura do ar não exerceu nenhum tipo de limitação em nenhum momento durante o período estudado.

Na escala interanual observa-se a ausência de uma relação evidente entre a PPL total anual e a precipitação total anual. É muito mais complexa a descrição do comportamento da PPL total anual em função da precipitação total anual, ou seja, a comparação de dois totais anuais não traduz as interações que ocorreram nos doze meses considerados.

A produtividade primária da floresta superou a da pastagem, mas seus comportamentos anuais e interanuais foram praticamente idênticos, diferindo apenas em magnitude. Essa similaridade se reflete também na influência da precipitação como fator

limitante da PPL no período seco tanto na floresta quanto na pastagem e da radiação solar como possível fator limitante nos meses de fevereiro e dezembro.

No que tange a fixação de carbono, do mesmo modo como ocorrido para a produtividade primária líquida em que floresta e pastagem apresentaram comportamentos bastante similares, os padrões mensais entre emissão e absorção de carbono nesses dois locais também foram iguais, embora a floresta tenha registrado valores absolutos mais elevados. Na escala anual, essas áreas não se comportaram nem como fonte, nem como sumidouros, tendo em vista que suas emissões e absorções se anularam. O comportamento das emissões e absorções das áreas em estudo foi praticamente idêntico durante os meses do ano. Pode-se dizer que o padrão mensal é o mesmo, mas as magnitudes diferentes. A maior absorção se deu no período Seco Úmido e a maior emissão ocorreu durante o período Seco.

Nota-se que ao se analisar o comportamento interanual do sequestro de carbono, a floresta e a pastagem mantiveram suas similaridades em todos os anos, contudo não mais ocorre uma clara correlação entre a precipitação e a fixação de carbono nos dois locais. De fato, as absorções e emissões ocorreram tanto em anos mais úmidos quanto em anos mais secos, não havendo um comportamento claro como na análise mensal em que os meses úmidos se comportaram como sumidouros e os meses secos como fontes. No saldo total do período, tanto a floresta quanto a pastagem se comportaram como fontes de carbono. Entretanto, a floresta emitiu mais que a pastagem.

Os resultados indicam ausência de tendência nas séries temporais de PPL, precipitação e sequestro de carbono. Vale ressaltar, portanto, que o comportamento da área de floresta como fonte de carbono diz respeito ao período investigado, mas não é uma tendência. Para se avaliar o potencial do sequestro de carbono pela floresta, faz-se necessário investigar áreas e períodos maiores.

Não ficou evidente a influência das anomalias de TSM no regime de chuvas da região de estudo. Corroborando com essa afirmação, a PPL também não demonstra indícios de ter sido afetada, uma vez menores produtividades ocorreram tanto em anos de anomalias negativas de TSM quanto em anos neutros.

Sugere-se como pesquisas futuras a necessidade de se estabelecer uma análise mais detalhada da fisiologia da região, haja vista que cada tipo de vegetal responde de maneira diferente as limitações impostas pelo ambiente, bem como um aprofundamento da questão referente ao comportamento dos solos da região. Ressalta-se que, embora o aumento ou

diminuição da produtividade primária líquida em algumas ocasiões não possa ter sido explicada neste trabalho em virtude dos dados disponíveis de precipitação, temperatura e radiação solar, é certo que o solo exerce uma grande influência em todo esse processo, não só pela capacidade de armazenamento de água em sua estrutura, como também pela perda de nutrientes por lixiviação em virtude das precipitações.

Por fim, é evidente que para se obter uma visão mais integrada do funcionamento e sensibilidade da região Amazônica a eventos climáticos, existe a necessidade de se estabelecer um monitoramento contínuo e expandir as redes de medições, a fim de melhorar a amostragem dos diferentes tipos florestais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguiar, R. G., Randow, C. V., Priante Filho, N., Manzi, A. O., Aguiar, L. J. G., Cardoso, F. L. **Fluxos de massa e energia em uma floresta tropical no sudeste da Amazônia**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 21, p. 248-257, 2006.

Alados, I., Alados-Arboledas, L., **Validation of an empirical model for Photosynthetically active radiation**. Int. Journal of Climatology 19:1145 - 1152. doi: 10.1002(SICI)1097-088, 1999.

Alves, L.M., Marengo, J.A., Cavalcanti, I.F.A. *Capítulo I: Histórico de secas na Amazônia*. Borma, L. De S.; Nobre, C.A. Secas na Amazônia: causas e consequências. Oficina de Textos, 2013, 367p.

Aragão, L.E.O.C., Malhi, Y., Metcalfe, D.B., Paiva, R., Quesada, C.A., Almeida, S., Anderson, L., Brando, P., Chambers, J.Q., Da Costa, A.C.L., Hutyrá, L.R., Oliveira, P., Patiño, S., Pyle, E.H., Robertson, A.L., Teixeira, L.M. **Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests**. Global Change Biology. v. 15, p. 1255–1274, 2009.

Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E.T., and Hatfield, J.L. **Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat**. Agronomy Journal 76:300-30, 1984.

Baker, T.R. *et al.* Increasing biomass in Amazonian forest plots. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, v.359, n. 1443, p. 353-365, 2004.

Baldocchi, D.D. **Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems; past, present and future**. Global Change Biology. V.9, 479-492. 2003.

Barr, A. G., Black, T. A., Hogg, E. H., Kljun, N., Morgenstern, K., & Nesic, Z. **The seasonal cycle of leaf area index above a boreal aspen-hazelnut forest in relation to net ecosystem productivity.** *Agricultural and Forest Meteorology*, 126, 237–255., 2004.

Beer, C. *et al.* **Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate.** *Science* 329, 834–838, 2010.

Betts, R.A., Cox P.M., Lee S.E., Woodward F.I. **Contrasting physiological and structural vegetation feedbacks in climate change simulations.** *Nature* 387: 796–799, 2004.

Bonan, G.B. **Ecological Climatology.** Cambridge Univ. Press, Cambridge, ed. 2, 2008.

Brando, P.M. *et al.* Effects of partial throughfall exclusion on the phenology of *Coussarea racemosa* (*Rubiaceae*) in an east-central Amazon rainforest. *Oecologia*, v.150, n. 2, p. 181-189, 2006.

Brando, P.M. *et al.* Drought effects on litterfall, wood production and below-ground carbon cycling in an Amazon forest: results of a throughfall reduction experiment. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, v. 363, p. 1498, 1839-1848, 2008. doi: 10.1098/rstb.2007.0031.

Campbell, G.S., Norman, J.M. **An Introduction to Environmental Biophysics.** Springer-Verlag, New York, 1998.

Canadell, J.G., Raupach, M.R. **Managing Forests for Climate Change Mitigation.** *Science* 320, 1456-1457, doi: 10.1126/science.1155458, 2008.

Carter, G.A. **Primary and secondary effects of water content on the spectral reflectance of leaves.** *American Journal of Botany* 78: 916-924, 1991.

Chen, J.M., Weimin J., Cihlar J., Price D., Liu J., Chen W., Pan J., Black A., Barr A. **Spatial distribution of carbon sources and sinks in Canada's forests.** *Tellus* 55B: 622–641, 2003.

Clark, D. A.; Brown, S.; Kirklighter, D. W.; Chambers, J. Q.; Thomlinson, J. R. and Ni, J. **Measuring net primary production in forests: concepts and field methods.** *Ecol. Appl.*, 11, 356-370, 2001.

Ferreira da Costa, R.; Feitosa, J.R.P.; Fisch, G.; Souza, S.S.; Nobre, C.A. Variabilidade Diária da Precipitação em Regiões de Floresta e Pastagem na Amazônia. *Acta Amazônica*, v.28(4), p.395-408, 1998.

Cox, P. M., Betts, R. A., Jones, C. D., Spall, S. A., Totterdell, I. J. **Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model.** vol 408, pg 184, *Nature*, 408(6813), 750-750, 2000.

Cracraft, J. **Historical biogeography and patterns of differentiation within the southamerican avifauna: areas of endemism.** American Ornithological Union Ornithology Monographs, 49–84, 1985.

Culf, A. D.; Fisch, G.; Malhi, Y.; Nobre, C. A. **The influence of the atmospheric boundary layer on carbon dioxide concentrations over a tropical forest.** *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 85, p. 149-158, 1996.

Curran, P.J. **Multispectral remote sensing for the estimation of green leaf area index.** *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. A* 309:257-270, 1983.

Demmig-Adams, B., Adams, W.W.III. **Xanthophyll cycle and light stress in nature: uniform response to excess direct sunlight among higher plant species.** *Planta* 198,460-70, 1996.

Denman, K.L., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P.M., Dickinson, R.E., Hauglustaine, D., Heinze, E., Holland, E., Jacob, D., Lohmann, U., Ramachandran, S., da

Silva Dias, P.L., Wofsy, S.C., Zhang, X. **Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate.** Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007

Eltahir, E. A., Bras, R. L.. **Sensitivity of Regional Climate to Deforestation in the Amazon Basin, Advances in Water Resources**, 17:101-115, 1994.

Engelbrecht, B.M.J. *et al.* Drought sensitivity shapes species distribution patterns in tropical forests. *Nature*, v. 447, n. 7140, p. 80-82, 2007.

FAO. **Global Forest Resources Assessment 2000: main report.** FAO Forestry Paper 140, 2001.

FAO. **Global Forest Resource Assessment 2005** (Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2005.

Fernandes, T.J.G., Soares, C.P.B., Jacovine, L.A.G., Alvarenga, A.P. **Quantificação do carbono estocado na parte aérea e raízes de *hevea* sp., aos 12 anos de idade, na Zona da Mata Mineira. Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.31, n.4, p.657-665, 2007.

Field, C. B., Randerson, J. T., Malmstrom, C. M. **Global net primary production: combining ecology and remote sensing. Remote Sensing of Environment**, v.51, p.74-88, 1995.

Fisher, R.A. *et al.* The response of an Eastern Amazonian rain forest to drought stress: results and modeling analysis from a throughfall exclusion experiment. *Global Change Biology*, v.13, p.11, 2361-2378, 2007. doi: 10.1111/j.1365-2486.2007.01417.x.

Fonty, E. *et al.* A 10-years decrease in plant species richness on a neotropical inselberg: detrimental effects of global warming? *Global Change Biology*, v.15, n.10, p. 2360-2374, 2009.

Frouin, R., Pinker, R. T. **Estimating Photosynthetically Active Radiation (PAR) of the Earth's surface from satellite observations.** Remote Sensing of Environment, 51, 98-107, 1995.

García, M., Riaño, D., Chuvieco, E., Danson, F.M. **Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data.** Remote Sensing of Environment, 114, p.816–830, 2010.

Gamon, J.A., Peñuelas, J. and Field, C.B. **A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency.** Remote Sensing of Environment, 41: 35-44, 1992

Gomes, J.B. **Conversão de Florestas Tropicais em Sistemas Pecuários na Amazônia: quais são as implicações no microclima da região?** Trabalho de Conclusão de Curso apresentado, Departamento de Engenharia Ambiental, Fundação Universidade Federal de Rondônia, *Campus* de Ji-Paraná, 61p, 2011

Gough, C.M. **Terrestrial Primary Production: Fuel for Life.** Nature Education Knowledge 3(10):28, 2012.

Goward, S. N., Tucker, C. J., and Dye, D. G. **North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 advanced very high resolution radiometer.** Vegetation 64:3-14, 1985.

Gullison, R.E.; Frumhoff, P.C.; Canadell, J.G.; Field, C.B.; Nepstad, D.C. Hayhoe, K.; Avissar, R.; Curran, L.M.; Friedlingstein, P.; Jones, C.D. & Nobre, C. **Tropical forests and climate policy.** Science 316: 985-986, 2007.

Hall, F. G., Huemmrich, K.F, Goward, S.N. **Use of narrow-band spectra to estimate the fraction of absorbed photosynthetically active radiation.** Remote Sensing of Environment 33:47-54, 1990.

Hall, F.G., Huemmrich, K.F., Goetz, S.J., Sellers, P.J. and Nickeson, J.E. **Satellite remote sensing of surface energy balance: Success, failures, and unresolved issues in FIFE.** Journal of Geophysical Research. doi: 10.1029/92JD02189. issn: 0148-0227, 1992.

Hall, F.G., Shimabukuro, Y.E., Huemmrich, K.F. **Remote Sensing of forest biophysical structure using mixture decomposition and geometric reflectance models.** Ecological Applications 5:993-1013, 1995.

Haberl, H., Erb, K.H., Krausmann, F., Gaube, V., Bondeau, A., Plutzer, C., Gingrich, S., Lucht, W. and Fischer-Kowalski, M. **Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems.** Proceedings of the National Academy of Sciences, 104:12942-12947, 2007.

Haffer, J. **Alternative models of vertebrate speciation in Amazonia: an overview.** Biodiv. Conserv., 6, p. 451-76, 1997(b).

Hodnett, M.G.; Oyama, M. D., Tomasella, J., Marques Filho, A.O. **Comparisons of long-term soil water storage behaviour under pasture and forest in three areas of Amazonia. In: Amazonian deforestation and climate.** (eds. J.H.C. Gash, C. A. Nobre, J. M. Roberts, R. L. Victoria). Chichester: John Wiley, p. 57-77, 1996.

Hilker, T., Coops, N. C., Black, T. A., Wulder, M. A., Guy, R. D. **The use of remote sensing in light use efficiency based models of gross primary production: A review of current status and future requirements.** Sci. Total Environ., 404, 411–423, 2008.

Houghton, R.A. **A new estimate of global sources and sinks of carbon from land-use change.** EOS 81(19). Supplement, p. S281. Houghton, R.A. 2000.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., Ferreira, L.G.,. **Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices.** Remote Sensing of Environment 83, 195–213, 2002.

Hunt, E. R., Jr., Rock, B. N., **Detection of changes in leaf water content using near- and middle-infrared reflectances.** Remote Sensing of Environment 30:43-54, 1989

Huntingford, C., Zelazowski, P., Galbraith, D., Mercado, L.M., Sitch, S., Fisher, R., Lomas, M., Walker, A.P., Jones, C.D., Booth, B.B.B., Malhi, Y., Heming, D., Kay, G., Good, P., Lewis, S.L., Phillips, O.L., Atkin, O.K., Lloyd, J., Gloor, E., Zaragoza-Castells, J., Meir, P., Betts, R., Harris, P.P., Nobre, C., Marengo, J. and Cox, P.M. **Simulated resilience of tropical rainforests to CO₂-induced climate change.** Nature Geoscience, 2013.

Husch, B. **Estimacion del contenido de carbono de los bosques.** Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Anais.Valdivia. p.87-91, 2001.

Hutyra, L.R., Munger, J.W., Nobre, C.A., Saleska, S.R., Vieira, S.A., Wofsy, S.C. **Climatic variability and vegetation vulnerability in Amazônia.** Geophysical Research Letters 32: doi: 10.1029/2005GL024981. issn: 0094-8276, 2005

IEA (International Energy Agency). **World energy outlook 2007 - China and India insights.** Paris, WEO Press, 2012.

Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. **Climate Change 2001: Impacts, Adaptation & Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the IPCC.** J. J. McCarthy, O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken and K. S. White, eds. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 1000 pp, 2001.

Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC.** Cambridge, UK: Cambridge University Press. 1552 pp, 2013.

Jackson, M. J. **The assessment of bioavailability of micronutrients: introduction.** Eur. J. Clin. Nutr. 51: S1–S2, 1997.

Jacquemoud S., Bacour C., Poilvé H., Frangi J.-P. **Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopies reflectance – Direct and inverse mode,** Remote Sensing of Environment, 74(3):471-481, 2000.

Jensen, R.G. **Activation of Rubisco regulates photosynthesis at high temperature and CO₂.** Proc. Natl Acad. Sci. USA97: 12937–12938, 2000.

Keeling, R. F., Piper, S. C., Heimann, M. **Global and hemispheric CO₂ sinks deduced from changes in atmospheric O₂ concentration.** Nature 381, 218–221, 1996.

Kozlowski, T.T., Kramer, P.J., Pallardy, S.G. **The physiological ecology of woody plants.** Academic Press, San Diego, pp 303–337, 1991.

Leles, P.S.S., Reis, G.G., Reis, M.G.F. **Distribuição de nutrientes em Eucalyptus amaldulensis e Eucalyptus pellita sob diferentes espaçamentos, na região de cerrado.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., 1995, Viçosa. Resumos expandidos ... Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.2, p.862-863, 1995.

Lewis, S.L. *et al.* The 2010 Amazon drought. *Science*, v. 331, n. 6017, p. 554-554, 2011.

Liang, S., Zheng, T., Liu, R., Fang, H., Tsay, S.C., Running, S. **Estimation of incident Photosynthetically Active Radiation from MODIS Data,** Journal of Geophysical Research -Atmosphere, 111, D15208,doi:10.1029/2005JD006730, 2006.

Liu, W. T.; Kogan, F. N. **Monitoring Brazilian soybean production using NOAA AVHRR based vegetation condition index.** International Journal of Remote Sensing, 22:1161-1179. 2006.

Los, S.O. **Estimation of the ratio of sensor degradation between NOAA AVHRR channel 1 and 2 from monthly NDVI composites.** IEEE Trans Geosci Remote . Sens.36: 202-213, 1998.

Malhi, Y., Roberts, J. T., Betts, R. A., Killeen, T. J., Li, W., Carlos A. Nobre, C. A. **Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon.** Science, 319, 169-172. doi: 10.1126/science.1146961. 2008.

Malhi, Y., Saatchi, S., Girardin, C.A.J., Aragão, L.E.O.C. **The production, storage and flow of carbon in Amazonian forests.** Amazonia and Global Change, Geophysical Monographs Series 186, doi: 10.1029/2008GM000779, 2009.

Malhi, Y., Aragão, L.E.O.C., Galbraith, D., Huntingford, C., Fisher, R., Zelazowski, P., Sitch, S., McSweeney, C., Meir, P. **Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest.** Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 106, 20610-20615, 2009.

Marengo, J.A. **On the hydrological cycle of the Amazon Basin: a historical review and current state-of-the-art.** Revista Brasileira de Meteorologia, 21: 1-19, 2006.

Marengo, J.A. *et al.* The drought of Amazonia in 2005. *Journal of Climate*, v. 21, n. 3, p. 495-516, 2008.

Marengo J. A. ; Coelho, Caio A. S. ; Cavalcanti, Iracema A. F. ; Costa, Simone M. S. ; Freitas, Saulo R. ; Ito, Ester R. ; Luz, Giovana ; Santos, Ariane F. ; Nobre, Carlos A. ; Pezza, Alexandre B. . Climate diagnostics of three major drought events in the Amazon and illustrations of their seasonal precipitation predictions. *Meteorological Applications* (Print), v. 19, p. 237-255, 2012.

Marklund, L.G., Schoene, D. **Global assessment of growing stock, biomass and carbon stock.** Forest Resources Assessment Programme Working paper 106/E, Rome, 2006.

Metcalf, D.B *et al.* Impacts of experimentally imposed drought on leaf respiration and morphology in an Amazon rain forest. *Functional Ecology*, v. 24, n. 3, p. 524-533, 2010b.

MOD17 User's Guide. **User's Guide GPP and NPP (MOD17A2/A3) Products NASA MODIS Land Algorithm**. The University of Montana, 57p, 2003.

Monteith, J.L. **Solar radiation and productivity in tropical ecosystems**. *Journal of Applied Ecology*, v.9, p.747-766, 1972.

Monteith, J.L. **Climate and efficiency of crop production in Britain**. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. B* 281, 277–294, 1977.

Moya, I., Camenen, L., Evain, S., Goulas, Y., Cerovic, Z., Latouche, G., Flexas, J., Ounis, A. **A new instrument for passive remote sensing 1. Measurements of sunlight-induced chlorophyll fluorescence**, *Remote Sens. Environ.*, 91, 186–197, 2004.

Myneni, R.B., Keeling, C.D., Tucker, C.J., Asrar, G., Nemani, R.R. **Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981-1991**. *Nature* 386: 698-702, 1997.

Myeni, R.B., Williams, D.L. **On the relationship between FAPAR and NDVI**. *Remote Sensing of Environment* 49: 200-211. 1994.

Myneni, R.B, Asrar, G., Hall, F.G. **A three dimensional radiative transfer method for optical remote sensing of vegetated land surfaces**. *Remote Sens Environ*, 41: 105-12, 1992.

NASA, 2010. **Mapa da Produtividade Primária para o ano de 2010**. Disponível em: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/EarthPerspectives/>. Acesso em: 25 jun. 2013.

Nemani, R.R., Keeling, C.D., Hashimoto, H., Jolly, W.M., Piper, S.C., Tucker, C.J., Myneni, R.B. and Running. S.W. **Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999**. *Science* 300: 1560-1563.N, 2003.

Nobre, C.A., Nobre, A.D. **O balanço de carbono da Amazônia brasileira. Estudos avançados**, v. 16, n. 45, p. 81-90, 2002. ISSN 0103-4014, 2002.

Nouvellon, Y., Bégué, A., Moran, M. S., Seen, D. L.O., Ramba, S. L., Luquet, D., Uni, H.C., Inoue, Y. **PAR Extinction in shortgrass ecosystems: effects of clumping, sky conditions and soil albedo**. *Agricultural and Forest Meteorology*. v.105, p. 21-41. 2000.

Nepstad, D.C. *et al.* The effects of partial throughfall exclusion on canopy processes, aboveground production, and biogeochemistry of an Amazon forest. *Journal of Geophysical Research*, v. 107, p. 8085, 2002.

Nepstad, D.C. *et al.* Mortality of large trees and lianas following experimental drought in an Amazon forest. *Ecology*, v.88, n. 9, p. 2259-2269, 2007. doi: 10.1890/06-1046.1.

Oliveira, G. 2012. **Modelagem do balanço de energia e evapotranspiração na Amazônia brasileira com uso de imagens MODIS e ASTER**. Dissertação M.Sc. Instituto Nacional de Pesquisas Especiais, São José dos Campos, SP, Brasil.

Oliveira, G., Moraes, E.C. **Validação do balanço de radiação obtido a partir de dados MODIS/TERRA na Amazônia com medidas de superfície do LBA**. *Acta Amaz.*, Set 2013, vol.43, no.3, p.353-363. ISSN 0044-5967, 2013.

Ort, D.R, Long, S.P. **Improving photosynthetic efficiency for greater yield**. *Annu Rev Plant Biol* 61: 235–26, 2010.

Phillips, O.L. *et al.* Drought sensitivity of the Amazon rain forest. *Science*, v. 323, n. 5919, p. 1344-1347, 2009.

PLANAFLORO/SEPLAN//PNUD. **As Unidades de Conservação de Rondônia**. Porto Velho, 1998.

Rahman, A.F., Gamon, J.A., Fuentes, D.A., Roberts, D.A., Prentiss, D. **Modeling spatially distributed ecosystem flux of boreal forest using hyperspectral indices from AVIRIS**

imagery. Journal of Geophysical Research 106: doi: 10.1029/2001JD900157. issn: 0148-0227, 2001.

Ramade, F. **Ecology of Natural Resources**. Wiley, Chichester. Rand, S. et al. (eds) Ecology of a Tropical *Forest*. Oxford University Press, Oxford, 1984.

Reichstein, M., Papale, D., Valentini, R. **Determinants of terrestrial ecosystem carbon balance inferred from European eddy covariance flux sites**. Geophysical Research Letters, 34, L01402, 2007(b)

Reis, M. G. F. et al. **Sequestro 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. 1994, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: CVRD, p.155-195, 1994.

Rolim, S.G. *et al.* Biomass change in an Atlantic tropical moist forest: the ENSO effect in permanent sample plots over a 22-year period. *Oecologia*, v. 142, n. 2, p. 238-246, 2005.

Rosenberg, M. S., Adams, D.C., Gurevitch, J. **MetaWin statistical software for meta-analysis version 2**. Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts, USA, 2000.

Roy J., Saugier B. **Terrestrial primary productivity : definitions and milestones**. "Terrestrial Global Productivity", J. Roy, H.A. Mooney & B. Saugier Eds, Academic Press.,1-6, 2001.

Ruimy, A., Saugier, B., Dedieu, G. **Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data**, J. Geophys. Res., 99, 5263–5283, 1994.

Running, S.W., Thornton, P.E. **Global terrestrial gross and net primary productivity from the Earth Observing System**. Methods in Ecosystem Science. O. Sala, R. Jackson and H. Mooney. New York, Springer Verlag: 44-57, 1999.

Running S.W., Thornton, P.E., Nemani, R.R., Glassy, J.M. **Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system**. Pages 44–57 in Sala O,

Jackson R, Mooney H, eds. *Methods in Ecosystem Science*. New York: Springer-Verlag, 2000.

Running, S. W., Nemani, R. R., Heinsch, F. A., Zhao, M., Reeves, M., and Hashimoto, H.: **A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production**, *Bioscience*, 54, 547–560, 2004

Russell, G.; Jarvis, P. G.; Monteith, J. L. **Absorption of radiation by canopies and stand growth**. Russell, G.; Marshall, B.; Jarvis, P. G. (Ed.). *Plant canopies: their growth, form and function*. Cambridge, England: Cambridge University Press p. 21-39. (Society for Experimental Biology Seminar Series, 31), 1989.

Salisbury, F. B., Ross, C.W. **Plant Physiology**. 4th Edition, 1992.

Sellers, P.J. **Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration**. *International Journal of Remote Sensing* 6(8): 1335–1372, 1985.

Sellers, P.J. **Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. II. The role of biophysics in the linearity of their interdependence**. *Remote Sensing of Environment* 21:143–183, 1987.

Sellers, P.J., Hall, F.G., Asrar, G., Strebel, D.E., Murphy, R.E. **An overview of the First International Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP) Field Experiment (FIFE)**. *Journal of Geophysical Research* 97: doi: 10.1029/92JD02111. issn: 0148-0227, 1992.

Sellers, P. J., Los, S. O., Tucker, C. J., Justice, C. O., Dazlich, D. A., Collatz, G. J., Randall, D. A. **A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part II: the generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data**. *Journal of Climate*, 9 : 706–737, 1996(b).

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. Modelling the exchanges of energy, water and carbon between continents and the atmosphere. *Science* 275: 502 – 509, 1997.

Solomon, S., D. Qin, M. Manning, M. Marquis, K. Averyt, M. M. B. Tignor, H. L. Miller, Jr., and Z. Chen. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis.** Cambridge University Press, 996 pp, 2007.

Sombroek, W.G. Amazon landforms and soils in relation to biological diversity. *Proceedings of a workshop to determine priority areas for conservation in Amazonia, 10-20 jan 1990*, 1966.

Thangataa, P.H., Hildebrandb, P.E. **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, p.172– 183, 2012.

Thornton, P.E., Law, B.E., et al. **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, 2002.

Townsend, A.R., Asner, G.P. & Cleveland, C.C. **The biogeochemical heterogeneity of tropical forests.** *Trends Ecol. Evol.*, 23, 424–431, 2008.

Tucker, C.J. **Remote sensing of leaf water content in the near infrared.** *Remote Sensing of Environment* 10, 23-32, 1980.

Tucker, C.J., Vanpraet, C.L., Sharman, M.J., van Ittersum, G. **Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel: 1980-1984.** *Remote Sensing of Environment* 17, 233–249, 1985.

Tucker, C.J., Sellers, P.J. **Satellite remote-sensing of primary production.** *Int J Remote Sens*, 7(11):1395–416, 1986.

Van Laake, P.E., Sanchez-Azofeifa, G.A. **Mapping par using MODIS atmosphere products**. *Remote Sens Environ*, 94 (4):554 - 63, 2004.

Waring, R.H., Schlesinger, W.H. **Forest ecosystem, concepts and management**. Orlando Academic Press Inc. 340p, 1985.

Webler, A. D.; Aguiar, R. G.; Aguiar, L. J. G. **Características da precipitação em área de floresta primária e área de pastagem no Estado de Rondônia**. *Revista Ciência e Natura*, v. Esp., p. 55-58, 2007.

Willianson, G.B. *et al.* Amazonian Tree Mortality during the 1997 El Niño Drought. *Conservation Biology*, v. 14, p. 1538-1542, 2000.

Wright, S.F., Upadhyaya, A. **Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi**. *Soil Science* 161, 575 – 586, 1996.

Yoon, J.H., Zeng, N. An Atlantic influence on Amazon rainfall. *Clim. Dyn.*, v. 34, p. 249-264, 2010. Doi: 10.1007/s00382-009-0551-6.

Zhao, M., Running, S.W. **Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009**. *Science* 329: 940-943, 2010.