



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**Estimativa de estoque de biomassa de floresta tropical utilizando dados de  
sensoriamento remoto e redes neurais artificiais**

Gabrielle de Oliveira Xavier

Brasília, dezembro de 2017.



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**Estimativa de estoque de biomassa de floresta tropical utilizando dados de  
sensoriamento remoto e redes neurais artificiais**

Discente: Gabrielle de Oliveira Xavier – 13/0009482

RG: 3150506 SSP/DF

CPF: 051.519.581.27

Linha de pesquisa: Geoprocessamento, Sensoriamento Remoto e Manejo Florestal

Orientador: Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi

Co-orientador: Éder Pereira Miguel

Projeto de pesquisa apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília, como parte das exigências para obtenção do Título de Engenheira Florestal.

Brasília, dezembro de 2017.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTA

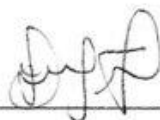
**Estimativa de estoque de biomassa de florestas tropicais utilizando dados de  
sensoriamento remoto e redes neurais artificiais**

Estudante: Gabrielle de Oliveira Xavier

Matrícula: 13/0009482

Menção: SS

**Aprovada pela banca examinadora:**



Prof. Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi – EFL/UnB

Orientador

Prof. Éder Pereira Miguel – EFL/UnB

Co- Orientador



Ricardo de Oliveira Gaspar

Examinador



Erica Karolina Barros de Oliveira

Examinador

Brasília – DF, 04 de dezembro de 2017.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, o meu melhor amigo, por estar sempre presente na minha vida durante todo o caminho percorrido até aqui, por cada obstáculo vencido e por cada experiência vivida, me ensinando a amar, acreditar e depender.

Agradeço aos meus pais Esmeralda e Joselino que me deram todo o apoio e incentivo na vida em todos os sentidos, sendo verdadeiros presentes de Deus na minha vida, agradeço a meus irmãos Cícero e Samuel que sempre me ajudaram a manter o equilíbrio da vida, ora com um abraço, ora com um sorriso.

Agradeço a todos meus amigos que participaram dessa jornada e que estiveram próximos, mesmo em momentos distantes, em especial a Andressa Chaves e Natália Oliveira, que foram de suma relevância no desenvolvimento desse projeto.

Agradeço a ECOFLOR pela experiência profissional oferecida, a qual abriu portas na minha graduação, me apresentou pessoas e oportunidades que me enriqueceram.

Agradeço as experiências vividas no Instituto CO<sub>2</sub> zero, nos estágios feitos na Caesb e na Terracap, pelos meus supervisores, e por todos que conheci, acrescentando de forma direta ou indireta algo bom em minha vida acadêmica e profissional.

Agradeço aos professores Ildeu e Rosana pela experiência com PIBIC durante a graduação, e por toda a disponibilidade e conhecimento transferidos a mim.

Agradeço ao Eraldo Matricardi, por toda a paciência, disponibilidade, amizade e conhecimento transferidos a mim, por ter sido em sentido lato um orientador, auxiliando-me academicamente e pessoalmente. Agradeço também ao meu co-orientador Éder Miguel que me auxiliou e incentivou a explorar ciências pioneiras na área florestal, agradeço também ao Milton que se dispôs e me ajudou em todos os momentos que precisei.

Por fim, agradeço por todas as pessoas que entraram na minha vida, pelas pessoas que saíram da minha vida e principalmente pelas que permaneceram.

*"Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível."* **(Charles Chaplin)**

## RESUMO

As florestas desempenham função importante no processo de mitigação do aquecimento global, estocando mais carbono em sua biomassa aérea e subterrânea do que a atmosfera. Embora o conhecimento da quantidade de biomassa em florestas tropicais seja fundamental para várias análises, incluindo os estudos de mudanças climáticas, a sua estimativa é muito dispendiosa de tempo e recursos diversos, variando de acordo com as características locais. O presente estudo buscou estimar a quantidade de biomassa em áreas de florestas tropicais localizadas no município de Juruti, estado do Pará, utilizando dados de inventário florestal em campo e métodos indiretos baseados em técnicas e dados de sensoriamento remoto e redes neurais artificiais. A partir dos dados de campo, foi também espacializado o volume de biomassa para toda a área de estudo a partir de dados amostrais do inventário florestal e métodos geoestatísticos de interpolação dos dados. Os resultados desta pesquisa indicam que os índices de vegetação EVI e MSAVIaf apresentam bom desempenho na estimativa da biomassa da área de estudo. Os erros de estimativa foram reduzidos com o uso de redes neurais artificiais e índices de vegetação derivados de sensoriamento remoto. A partir da validação, foi obtida a biomassa média com dados de inventário, a qual apresentou o valor de 264,62 ton ha<sup>-1</sup> e a estimada com redes neurais artificiais e sensoriamento remoto foi de 281,63, a qual apresentou um erro relativo de 9,7%, indicando uma subestimativa de 3,3% (diferença agregada).

**Palavras-chave:** Estoque de biomassa, floresta amazônica, índices de vegetação, redes neurais artificiais, sensoriamento remoto e geoestatística.

## ABSTRACT

Forests play an important role in the process of mitigating global warming, stockpiling more carbon in their aerial and underground biomass than the atmosphere. While knowledge of the quantity of biomass in tropical forests is crucial to various analyses, including climate change studies, its estimate is very costly of diverse time and resources, varying according to local characteristics. The present study sought to estimate the quantity of biomass in tropical forest areas located in the municipality of Juruti, State of Pará, utilizing forest inventory data in field and indirect methods based on remote sensing techniques and data and neural nets Artificial. From the field data, it was also espacializado the volume of biomass for the entire study area from sample data from the forest inventory and Geostatistical methods of interpolation of data. The results of this research indicate that the indexes of vegetation EVI and MSAVIaf present good performance in the estimation of the biomass of the study area. Estimation errors were reduced by using artificial neural nets and vegetation indexes derived from remote sensing. From the validation, the average biomass was obtained with inventory data, which presented the value of 264,62 ton ha<sup>-1</sup> and the estimated by artificial neural networks and remote sensing was 281.63, which presented a relative error of 9.7%, indicating an estimated 3.3% (aggregate difference).

**Keywords:** Biomass Inventory, Amazon forest, vegetation index, artificial neural networks, remote sensing and geostatistics.

## SUMÁRIO

|         |                                        |    |
|---------|----------------------------------------|----|
| 1.      | INTRODUÇÃO .....                       | 11 |
| 2.      | PROBLEMAS E QUESTÕES DE PESQUISA ..... | 12 |
| 3.      | OBJETIVOS .....                        | 13 |
| 3.1     | OBJETIVO GERAL .....                   | 13 |
| 3.2     | OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....             | 13 |
| 4.      | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....             | 14 |
| 4.1     | ÁREA DE ESTUDO.....                    | 14 |
| 4.2     | ÍNDICES DE VEGETAÇÃO .....             | 15 |
| 4.3     | REDES NEURAIS ARTIFICIAIS.....         | 17 |
| 4.4     | GEOESTATÍSTICA .....                   | 18 |
| 5.      | METODOLOGIA .....                      | 18 |
| 5.1.1   | ÁREA DE ESTUDO.....                    | 18 |
| 5.1.1.1 | LOCALIZAÇÃO .....                      | 18 |
| 5.1.2   | CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.....           | 19 |
| 5.1.3   | USO E COBERTURA DO SOLO.....           | 19 |
| 5.1.4   | CENÁRIO SOCIOECONÔMICO .....           | 21 |
| 5.2     | BASE DE DADOS .....                    | 21 |
| 5.2.1   | INVENTÁRIO FLORESTAL .....             | 21 |
| 5.2.2   | CUBAGEM .....                          | 23 |
| 5.2.3   | VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS .....         | 23 |
| 5.3     | BIOMASSA.....                          | 25 |
| 5.3.2   | MÉTODO.....                            | 25 |
| 5.3.3   | MODELOS DE REGRESSÃO .....             | 26 |
| 5.4     | IMAGEM DE SATÉLITE UTILIZADA .....     | 27 |
| 5.4.2   | USO E APLICAÇÃO .....                  | 28 |
| 5.4.3   | CORREÇÃO ATMOSFÉRICA.....              | 28 |
| 5.5     | ÍNDICES DE VEGETAÇÃO .....             | 30 |
| 5.5.2   | NDVI.....                              | 31 |
| 5.5.3   | EVI.....                               | 31 |
| 5.5.4   | SAVI .....                             | 32 |
| 5.5.5   | MSAVI.....                             | 32 |
| 5.5.6   | MSAVI af .....                         | 33 |
| 5.5.7   | SR.....                                | 33 |
| 5.6     | GEOESTATÍSTICA .....                   | 33 |
| 5.6.2   | KRIGAGEM.....                          | 34 |



|       |                                           |    |
|-------|-------------------------------------------|----|
| 5.6.3 | SEMIVARIOGRAMA .....                      | 34 |
| 5.7   | REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS.....           | 35 |
| 6     | RESULTADOS E DISCUSSÃO .....              | 37 |
| 6.2   | INVENTÁRIO .....                          | 37 |
| 6.3   | BIOMASSA.....                             | 38 |
| 6.3.2 | ESTOQUE DE BIOMASSA.....                  | 38 |
| 6.4   | INDICES DE VEGETAÇÃO .....                | 40 |
| 6.4.1 | ESTIMATIVA POR PARCELA.....               | 40 |
| 6.4.2 | ESTIMATIVA POR TRANSECTO .....            | 43 |
| 6.4.3 | ESTIMATIVA POR DIVISÃO DO TRANSECTO ..... | 45 |
| 6.5   | REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS.....           | 51 |
| 7     | CONCLUSÃO .....                           | 54 |
| 8     | REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....          | 55 |

## LISTA DE TABELAS

|                   |                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1.</b>  | Uso e cobertura do solo no ano de 2010 no PAE Juruti Velho. ....                                                                                                                                                                    | 20 |
| <b>Tabela 2</b>   | Divisão dos estratos amostrais na área de estudo em Juruti Velho, estado do Pará .....                                                                                                                                              | 22 |
| <b>Tabela 3</b>   | Distribuição das amostras nos estratos amostrais na área de estudo no município de Juruti Velho, estado do Pará.....                                                                                                                | 22 |
| <b>Tabela 4</b>   | Modelos de regressão testados pelo INPA (Higushi et al., 1998) .....                                                                                                                                                                | 26 |
| <b>Tabela 5.</b>  | Imagem utilizada na pesquisa na área de estudo no município de Juruti Velho, estado do Pará.....                                                                                                                                    | 27 |
| <b>Tabela 6</b>   | Metadados da imagem Landsat-5 TM, utilizada neste estudo para a devida correção radiométrica.....                                                                                                                                   | 27 |
| <b>Tabela 7</b>   | Metadados da imagem utilizada no município de Juruti Velho, estado do Pará .....                                                                                                                                                    | 29 |
| <b>Tabela 8</b>   | Análise estatística do inventário florestal em Juruti Velho-PA .....                                                                                                                                                                | 37 |
| <b>Tabela 9</b>   | Resultados estatísticos do inventário florestal realizado em Juruti Velho-PA .....                                                                                                                                                  | 38 |
| <b>Tabela 10</b>  | Resultados de estoque de Biomassa .....                                                                                                                                                                                             | 39 |
| <b>Tabela 11</b>  | Estimativas dos parâmetros do modelo ajustado ( $\beta_0$ e $\beta_1$ ); erro absoluto (SXY); erro relativo (SXY%) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para os índices analisados individualmente por parcela .....             | 41 |
| <b>Tabela 12</b>  | Estimativas dos parâmetros do modelo ajustado; erro absoluto (SXY); erro relativo (SXY%) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para os índices analisados por amostra.....                                                        | 42 |
| <b>Tabela 13</b>  | Estimativas dos parâmetros do modelo ajustado ( $\beta_0$ e $\beta_1$ ); erro absoluto (SXY); erro relativo (SXY%) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para os índices analisados individualmente por transecto. ....           | 43 |
| <b>Tabela 14.</b> | Estimativas dos parâmetros do modelo ajustado; erro absoluto (SXY); erro relativo (SXY%) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para os índices analisados conjuntamente por transecto. ....                                       | 44 |
| <b>Tabela 15.</b> | Estimativas dos parâmetros do modelo ajustado ( $\beta_0$ e $\beta_1$ ); erro absoluto (SXY); erro relativo (SXY%) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para os índices analisados individualmente por divisão do transecto..... | 45 |
| <b>Tabela 16.</b> | Estimativas dos parâmetros do modelo ajustado; erro absoluto (SXY); erro relativo (SXY%) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para os índices analisados conjuntamente por divisão do transecto. ....                            | 46 |

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 17</b> Análise estatística para o método de Krigagem.....                                    | 51 |
| <b>Tabela 18</b> Tabela de validação de krigagem para estimativa de biomassa (ton) em Juruti Velho-PA. | 51 |
| <b>Tabela 19</b> Estatística da RNA 1.....                                                             | 52 |
| <b>Tabela 20</b> Validação da RNA.....                                                                 | 53 |
| <b>Tabela 21</b> Estatística da Validação da RNA.....                                                  | 53 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Localização da área de estudo dentro do Projeto de Assentamento Extrativista (PAE) Juruti Velho, no estado do Pará.....                                                                                                                                                                                                                                                                    | 19 |
| <b>Figura 2.</b> Uso e cobertura do solo na área de estudo, localizada dentro do Projeto de Assentamento Extrativista (PAE) Juruti Velho, no estado do Pará .....                                                                                                                                                                                                                                           | 20 |
| <b>Figura 3.</b> Forma e tamanho das parcelas utilizada no inventário florestal no município de Juruti Velho, estado do Pará.....                                                                                                                                                                                                                                                                           | 21 |
| <b>Figura 4</b> Comparação da área de estudo sem (A) e com correção (B) atmosférica (Reflectância no Topo da Atmosfera – TOA) .....                                                                                                                                                                                                                                                                         | 30 |
| <b>Figura 5</b> Arquitetura da Rede Neurais Artificiais (RNA) utilizada neste estudo .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 36 |
| <b>Figura 6.</b> Análise de regressão de índices de vegetação com o estoque de biomassa por parcela .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 43 |
| <b>Figura 7</b> Análise de regressão de índices de vegetação com o estoque de biomassa por transecto .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 45 |
| <b>Figura 8</b> Análise de regressão de índices de vegetação com o estoque de biomassa por divisão do transecto .....                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 47 |
| <b>Figura 9</b> Índice de vegetação- NDVI ajustado para a área de estudo (a); Índice de vegetação- EVI ajustado para a área de estudo (b); Índice de vegetação- SAVI ajustado para a área de estudo (c); Índice de vegetação- MSAVI ajustado para a área de estudo (d); Índice de vegetação- MSAVIaf ajustado para a área de estudo (e) e Índice de vegetação- SR ajustado para a área de estudo (f). ..... | 48 |
| <b>Figura 10</b> Mapeamento de biomassa (ton/ha) da área de estudo.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 49 |
| <b>Figura 11</b> Semivariograma gerada para a krigagem de estoque de biomassa (ton/há).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 50 |
| <b>Figura 12</b> Processo aleatorizado para krigagem.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 50 |
| <b>Figura 13</b> Erro padrão para o método de Krigagem.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 50 |
| <b>Figura 14</b> Gráficos de erros para as RNA's .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 52 |
| <b>Figura 15</b> Erro relativo da validação .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 54 |

## LISTA DE EQUAÇÕES

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| Equação 1 DAP .....                     | 22  |
| Equação 2 Área Basal.....               | 22  |
| Equação 3Altura de Lorey.....           | 23  |
| Equação 4 Volume por árvore.....        | 23  |
| Equação 5 Volume por amostra .....      | 243 |
| Equação 6 Radiância espectral .....     | 27  |
| Equação 7 Correção atmosférica TOA..... | 28  |
| Equação 8 NDVI .....                    | 30  |
| Equação 9 EVI .....                     | 30  |
| Equação 10 SAVI.....                    | 31  |
| Equação 11 MSAVI .....                  | 31  |
| Equação 12 MSAVI af .....               | 32  |
| Equação 13 SR .....                     | 32  |
| Equação 14 Semivariograma.....          | 33  |
| Equação 15 Neurônio artificial.....     | 34  |
| Equação 16 Combinador linear.....       | 34  |

## 1. INTRODUÇÃO

As florestas tropicais vêm se destacando cada vez mais pelo importante papel que desempenham no processo de mitigação do aquecimento global, pois, estocam em sua biomassa aérea e subterrânea, mais carbono do que o existente na atmosfera (VIEIRA et al., 2008; WATSON, 2000). Em florestas tropicais, é importante para a compreensão da dinâmica dos fluxos de carbono entre os ecossistemas terrestres e a atmosfera, a quantificação de biomassa (CUTLER et al., 2012), pois o serviço ambiental fornecido é de grande importância, sendo o processo fotossintético o responsável pela retirada do CO<sub>2</sub> da atmosfera, fixando-o em sua biomassa (REPORT et al., 2006).

As estimativas de biomassa, atualmente disponíveis na literatura, nas diferentes tipologias florestais da Amazônia, vêm de estudos que se utilizam de métodos diretos e indiretos. O método direto consiste na derrubada de árvores que ocorrem em parcelas fixas, fornecendo estimativas que segundo Brown et al. (1989), não são confiáveis devido a baixa quantidade de parcelas mensuradas e a tendenciosidade ao escolhê-las. No método indireto, as estimativas têm sido produzidas a partir de dados de inventários florestais que foram explorados com a finalidade de planejar a exploração e o manejo florestal, sendo o volume de madeira, a principal variável. Neste método, a biomassa é estimada a partir do volume da madeira (HIGUCHI et al., 1998).

A mensuração da biomassa em vegetação nativa é um processo que demanda além de tempo, uma quantidade elevada de recursos financeiros. Portanto, a utilização de métodos ou técnicas com maior precisão, como as redes neurais artificiais (RNAs), para estimar estes estoques é de fundamental importância para atender diversos objetivos, tanto de uso e produção quanto de conservação da vegetação nativa (MIRANDA et al., 2015). As redes neurais artificiais (RNAs) consistem em redes de unidades de processamento interligadas por pesos ajustáveis. Cada unidade possui uma função matemática que processa o somatório das entradas do respectivo neurônio, gerando um valor de saída. Este valor é então repassado a todos os neurônios seguintes (GÖRGENS, 2006). Aliada aos dados de sensoriamento remoto, as redes neurais apresentam grande potencial para a estimativa de variáveis dendrométricas de florestas nativas e plantadas.

O uso do sensoriamento remoto para a quantificação da produção florestal através do uso de imagens de satélite ainda é pouco usado, sobretudo em florestas heterogêneas (WATZLAWICK, 2003), em razão da alta diversidade florística e fisionômica. Contudo, o uso de imagens de satélite, para estimar e prognosticar a produção florestal quanto ao volume

de madeira e biomassa, pode ser considerada uma técnica mais fácil e menos onerosa para obtenção de dados, buscando simultaneamente o alto nível de confiança e precisão. Além disso, esta técnica permite a obtenção de informações sobre áreas remotas e inacessíveis (MIGUEL et al., 2015).

A interpolação de dados espaciais é um processo que possibilita o mapeamento de uma área com o conhecimento prévio de propriedades de alguns pontos, para prever propriedades de pontos desconhecidos. Um método geoestatístico de interpolação muito conhecido é a Krigagem. Segundo Vieira (2000) e Thompson (1992), a Krigagem tem capacidade de produzir melhores estimativas em termos de interpolação, porque está embasada em duas premissas: não-tendenciosidade do estimador e variância mínima das estimativas. Além disso, quando se trabalha considerando a dependência espacial, podem-se reduzir os erros aleatórios pelo controle de parcela deste erro associada à dependência espacial (MELLO et al., 2003).

Diante disso, o presente estudo objetivou analisar a relação de índices derivados de dados de sensoriamento remoto e variáveis dendrométricas mensuradas em campo em fragmento florestal no município de Juruti Velho, estado do Pará. Os resultados desta pesquisa serão úteis para entender a distribuição e a estimativa da biomassa em florestas tropicais com menor custo e tempo, subsidiando análises de mudanças climáticas e manejo florestal.

## **2. PROBLEMAS E QUESTÕES DE PESQUISA**

A extração ilegal de madeiras aumentou substancialmente nas últimas décadas, com previsão de continuidade do aumento na década corrente (Matricardi et al. 2010 e Matricardi et al. 2013). De acordo com Lemos e Silva (2011) as atividades econômicas associadas ao desmatamento têm representado verdadeiras ameaças à proteção da biodiversidade na Amazônia Legal, especialmente nos estados localizados em zonas de fronteira agrícola. Assim, é notório a necessidade de garantir a sustentabilidade das florestas tropicais, potencializando a produção e respeitando os limites da conservação é, portanto, um desafio do manejo florestal em toda a Amazônia brasileira.

As atividades de extração seletiva de madeira causam impactos direto na biomassa florestal. Para entender as condições de manejo implementado, faz-se necessário o conhecimento da quantificação da biomassa existente em uma floresta nativa, que é muito difícil de ser monitorada apropriadamente, especialmente para obtenção de dados da biomassa florestal em locais inacessíveis, que demandam trabalho de campo intensivos e muito onerosos para obtenção de dados dendrométricos. Por isso, o uso de dados de sensoriamento

remoto e de técnicas de geoestatística se apresentam como alternativas de estimação precisa de variáveis dendrométricas, possibilitando a espacialização e estimativa da biomassa florestal de áreas de interesse

Complementarmente, o uso de Redes Neurais Artificiais e dados de sensoriamento remoto tem sido muito eficiente em estudos florestais. Além de serem ferramentas que dispensam o abatimento das árvores, apresentam um sistema de inteligência que pode minimizar o erro, gerando modelos mais precisos, de melhor estimativa, em especial a biomassa florestal, como é o caso do manejo florestal.

Considerando a necessidade de estimativas mais rápidas e eficientes de biomassa em florestas tropicais, o presente estudo envolveu a comparação de dados de sensoriamento remoto com dados de inventário florestal para estimar a biomassa florestal de uma área de estudo no município de Juriti Velho, estado do Pará. A pesquisa foi embasada nas seguintes questões: Qual o padrão espacial da distribuição da biomassa florestal na área de estudo estimada a partir de dados de inventário florestal? É possível identificar algum padrão de distribuição da biomassa como efeito da exploração florestal? Qual a precisão da estimativa da biomassa florestal da área estudada utilizando dados de sensoriamento remoto e Redes Neurais Artificiais (RNA)? Qual o desempenho das RNA comparados como os modelos de Regressão na estimativa de biomassa florestal na área de estudo?

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GERAL**

Avaliar técnicas de geoprocessamento e dados de sensores remoto na estimativa da quantidade de biomassa em uma área de floresta tropical explorada seletivamente, localizada no município de Juruti Velho, no estado do Pará, utilizando dados de inventário florestal e técnicas de redes neurais artificiais e geoestatística.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estimar o estoque de biomassa aérea para a área de estudo a partir de dados de campo de inventário florestal;
- Estimar o estoque de biomassa aérea para a área de estudo a partir de dados de sensoriamento remoto e do uso de redes neurais artificiais;
- Comparar estimativas de estoque de biomassa (ton/ha) da área de estudo obtidas a partir de técnica de geoestatística krigagem com a estimativa da biomassa obtida pelos dados de inventário florestal;

▪ Estimar o estoque de biomassa para a área de estudo utilizando dados de levantamento em campo e técnicas de interpolação de dados geoespaciais.

## **4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **4.1 ÁREA DE ESTUDO**

O Estado do Pará possui uma grande extensão de florestas (70% do Estado), com predominância de florestas ricas em espécies de valor comercial (madeireiro e não-madeireiro). As condições de relevo (em geral, plano a suavemente ondulado), a grande extensão de rios navegáveis, uma ampla rede de estradas e o clima chuvoso, porém com estação seca definida, oferecem condições favoráveis para a atividade florestal. Esses fatores têm favorecido o rápido crescimento da atividade madeireira no Estado do Pará (VERÍSSIMO et al., 2006a).

A aptidão para a atividade florestal da região norte do Brasil é evidenciada através da abundância de florestas e condições de relevo geralmente favoráveis para exploração florestal. Esses fatores têm contribuído para a expansão da atividade madeireira no Pará, que é o Estado que apresenta maior aptidão para atividades florestais, devido à localização estratégica em relação aos mercados nacional e externo, porém, a maioria da exploração ainda é realizada de forma não-manejada. (VERÍSSIMO et al., 2006b).

E acordo com Lemos e Silva (2011) o estado do Pará é o segundo com maior taxa de desmatamento na Amazônia, com 221.276 km<sup>2</sup>, essa taxa de desmatamento tem registrado baixas sucessivas nos últimos cinco anos, porém, apesar desta baixa, o desmatamento continua em grande escala, o qual, segundo (PARÁ, 2009), está relacionado a algumas situações, como: a situação fundiária, a pecuária extensiva, a agricultura relacionada principalmente com a cultura da soja, a produção madeireira e a siderurgia.

Tendo em vista o alto potencial de crescimento e desenvolvimento na região oeste do Pará, onde localiza-se Juruti Velho, a implantação de grandes projetos correlaciona-se à exploração territorial e degradação ambiental da Amazônia, pautada em um discurso de desenvolvimento e modernização, mas que tem ocasionado problemas socioambientais à população que nela reside (ARÁUJO, 2009). Dentro desse contexto é necessário ressaltar o projeto de extração de bauxita (insumo necessário da alumina, que vem a ser matéria-prima do alumínio) levado a cabo pela ALCOA Inc. (maior produtora de alumínio do mundo), no Município de Juruti, Pará (ARÁUJO, 2009).

As consequências desse empreendimento na região de Juriti Velho interferem diretamente nos processos naturais e as atividades sociais da região, são elas: mina de bauxita, usina de concentração de minério, bacia de rejeitos, estruturas de apoio, abertura e pavimentação de estrada de rodagem, construção de ferrovia, de usina diesel-elétrica e construção do porto visando o escoamento de sua produção (CNEC, 2005).

Diante do relevante potencial e do impactante empreendimento desenvolvido, essa região merece atenção quanto ao seu manejo florestal, o qual é considerado por muitos pesquisadores, como um processo de tomada de decisão. Neste contexto o profissional florestal necessita ter uma visão global de planejamento, utilizando-se para tal, modelos matemáticos que possibilitem a previsão da produção, assim como gerenciar informações através de planos de manejos em que a otimização seja a tônica do processo (SILVA, 2006).

O alto potencial madeireiro apresentado pela região oeste do Pará leva a uma visão mais específica do manejo: o manejo florestal madeireiro, o qual é considerado um dos instrumentos mais viáveis de gestão dos recursos florestais com vistas à produção sustentada de madeiras (SILVA, 2006).

#### **4.2 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO**

O Manejo de Florestas tropicais heterogêneas constitui o maior desafio da Ciência Florestal, devido a sua complexidade e a dificuldade de interpretação das múltiplas inter-relações do ecossistema natural. Estas dificuldades redobram-se na proporção direta do aumento da diversidade de espécies que compõem a comunidade vegetal. A vegetação é um fenômeno natural complexo, que pode ser medido por diversos parâmetros e está relacionado com alguns fatores do meio, tais como: climáticos, edáficos e bióticos, dando como resultado distintas classificações dos tipos ecológicos (SILVA, 2006).

O sensoriamento remoto é a utilização conjunta de sensores e equipamentos para processamento de dados e transmissão de dados colocados a bordo de plataformas, visando estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície do planeta Terra a partir do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que o compõem (PAMPLONNA, 2017).

Dados de sensoriamento remoto têm sido usados desde a década de 1960 por cientistas para extrair e modelar vários parâmetros biofísicos da vegetação. Grande parte desse esforço tem envolvido o uso de índices de vegetação (medidas radiométricas adimensionais), as quais indicam a abundância relativa e a atividade da vegetação verde, incluindo índice de área foliar (IAF), porcentagem de cobertura verde, teor de clorofila, biomassa verde e radiação

fotossinteticamente ativa absorvida (JENSEN, 2009). Índices de vegetação (IVs) e outras variáveis extraídas de imagens de sensoriamento remoto, apresentam grande vantagem de proporcionar a acessibilidade de informações em locais remotos de difícil acesso (SOUSA; PONZONI, 1998).

Conforme Jensen (2009), índices de Vegetação são as combinações dos Fatores de Reflectância Bidirecional - FRB de superfície, determinados em dois ou mais comprimentos de onda, que estão associados a uma propriedade particular da vegetação (LEAL, 2013).

De acordo com Huete (1988) os índices de vegetação são correlacionados com diversos parâmetros biofísicos como biomassa, assim, o presente estudo objetivou estimar e correlacionar os índices a partir da resposta fotossintética obtida através de medidas da reflectância das faixas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético (SARTORI et al., 2009) para estimar a biomassa.

O uso de imagens de alta resolução para a estimativa de biomassa florestal tem sido uma técnica menos onerosa (comparada aos métodos tradicionais) e prejudicial ao meio ambiente, sem negligenciar o nível de precisão, e os resultados mostram uma relação relevante entre associação do conteúdo de biomassa com os valores de radiância/reflectância, obtidos com a utilização de imagens de satélite (WATZLAWICK, 2003).

Para florestas naturais, normalmente heterogêneas, com grande diversidade florística, fisionômica e fenológica, a utilização da técnica de geoprocessamento reveste-se de maior complexidade, uma vez que há pouca disponibilidade de dados quantitativos de biomassa coletados em nível de campo (SOUSA; PONZONI, 1998). Portanto, há carência de pesquisas que integrem dados de diferentes escalas e fontes, como inventários florestais e imagens de satélites, para a obtenção de mapas de distribuição de dados biofísicos para florestas naturais (SCHOENINGER et al., 2008).

Nas ciências florestais é de suma importância a compreensão de variações do acúmulo de biomassa acima do solo, tanto para determinação da quantidade de carbono retido pela vegetação, como para determinação da produtividade (BRANDÃO; BEZERRA; SILVA, 2007). Diferentes métodos têm sido desenvolvidos para estimar produtividades por meio de dados de satélite. Um deles é o desenvolvimento de relações empíricas entre o NDVI (“Normalized Difference Vegetation Index”) e a produtividade, mas com o inconveniente de que a maioria dos métodos usando essas relações estatísticas têm um forte caráter empírico, com coeficientes de correlação de moderados a baixo (SHARMA et al., 1993).



### **4.3 REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS**

Atualmente muitas pesquisas estão voltadas para métodos de determinação da biomassa que sejam precisos como os convencionais, mas que também não agriam o meio ambiente e sejam de baixo custo. Dessa forma, o uso de algumas técnicas aliadas ao sensoriamento remoto vem se tornando uma alternativa importante para obtenção de estimativas precisas e confiáveis da atividade fotossintética em larga escala (BRANDÃO; BEZERRA; SILVA, 2007).

Diante das técnicas normalmente utilizadas, torna-se clara a necessidade do desenvolvimento de uma metodologia que permita a quantificação da biomassa e do carbono orgânico arbóreo de forma mais eficiente. Para tanto, um modelo que permita integrar diferentes fontes de entradas de dados, para uma mesma saída e que faça o ajuste de forma mais automatizada, seria o mais adequado e, nesse contexto, as RNA apresentam-se como uma proposta válida (SCHOENINGER, 2008).

De acordo com um estudo feito em Minas Gerais, com vegetação nativa, a comparação de resultados obtidos com a aplicação das RNA e equações de volume total, apresenta resultados equivalentes ou superiores para todas as tipologias florestais analisadas. Esses resultados comprovam o potencial de Redes Neurais Artificiais, na modelagem da produção de vegetações nativas, propiciando ao manejador informações úteis e precisas para fins de planos de manejo. Outros benefícios do ponto de vista prático foram comprovados em pesquisas desenvolvidas na área florestal, como por exemplo a redução do número de medições de diâmetro na cubagem de árvores clonais a partir de RNA, como também a estimativa da biomassa arbórea, quantificação de carbono, estimativa de altura, distribuição diamétrica; estimativa de mortalidade e prognose da produção (ARAÚJO,2015).

O sucesso obtido pela aplicação das RNA em diferentes áreas da Engenharia Florestal deve-se dentre outros fatores, a utilização de variáveis contínuas e categóricas que apresentem relações biológicas e/ou matemáticas com a variável a ser estimada, como por exemplo o volume, além da capacidade que as mesmas possuem em lidar com relações não lineares complexas e presença de ruídos. Diante disso, percebe-se que para ter sucesso no planejamento florestal, é fundamental a adoção de novos métodos, buscando segurança na tomada de decisão e diminuição do custo operacional (ARAÚJO,2015).

#### **4.4 GEOESTATÍSTICA**

Quando uma determinada propriedade varia de um local para outro com algum grau de organização ou continuidade, expresso através de dependência espacial, a estatística clássica deve ser abandonada e dar lugar a geoestatística (VIEIRA, 1999).

O método de geoestatística que tem sido explorado em ciências florestais é chamado de Krigagem que visa a interpolação espacial. Myers (1994) e Laslett (1994) fizeram uma abordagem geral de métodos utilizados para interpolação espacial de parâmetros em áreas de pesquisa como ciência do solo, ecologia, engenharia florestal, hidrologia e meteorologia, destacando-se a krigagem (ou interpolação geoestatística) como um preditor em potencial de inúmeros parâmetros nestas áreas (MELLO et al, 2003).

A abordagem geoestatística é recomendada na definição de estratégias de amostragem por ser considerada mais eficiente em relação a estatística clássica (FLATMAN & YFANTIS, 1984; DI et al., 1989).

A Krigagem é um método de interpolação de dados espaciais que apresenta bons resultados para predição de dados florestais, pois esta parte do princípio que pontos próximos no espaço tendem a ter valores mais parecidos do que pontos mais afastados (LEAL, 2013).

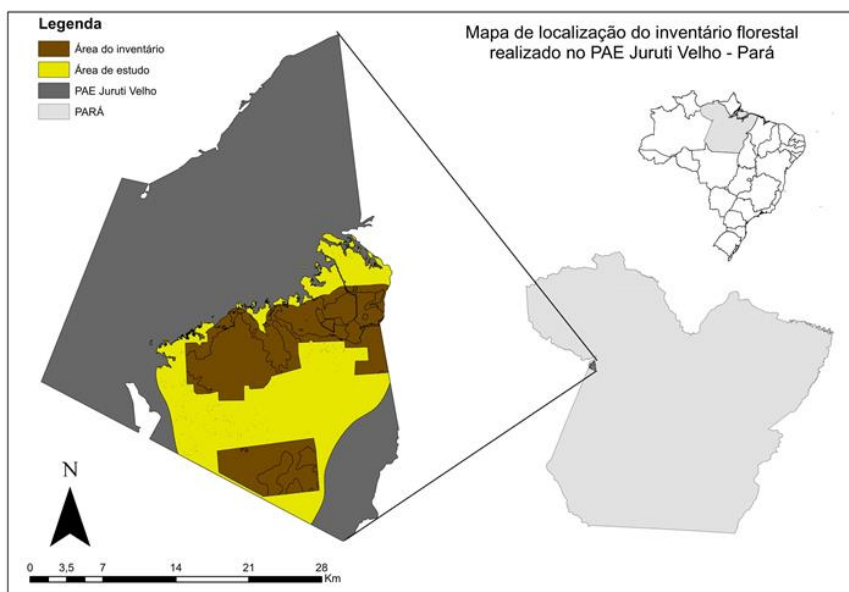
Segundo Leal (2013) e Câmara et al. (2002), o processo de Krigagem é pioneiro em introduzir o uso de médias móveis para evitar a superestimação sistemática para as variáveis estudadas, pois este estima uma matriz de covariância espacial, que determina os pesos atribuídos às diferentes amostras, o tratamento da redundância dos dados, a vizinhança a ser considerada no procedimento inferencial e o erro associado ao valor estimado. Logo o uso do processo de interpolação geoespacial - krigagem torna-se muito atrativo para estimar variáveis desconhecidas ou de difícil acesso em uma floresta nativa por sensoriamento remoto.

### **5. METODOLOGIA**

#### **5.1.1 ÁREA DE ESTUDO**

##### **5.1.1.1 LOCALIZAÇÃO**

A área de estudo está situada no Projeto de Assentamento Extrativista (PAE) Juruti Velho, localizado no oeste do estado do Pará. A área desta pesquisa é abrangida pela imagem do Satélite Landsat TM5, órbita/ponto 228/62, do sistema mundial de referencia (UTM), adquirida em 10/10/2010. A área inventariada em 2010 abrangeu um total de 14.999,7 hectares, parte da área total de 35.445,96 hectares do PAE Juruti Velho, conforme Figura 1.



**Figura 1.** Localização da área de estudo dentro do Projeto de Assentamento Extrativista (PAE) Juruti Velho, no estado do Pará.

### 5.1.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

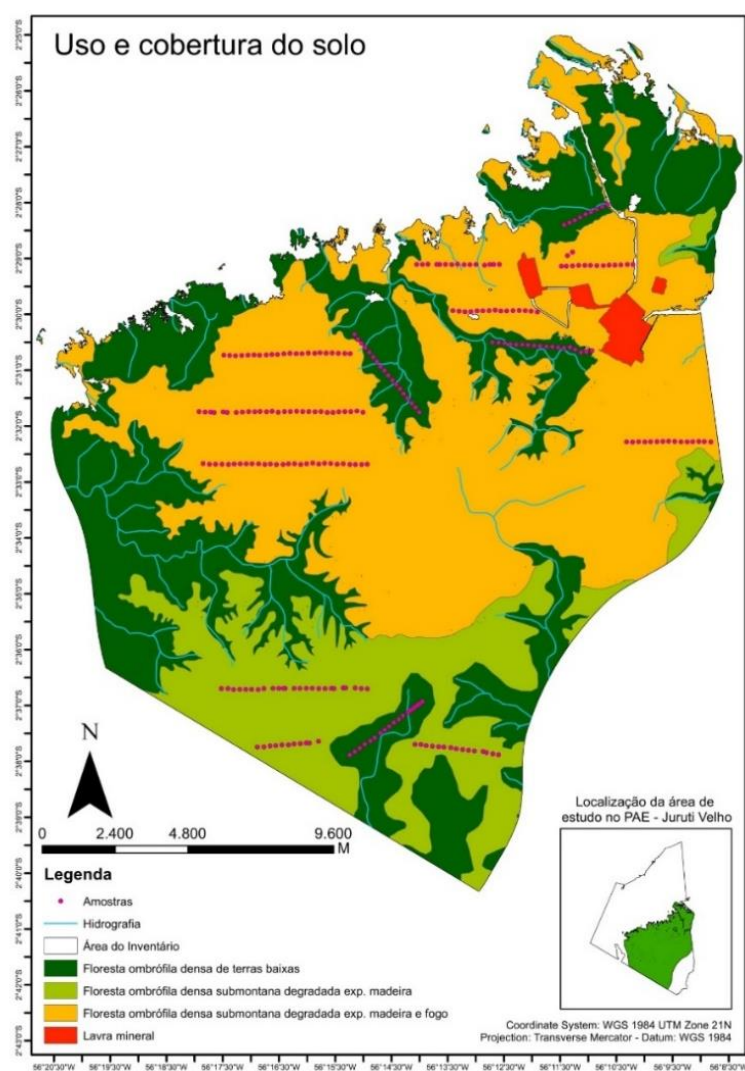
O relevo reflete em suas formas moderadas, a estrutura geológica representada por áreas de baixas colinas, tabuleiros e aplainados, escarpas tabulares, terraços e várzeas (AMORIM, 2013).

Os solos do município são representados pelo latossolo amarelo distrófico com textura média, latossolo amarelo distrófico com textura argilosa, areia quartzosa distrófica e podzólico vermelho amarelo com textura média, hidromórficos gleizados (AMORIM, 2013).

O clima quente e úmido característico das florestas tropicais, com temperatura média anual que varia de 25° a 28° C, com umidade relativa média do ar de 86%. A hidrografia do assentamento é bastante complexa tendo como principal rio o Amazonas que recebe o lago Juruti Velho, vários igarapés e lagos da região (FERREIRA, 2016; IDESP, 2011).

### 5.1.3 USO E COBERTURA DO SOLO

A região analisada é composta por Floresta Ombrófila Densa Submontana (Floresta de Platô) subdivididas em Floresta de Platô degradada por extração de madeira, Floresta de Platô degradada por extração de madeira e fogo e Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas (Floresta de Terras Baixas) (FLORESTAL, 2011). É possível observar essa classificação através da Figura 2 e da Tabela 1.



**Figura 2.** Uso e cobertura do solo na área de estudo, localizada dentro do Projeto de Assentamento Extrativista (PAE) Juruti Velho, no estado do Pará

**Tabela 1.** Uso e cobertura do solo no ano de 2010 no PAE Juruti Velho.

| Uso e cobertura do solo                                                  | Área (ha)       |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Desmatamento corte raso                                                  | 3.585,7         |
| Floresta ombrófila densa de terras baixas                                | 29.919,9        |
| Floresta ombrófila densa submontana degradada por extração de madeira    | 13.039,0        |
| Floresta ombrófila densa submontana degradada extração de madeira e fogo | 22.553,9        |
| Lavra mineral                                                            | 416,4           |
| Regeneração secundária                                                   | 18.067,1        |
| Rios e lagos                                                             | 8.319,6         |
| <b>Total</b>                                                             | <b>95.901,6</b> |

Fonte: Relatório Técnico de Geoprocessamento sobre Uso do Solo e Cobertura Florestal no PAE-JV (ECOOIDEIA, 2011a)

#### 5.1.4 CENÁRIO SOCIOECONÔMICO

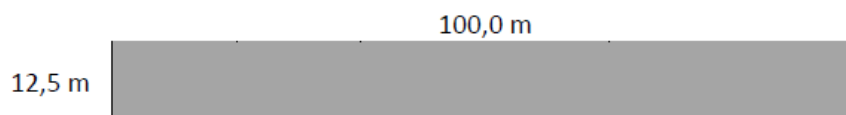
No grande Projeto da ALCOA (grande empresa de alumínio internacional), encontram-se 45 comunidades tradicionais, cujos territórios tradicionais foram garantidos pela Superintendência Regional 30 do INCRA, a partir da criação do Projeto Agroextrativista Juruti Velho (PAE Juruti Velho). Os limites territoriais do PAE tiveram parte de sua extensão outorgados à empresa minerária para atender à exploração da bauxita, o que agravou ainda mais os conflitos sob o ponto de vista fundiário e de recursos naturais, até então livremente apropriados pelos comunitários (VIEIRA et al., 2008).

### 5.2 BASE DE DADOS

A obtenção de dados para o desenvolvimento desse trabalho foi dividida em duas etapas. A primeira etapa, referente a estimativa de biomassa, utilizou-se um banco de dados resultantes de um inventário realizado em 2010 pela empresa Florestal-planejamento, paisagismo e consultoria Ltda., referente a região da área de lavra da mina Juruti, no município de Juruti Velho, estado do Pará. A segunda etapa foi referente à obtenção e correção da imagem, a qual serviu de insumo para o cálculo dos índices de vegetação.

#### 5.2.1 INVENTÁRIO FLORESTAL

O inventário florestal foi feito pelo método de amostragem estratificada proporcional, com amostras sistematizadas implantadas em 14 transectos (tabela 1), totalizando 250 amostras retangulares, cada uma com 1250m<sup>2</sup> (Figura 3), e 250 subparcelas de regeneração (cada uma com 125m<sup>2</sup>), distribuídas proporcionalmente a área de cada estrato inventariado (Floresta Ombrófila Densa Submontana e Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas), conforme mostra na tabela 2, a um limite de erro máximo esperado é de 10% e um nível de confiança de 95%. Para o presente estudo serão utilizados apenas os dados das 250 amostras, ou seja, excluindo as parcelas de regeneração. Foram incluídos nesse estudo as árvores, palmeiras e cipós, dentro da área de interesse. O inventário florestal foi realizado pela empresa Florestal-planejamento, paisagismo e consultoria Ltda.



**Figura 3.** Forma e tamanho das parcelas utilizada no inventário florestal no município de Juruti Velho, estado do Pará

A divisão dos estrados florestais amostrados no inventário florestal conduzido na área de estudo, incluíram Floresta Ombrófila Submontana e de Terras Baixas, sem distúrbios e impactada por extração seletiva e por fogo, conforme apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2** Divisão dos estratos amostrais na área de estudo em Juruti Velho, estado do Pará

| <b>Estrato amostral</b>                                                                                    | <b>Nº do estrato</b> | <b>Área (ha)</b> | <b>Nº de amostras mensuradas (12,50 m x 100,0 m)</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------|------------------------------------------------------|
| <b>Floresta Ombrófila Densa Submontana -</b><br>Floresta de Platô degradada por extração de madeira e fogo | 1                    | 8.290,20         | 138                                                  |
| <b>Floresta Ombrófila Densa Submontana -</b><br>Floresta de Platô degradada por extração de madeira        | 2                    | 3.029,30         | 61                                                   |
| <b>Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas</b>                                                           | 3                    | 3.680,20         | 51                                                   |
| <b>TOTAL</b>                                                                                               | <b>3</b>             | <b>14.999,70</b> | <b>250</b>                                           |

A distribuição das amostras nos estratos florestais incluiu transectos em todos os estratos, conforme apresentado na Tabela 3.

**Tabela 3** Distribuição das amostras nos estratos amostrais na área de estudo no município de Juruti Velho, estado do Pará

| <b>Estratos</b>                                                                                            | <b>Nº do Transecto</b> | <b>Comprimento do Transecto (metros)</b> | <b>Nº de Amostra no transecto</b> | <b>Nº das amostras no transecto</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas</b>                                                           | 1                      | 5.000,00                                 | 25                                | 1 a 25                              |
|                                                                                                            | 2                      | 2.200,00                                 | 11                                | 26 a 36                             |
|                                                                                                            | 3                      | 3.000,00                                 | 15                                | 37 a 51                             |
| <b>Sub total</b>                                                                                           |                        | <b>10.200,00</b>                         | <b>51</b>                         |                                     |
| <b>Floresta Ombrófila Densa Submontana -</b><br>Floresta de Platô degradada por extração de madeira        | 4                      | 3.200,00                                 | 16                                | 52 a 67                             |
|                                                                                                            | 8                      | 3.600,00                                 | 18                                | 146 a 163                           |
|                                                                                                            | 10                     | 3.600,00                                 | 18                                | 179 a 196                           |
|                                                                                                            | 14                     | 1.800,00                                 | 9                                 | 242 a 250                           |
| <b>Sub total</b>                                                                                           |                        | <b>12.200,00</b>                         | <b>61</b>                         |                                     |
| <b>Floresta Ombrófila Densa Submontana -</b><br>Floresta de Platô degradada por extração de madeira e fogo | 5                      | 5.600,00                                 | 28                                | 68 a 95                             |
|                                                                                                            | 6                      | 5.600,00                                 | 28                                | 96 a 123                            |
|                                                                                                            | 7                      | 4.400,00                                 | 22                                | 124 a 145                           |
|                                                                                                            | 9                      | 3.000,00                                 | 15                                | 164 a 178                           |
|                                                                                                            | 11                     | 3.000,00                                 | 15                                | 197 a 211                           |
|                                                                                                            | 12                     | 3.000,00                                 | 15                                | 212 a 226                           |
|                                                                                                            | 13                     | 3.000,00                                 | 15                                | 227 a 241                           |
| <b>Sub total</b>                                                                                           |                        | <b>27.600,00</b>                         | <b>138</b>                        |                                     |
| <b>Total Geral</b>                                                                                         |                        | <b>50.000,00</b>                         | <b>250</b>                        |                                     |

### 5.2.2 CUBAGEM

Foram cubadas 7060 árvores pelo método indireto, essa cubagem foi efetuada da seguinte maneira:

- a. Multiplicou-se a altura comercial pela área basal de cada árvore encontrando-se um o "volume cilíndrico" das mesmas;
- b. Multiplicou-se o volume cilíndrico de cada árvore pelo fator de forma 0,7 (relação entre volume cilíndrico e volume real), conforme descrito em Heinsdriek & Bastos (1963), citado como fator de forma médio para as espécies da Amazônia.

### 5.2.3 VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS

Para o presente trabalho foram utilizadas 5 variáveis: DAP (Diâmetro a altura do peito), G (Área Basal), H (altura total), HL (altura de Lorey) e V (Volume total). A partir dessas variáveis foi possível estimar o volume e o estoque de biomassa na região inventariada.

A fim de organizar os dados por parcelas, foram reunidas as variáveis dendrométricas já calculadas para cada árvore em uma tabela dinâmica, excluindo os dados que apresentam os valores nulos para altura. Para o processamento dos dados foi utilizado o software *Microsoft Excel 2010*.

#### 5.2.3.1 DIÂMETRO A ALTURA DO PEITO

Para estimar o Diâmetro a Altura do Peito (DAP) a partir das medições do inventário em campo, adotou-se a seguinte equação:

$$DAP = \frac{CAP}{\pi} \quad (1)$$

Onde:

DAP = Diâmetro a Altura do Peito (cm)

CAP = Circunferência a Altura do Peito (cm)

$\pi = 3,1416$

#### 5.2.3.2 ÁREA BASAL

A Área Basal é uma variável de grande relevância para a a quantificação, esta foi estimada a partir das medições do inventário em campo, conforme a seguinte equação:

$$AB = \frac{\pi * DAP^2}{40000} \quad (2)$$

Onde:

AB = Área Basal (cm)

$DAP$  = Diâmetro a Altura do Peito (cm)

$\pi = 3,1416$

### 5.2.3.3 ALTURA TOTAL

Para medição da altura total, quando possível foi utilizado um telêmetro, medindo a altura das árvores em metros.

### 5.2.3.4 ALTURA DE LOREY

A altura de Lorey, não foi calculada pela empresa que realizou o inventário, porém de acordo com Machado e Figueiredo Filho (2006), essa altura apresenta uma boa correlação com o volume por unidade de área, pois é estimada em função da área basal por unidade de área e uma altura média (CARRIJO, 2016).

$$HL = \frac{\sum gi \cdot hi}{\sum gi} \quad (3)$$

Onde:

$gi$  = área seccional na i-ésima árvore da parcela(cm);

$hi$  = altura total da i-ésima árvore da parcela(m);

$\sum gi = G$  = área basal da parcela.

### 5.2.3.5 VOLUME

#### a. Volume por árvore

Foi obtido o volume por árvore individual, utilizando a altura comercial para a estimativa, conforme a seguinte equação:

$$Va = \frac{\pi \cdot DAP^2}{40000} * H * FF \quad (4)$$

Onde:

$Va$  = Volume com casca por árvore (m<sup>3</sup>)

$H$  = Altura comercial (m)

$DAP^2$  = Diâmetro a Altura do Peito ao quadrado (cm)

$\pi = 3,1416$

$FF$  = Fator de forma (para este projeto = 0,70)

#### b. Volume por amostra

A partir do somatório dos volumes obtidos por árvores individuais, foi calculado o volume por amostra, conforme a seguinte equação:



$$V_{am} = va1 + va2 + \dots + van \quad (5)$$

Onde:

$V_{am}$  = Volume por amostra ( $m^3$ )

$va1 + va2$  = somatório do volume individual por árvore na amostra

$n$  = número de arvores na amostra  $n$

### 5.3 BIOMASSA

A estimativa de biomassa florestal na área de inventário inserida no Projeto de Assentamento Extrativista (PAE) Juruti Velho, localizado no oeste do estado do Pará, foi feita utilizando dados de inventário florestal contínuo, de sensoriamento remoto associado a redes neurais artificiais e geoestatística. Estudos de avaliação e comparação de métodos diretos e indiretos de estimativas de volume e biomassa florestal foram conduzidos para entender a eficiência e a aplicação das técnicas de geoprocessamento e o uso de redes neurais artificiais no manejo florestal.

A estimativa de estoque de biomassa foi fundamentada nos resultados do inventário florestal amostral realizado em Juruti Velho. Foram amostrados três estratos florestais, a saber: floresta ombrófila densa de terras baixas (FOD-TB); floresta de platô (“floresta ombrófila densa submontana”) degradada por extração de madeira (FP-DEM); e floresta de platô degradada por extração de madeira e fogo (FP-DEMF).

#### 5.3.2 MÉTODO

A estimativa do estoque de biomassa na floresta foi realizada de forma indireta, a partir de dados biométricos do inventário florestal, segundo metodologia desenvolvida pelo INPA (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia) (HIGUSHI et al., 1998).

As equações do INPA foram desenvolvidas para estimativas indiretas da biomassa florestal, ou seja, realizadas sem a necessidade de derrubada e pesagem de todas as árvores de uma parcela (FLORESTAL, 2011). O método utiliza os dados biométricos (DAP e altura total) para estimar a biomassa, sem a necessidade de intervenção na formação florestal.

A fim de determinar o estoque de biomassa, foram testados quatro modelos de regressão desenvolvidos pelo INPA. Os modelos fornecem estimativas da biomassa fresca (não seca) da floresta (FLORESTAL, 2011).

### 5.3.3 MODELOS DE REGRESSÃO

Para estimar o estoque de biomassa para área de floresta de terra firme na região amazônica, foram testados pelo Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia (INPA) (Higushi et al., 1998), os seguintes modelos de regressão, dois lineares e dois logarítmicos, os quais foram testados para floresta densa de terra-firme com latossolo amarelo na Amazônia Brasileira:

**Tabela 4** Modelos de regressão testados pelo INPA (Higushi et al., 1998)

|   |                                                                                 |
|---|---------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | $\ln P_i \beta_1 * \ln D_i = \beta_0 + \beta_1 * \ln D_i + \ln \varepsilon_i$   |
| 2 | $\ln P_i = \beta_0 + \beta_1 * \ln D_i + \beta_2 * \ln D_i + \ln \varepsilon_i$ |
| 3 | $P_i = \beta_0 + \beta_1 * D_i^2 * H_i + \varepsilon_i$                         |
| 4 | $P_i = \beta_0 * D^{\beta_1} * H^{\beta_2} + \varepsilon_i$                     |

Os modelos foram testados para gerar estimativas a partir de uma equação única (incluindo dados de todas as árvores com diâmetro igual ou superior a 5 cm), com dados separados em classes de diâmetro.

Depois de selecionados, os modelos de regressão foram testados com dados provenientes do banco de dados do INPA (1998), originados de medições diretas, sendo verificados parâmetros de análise de regressão: coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), ou seja, quanto mais próximo de (1) um melhor; desvio padrão da estimativa (quanto menor melhor); e melhor distribuição dos resíduos (FLORESTAL, 2011).

A partir dos testes realizados pelos pesquisadores do INPA, o modelo 3 se mostrou o melhor para estimativa da biomassa aérea total, sendo recomendável o uso das seguintes equações:

$$(a) P = 0,0056 + 0,621 D^2 H, \quad \text{para } 0,05 \leq DAP < 0,20 \text{ m}$$

$$(b) P = 0,393 + 0,473 D^2 H, \quad \text{para } DAP \geq 0,20 \text{ m}$$

Onde:

P = peso da biomassa fresca, em toneladas;

D = diâmetro a altura do peito (DAP), em metros;

H = altura total da árvore, em metros.

#### 5.4 IMAGEM DE SATÉLITE UTILIZADA

Para o presente estudo foi utilizada uma (1) imagem obtida pelo satélite Landsat TM 5, órbita-ponto 228-062, com resolução espacial de 30 metros e 7 bandas espectrais. As imagens de satélite foram obtidas através do site do INPE ([www.dgi.inpe.br](http://www.dgi.inpe.br)), correspondentes ao ano de 2010, coincidindo com o mesmo ano que o inventário foi realizado.

O conhecimento destes dados (Gain e Bias) é de grande importância, pois influenciam diretamente nos valores dos níveis digitais dos “pixels” da imagem orbital, afetando diretamente os resultados obtidos após o processamento da imagem (GERMANO, 2011). Assim faz-se necessário a calibração termal dos pixels através de dados de Gain (ganho) e Bias (offset).

**Tabela 5.** Imagem utilizada na pesquisa na área de estudo no município de Juruti Velho, estado do Pará

| Órbita/Ponto | Data de aquisição | Satélite / Sensor |
|--------------|-------------------|-------------------|
| 228/062      | 10/10/2010        | Landsat-5 TM      |

**Tabela 6** Metadados da imagem Landsat-5 TM, utilizada neste estudo para a devida correção radiométrica

| Metadados       |           |             |
|-----------------|-----------|-------------|
| Banda           | Gain      | Bias        |
| 1               | 0.762824  | -1.52       |
| 2               | 1.44251   | -2.84       |
| 3               | 1.03988   | -1.17       |
| 4               | 0.872588  | -1.51       |
| 5               | 0.119882  | -0.37       |
| 6               | 0.0551576 | 1.2378      |
| 7               | 0.0652941 | -0.15       |
| Elevação do Sol |           | 63.23203073 |
| Azimute solar   |           | 99.22409325 |

### 5.4.2 USO E APLICAÇÃO

O satélite escolhido para obtenção da imagem foi o Satélite Landsat-5 TM, essa escolha justifica-se pelos seguintes motivos:

- a) O satélite opera com sete (7) bandas espectrais nas regiões do: visível (vermelho, verde e azul), infravermelho próximo, médio e termal, fator importante para análise de biomassa.
- b) Apresenta melhor resolução espacial, acurácia radiométrica e posicionamento geométrico que seu antecessor, o sensor MSS (*Multispectral Scanner System*) (LEAL, 2013).
- c) Para o ano do inventário realizado não há imagens de boa qualidade disponíveis para a área de estudo, sendo observada uma alta porcentagem de cobertura por nuvens, devido o clima chuvoso predominante na região.

Segundo Leal (2013) inúmeros trabalhos vêm sendo feitos com imagens Landsat nas últimas três décadas para o mapeamento e monitoramento da cobertura terrestre, podendo citar como exemplo o estudo de Berra et al. (2011) onde estimou-se o volume florestal com imagem Landsat-5 a fim de estimar o volume arbóreo utilizando-se técnicas de sensoriamento remoto e imagem do satélite Landsat-5, aliados aos dados de campo obtidos por inventário florestal em povoamentos de *Eucalyptus* sp.

### 5.4.3 CORREÇÃO ATMOSFÉRICA

A correção atmosférica significa um aprimoramento na qualidade da imagem devido à redução de efeitos atmosféricos por absorção de gases da atmosfera e pelo processo de dispersão (Vermote et al., 1997).

Para realizar uma correção atmosférica é necessário observar três componentes da radiação solar no Sensor (Topo-da-Atmosfera - TOA): a radiação não espalhada, refletida pela superfície; a radiação espalhada na descendente, refletida-superfície e a radiância atmosférica.

#### a. Conversão de Número Digital em Radiância

A determinação da radiância é um passo fundamental na conversão de dados de imagem de sensores orbitais em medidas de reflectância (SILVA, 2013). Para que uma imagem seja calibrada de forma absoluta é necessário que os números digitais sejam relacionados com as radiâncias provenientes de objetos de referência no solo com caracterização espectral bem definida, assim a partir de uma relação linear é feita a conversão do número digital em reflectância, através de uma interpolação linear, utilizando como parâmetros dados do metadados da imagem utilizada, conforme a seguinte equação:

$$L_{rad} = L_{i \min} + \left( \frac{L_{i \max} - L_{i \min}}{255} \right) * NC_i \quad (6)$$

Onde:

$L_i$  = radiância espectral na banda  $i$  em  $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ;

$L_{i \max}$  = valor de radiância máxima na banda  $i$ ,

$L_{i \min}$  = valor de radiância mínima na banda  $i$ ,

$NC_i$  = nível de cinza na banda  $i$ .

## b. Reflectância no Topo da Atmosfera

A fim de corrigir a imagem utilizada no presente estudo, foi realizada a correção da reflectância no Topo da Atmosfera através da função *Model Maker* (*Toolbox>Model Maker*) do software *Erdas Imagine 2011*, onde é possível inserir uma imagem de entrada, sendo posteriormente realizados os cálculos de acordo com a equação 7 gerando como saída a imagem corrigida atmosféricamente.

$$\rho_{TOA} = \frac{E_{\lambda \uparrow}}{E_{\lambda \downarrow}} = \frac{\pi E_{\lambda \uparrow}}{E_{sun \lambda} * \cos \theta_s} \quad (7)$$

Onde:

$d$  = Distância Terra-Sol em unidades astronômicas (~149.8 milhões km)

$E_{sun \lambda}$  = Média da irradiância solar exo-atmosférica ( $W / m^2 \cdot M$ )

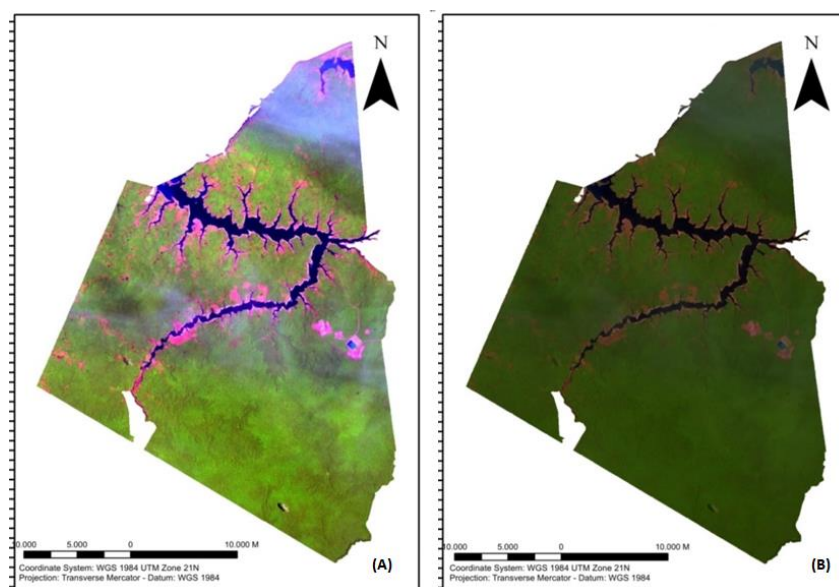
$\theta_s = 90 - \text{Elevação do Sol} = \text{Zenite do Ângulo Solar}$

A tabela 7 apresenta algumas características da imagem de satélite multiespectral selecionada.

**Tabela 7** Metadados da imagem utilizada no município de Juruti Velho, estado do Pará

| Sensor | Cena    | Data       | Nuvem    | Elevação solar | Bandas utilizadas |
|--------|---------|------------|----------|----------------|-------------------|
| TM     | 228/062 | 10/10/2010 | Q1 – 40% | 63.23203073    | 1, 2, 3, 4, 5 e 7 |

O resultado da correção atmosférica pode ser visto através da Figura 5, onde mostra a grande diferença entre as imagens sem e com correção TOA. As imagens estão compostas pelas bandas 5/4/3 a fim de facilitar a análise.



**Figura 4** Comparação da área de estudo sem (A) e com correção (B) atmosférica (Reflectância no Topo da Atmosfera – TOA)

Um limitador das análises de dados de sensoriamento remoto da área de estudo foram as condições atmosféricas. A região estudada permanece em constante clima chuvoso e, portanto, as imagens adquiridas por sensores de satélites de melhor resolução para o ano do inventário florestal (2010), apresentaram alto percentual de cobertura de nuvens para o quadrante 1 (Q1) da cena. Isto provocou efeitos nos valores de reflectância e, consequentemente, nos resultados dos índices de vegetação na parte mais afetada pelas condições atmosféricas da imagem da área de estudo.

## 5.5 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

Os índices calculados foram: o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), o *Modified Soil Adjusted Vegetation Index* (MSAVI), o *Modified Soil Adjusted Vegetation Index aerossol resistant* (MSAVI af), o *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI), o *Enhanced Vegetation Index* (EVI) e o *Simple Ratio* (SR).

As clorofilas presentes nas células vegetais apresentam uma resposta específica a radiação na região espectral do vermelho, o que difere a vegetação de outros elementos representados em uma imagem, essas, quando espalhadas ou refletidas podem ser observadas na região espectral do vermelho próximo.

O procedimento para o cálculo dos índices foi realizado em ambiente SIG, inicialmente, a partir do software *Erdas Imagine 2011*, foram realizados os cálculos através da função *Model Maker* (*Toolbox>Model Maker*). Em seguida, a partir da imagem resultante, no

ambiente do software *Arcgis 10.2.2*, através da função *Zonal Statistics as Table* (*ArcToolbox>Spatial Analyst>Zonal Statistics as Table*) foram obtidas as médias de reflectância das áreas das amostras, e por fim estas foram correlacionadas com o volume e o com o estoque de biomassa no software *Microsoft Excel 2010*, usando como parâmetro de comparação, a intensidade de correlação ( $r^2$ ), fator que varia de 0 a 1, sendo a maior precisão quanto mais próximo de 1.

A análise de correlação dos índices de vegetação com o estoque de biomassa foi feita em três níveis:

- a) Por amostra = 250 unidades amostrais
- b) Por transecto = 14 unidades amostrais
- c) Divisão do transecto = 62 unidades amostrais (aglomerados de amostras)

### 5.5.2 NDVI

O NDVI é utilizado frequentemente para grandes escalas, devido à compensação parcial de condições de iluminação, inclinação da superfície da Terra e aspectos de visadas do sensor da ampla largura da órbita (LOURENÇO, 2004). O NDVI foi desenvolvido por Rouse et al. (1973), e pode ser definido como:

$$NDVI = \frac{Nir-Red}{(Nir+Red)} \quad (8)$$

Onde:

Nir = pixel no infravermelho próximo (banda 4)

Red = pixel onde a reflectância ocorre no vermelho (banda 3)

A partir do NDVI, outras respostas fotossintéticas são geradas, gerando novos índices é possível inferir dados necessários para estimativa de biomassa.

### 5.5.3 EVI

O EVI foi desenvolvido para otimizar a resposta da vegetação verde melhorando a sensibilidade para as variações estruturais e arquitetônicas do dossel de fitofisionomias com maior densidade de biomassa em relação ao NDVI e reduzindo as influências atmosféricas e influência do solo (HUETE et al., 2002).

$$EVI = 2,5 * \frac{(\rho_{NIR}-\rho_{RED})}{\rho_{NIR}+(C1*\rho_{RED}-C2*\rho_{BLUE})+L} \quad (9)$$

Onde:

$\rho$  = refletâncias da superfície corrigidas ou parcialmente corrigidas para efeitos atmosféricos;

G = fator de ganho;

L = fator de ajuste para o substrato;

C1 e C2= coeficientes para correção de aerossóis (fumaça, partículas de poluição do ar, poeira), os quais utilizam a banda azul para corrigir a influência dos aerossóis na banda do vermelho (LEAL, 2013).

Segundo Huete et al. (1997), os coeficientes para os sensores MODIS são L=1, C1=6, C2=7,5 e G=2,5.

#### 5.5.4 SAVI

O Índice de Vegetação Ajustado por Solo (SAVI) proposto por Huete (1988) (Equação 10) introduzindo um fator no NDVI para incorporar o efeito da presença do solo (Silva et al., 2009).

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_{NIR}-\rho_{RED})}{\rho_{NIR} + \rho_{NIR} + L} \quad (10)$$

Onde:

$\rho_{Nir}$  = refletância na banda do infravermelho próximo;

$\rho_{Red}$  = refletância na banda do vermelho;

L = constante de ajuste ao solo.

#### 5.5.5 MSAVI

O Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI) propõe modificações no SAVI, baseadas na modificação do fator L. Ambos pretendem uma melhor correção do brilho do solo de fundo em diferentes condições de cobertura vegetal (LEAL, 2013). Como modificações são geradas: a remoção do “ruído” do solo e aumento dos valores de cada pixel, portanto segundo Leal (2013), seu uso para áreas com alto grau de vegetação é limitante.

O MSAVI foi desenvolvido por Barnes et al. (2000) e pode ser definido como:

$$MSAVI = \left[ \frac{\rho_{Nir} - \rho_{Red}}{(\rho_{Nir} + \rho_{Nir}) + L} \right] * (1 + L) \quad (11)$$

Onde:

$\rho_{Nir}$  = refletância na banda do infravermelho próximo;

$\rho_{Red}$  = refletância na banda do vermelho;



L = constante de ajuste ao solo.

### 5.5.6 MSAVI af

Quando o MSAVI usa comprimentos de onda de 2,1µm é chamado de MSAVI af, o qual reflete o índice MSAVI, porém com o aprimoramento, pois divide a banda do vermelho termal pela metade, mostrando uma imagem livre de aerossóis (aerossol free), ou seja, um índice que possui uma resistência maior aos aerossóis, conforme mostrado na equação 12.

$$MSAVIaf = \frac{\rho_{NIR} - 0.5\rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + 0.5\rho_{SWIR} + L} * (1 + L) \quad (12)$$

Onde:

$\rho_{NIR}$  = reflectância na banda do infravermelho próximo;

$\rho_{SWIR}$  = reflectância na banda do vermelho termal;

L = constante de ajuste ao solo.

### 5.5.7 SR

Um dos primeiros índices de vegetação foi proposto por Jordan (1969), dando origem ao Índice da Razão Simples (SR), definido como a razão da reflectância na região do infravermelho próximo e do vermelho e pode ser definido como demonstrado na equação 13 (Rodrigues et al, 2013).

$$SR = \frac{\rho_{iv}}{\rho_v} \quad (13)$$

Onde:

$\rho_{iv}$  = reflectância na banda do infravermelho próximo;

$\rho_v$  = reflectância na banda do vermelho;

## 5.6 GEOESTATÍSTICA

Ao analisar uma propriedade de uma área deve se atentar se a estatística clássica é a melhor alternativa, pois esta apresenta como parâmetros a média e o desvio padrão para analisar um fenômeno, baseando-se na hipótese que as variações entre as variáveis são aleatórias, no entanto, quando é observada certa dependência espacial entre as variáveis, deve-se utilizar o método da geoestatística.

A geoestatística utiliza o método de semivariograma, que considera a dependência espacial das amostras, a partir desse princípio é possível realizar a análise de dados sem tendenciosidade com variância mínima, ou seja, a krigagem, esse método além de reduzir erros, estima variáveis difíceis de serem mensuradas.

### 5.6.2 KRIGAGEM

A Krigagem parte do princípio que pontos próximos no espaço tendem a ter valores mais parecidos do que pontos mais afastados (LEAL, 2013). Logo, tendo isso como princípio, tem-se que unidades amostrais exercem influências em suas vizinhas, ou seja, há correlações. No entanto, a partir de uma determinada distância, certamente não se encontrarão valores aproximados, devido à probabilidade de correlação espacial deixar de existir (CÂMARA et al. 2002).

Existem três métodos mais usuais utilizados na Krigagem, no presente estudo será utilizado a krigagem ordinária, a qual apresenta médias locais levando em consideração as médias mais próximas do ponto amostrado, ao invés da média da população. Segundo Leal (2013), este é o método mais usado em problemas ambientais e em estimativas biológicas.

A partir das coordenadas das 250 amostras, foi feita uma seleção com apenas 67 amostras, usando como critério a distância de 3 ou 4 unidades amostrais. A partir dessas unidades amostrais foi feita uma nova seleção, usando como critério a média da amostra mais próxima com a amostra avaliada, resultando em 25 pontos amostrais. A variável utilizada para interpolação de dados espaciais foi o estoque de biomassa (ton) registrado para cada amostra. O software utilizado para a análise geoestatística foi o *ArcGIS 10.2.2*, através da ferramenta de interpolação Geoestatística para Krigagem Ordinária, onde não se optou pela representação do modelo matemático teórico do semivariograma foi utilizado o modelo geoestatístico *Hole effect* (ANDRIOTTI, 2005) com anisotropia, disponível na ferramenta *Geostatistical Wizard*.

### 5.6.3 SEMIVARIOGRAMA

Define-se variograma como a variância do erro que se comete ao estimar um teor desconhecido em  $(x + h)$  pela ajuda de um ponto dado (LEAL, 2013). O semivariograma é a metade do variograma. Em Yamamoto (2001), definido conforme a Equação 14:

$$\gamma(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (14)$$

Onde:

$\gamma(h)$  = função semivariograma;

$n$  = número de pares de pontos separados por uma distância  $h$ ;

$Z(x)$  valor da variável regionalizada no ponto  $x$ ;

$Z(x+h)$  = valor da variável regionalizada no ponto  $(x+h)$ .

## 5.7 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

A aplicação das redes neurais artificiais foi feita através do treinamento das redes pelo método supervisionado, onde o neurônio de saída (Y) é fornecido ao sistema, que no caso é a biomassa, de forma que este irá comparar esta variável com a estimada, com o objetivo de minimizar o erro a partir da inteligência artificial.

De acordo com Binoti et al. (2010), um neurônio artificial é a unidade de processamento de informação de uma RNA, constituído de “n” entradas  $x_1, x_2 \dots x_n$  (dendritos) e uma saída y (axônio). Dessa forma, as sinapses, as quais podem ser negativas ou positivas, são representadas por pesos(w) que ponderam os neurônios de entrada. De acordo com Leal et al. (2015) um modelo básico de neurônio artificial pode ser representado matematicamente como:

$$Y_K = \phi(V_K) \quad (15)$$

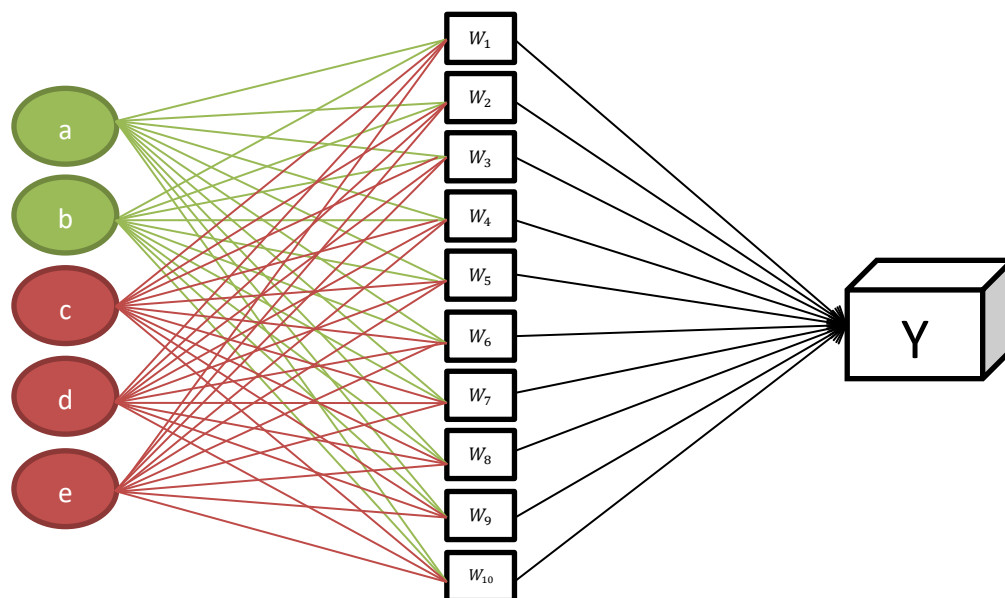
Onde:  $Y_K$  = saída do neurônio artificial;  $\phi$  = função de ativação;  $V_K$  = combinador linear.

$$V_K = \sum_0^m X_m * W_m \quad (16)$$

Onde:  $V_K$  = combinador linear;  $X_m$  = número de entradas; e  $W_m$  = peso de entrada de m.

O processo da aplicação das redes neurais artificiais (RNA) ocorreu através do ajuste do modelo composto pelos índices de vegetação que melhor se correlacionaram com a biomassa, estes obtidos através do sensoriamento remoto. Para o processamento de dados das RNA's foram utilizados os dados amostrais das divisões dos transectos, resultando em 62 amostras. Foram utilizados 5 neurônios de entrada obtidos através da modelagem dos dados, sendo 2 quantitativos (a - b) e 3 qualitativos (c - e), conforme apresentado a seguir:

- a.  $EVI^2 * MSAVI_{af}$ ;
- b. NDVI;
- c. Tipo de floresta 1 - Ombrófila densa de terras baixas (FOD-TB);
- d. Tipo de floresta 2- Platô degradado por extração de madeira (FP-DEM); e
- e. Tipo de floresta 3 - Platô degradado por extração de madeira e fogo (FP-DEMF)



**Figura 5** Arquitetura da Rede Neurais Artificiais (RNA) utilizada neste estudo

A partir da arquitetura proposta (figura 4), foram treinadas 100 redes neurais artificiais, do tipo *Multiplayer perceptron* (MLP) com algoritmo de treinamento *Resilient Propagation*, proposto por Riedmiller e Braun (1993), compostas por 1 camada oculta, e o número de neurônios nessa camada foi igual a 10 (número de neurônios na camada de entrada \* 2). Segundo Leal et al. (2015), o uso de MLP fundamenta-se na generalização de formas, traçados e padrões, sendo essa a sua principal aplicação.

Utilizou-se como critério de parada o erro médio (0,0001) ou o número de ciclos (12.000), com 20 convergências em 4 grupos. Para o treinamento dos dados foi utilizado os parâmetros de treinamento: taxa de aprendizagem ( $\mu$ ) de 0,01; e o termo momentum ( $\eta$ ) de 0,005. A taxa de aprendizagem utilizada *Quick propagation* foi de 2,0.

A partir da arquitetura proposta foi escolhida a RNA que apresentou menor erro e maior coeficiente de correlação. Foi utilizado 70% dos dados para treinamento e 30% para validação, após o processo de treinamento e aprendizagem das redes neurais artificiais, foram selecionadas 18 amostras para validação. O método de escolha na rede neural artificial teve como critério: coeficiente de correlação entre valor observado e valor estimado ( $r$ ) e erro-padrão da estimativa ( $Syx$ ). O *software* utilizado para o processamento das redes neurais será o *NeuroForest*, versão 3.2.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.2 INVENTÁRIO

A partir dos dados estatísticos apresentados na Tabela 8 e 9, observou-se que, a um nível de 95% de probabilidade, o erro padrão (erro de amostragem) para a média obtida para toda população foi de 6,38%.

**Tabela 8** Análise estatística do inventário florestal em Juruti Velho-PA

| ANÁLISE ESTATÍSTICA                                               |               |
|-------------------------------------------------------------------|---------------|
| Tipo de amostragem                                                | Estratificado |
| Área do Inventário Florestal                                      | 14.999,70     |
| Número de estratos na população                                   | 3             |
| Número de unidades de amostragem em que a população está dividida | 119.997,6     |
| Número de unidades de amostragem no estrato 1                     | 66.321,6      |
| Número de unidades de amostragem no estrato 2                     | 24.234,4      |
| Número de unidades de amostragem no estrato 3                     | 29.441,6      |
| Número de unidade de amostragem observadas na população           | 250           |
| Número de unidades de amostragem observadas no estrato 1          | 138           |
| Número de unidades de amostragem observadas no estrato 2          | 61            |
| Número de unidades de amostragem observadas no estrato 3          | 51            |
| Proporção do estrato1 em relação à área total                     | 0,553         |
| Proporção do estrato2 em relação à área total                     | 0,202         |
| Proporção do estrato 3 em relação à área total                    | 0,245         |
| Limite Máximo de Erro                                             | 0,100         |
| População - POPULAÇÃO INFINITA                                    | 0,998         |
| Valor de t (95% de probabilidade)                                 | 1,960         |

Com base nos resultados apresentados na Tabela 9, foi estimado o intervalo de confiança por amostra, por hectare e para toda população em análise.

**Tabela 9** Resultados estatísticos do inventário florestal realizado em Juruti Velho-PA

| <b>VOLUME MÉDIO</b>                       | <b>VALORES</b>              |
|-------------------------------------------|-----------------------------|
| Estrato 1                                 | 22,62 m <sup>3</sup>        |
| Estrato 2                                 | 19,76 m <sup>3</sup>        |
| Estrato 3                                 | 24,58 m <sup>3</sup>        |
| Média na população                        | 22,52 m <sup>3</sup>        |
| Valor total na população                  | 2.702.532,65 m <sup>3</sup> |
| Variância da Média Aritmética do estrato1 | 120,99 m <sup>3</sup>       |
| Variância da Média Aritmética do estrato2 | 83,37 m <sup>3</sup>        |
| Variância da Média Aritmética do estrato3 | 206,13 m <sup>3</sup>       |
| Desvio Padrão do estrato 1                | 11,00 m <sup>3</sup>        |
| Desvio Padrão do estrato 2                | 9,13 m <sup>3</sup>         |
| Desvio Padrão do estrato 3                | 14,36 m <sup>3</sup>        |
| Desvio Padrão da População                | 0,73 m <sup>3</sup>         |
| Erro padrão                               | 1,44%                       |
| <b>INTERVALO DE CONFIANÇA (IC)</b>        |                             |
| <b>Por unidade de amostra</b>             |                             |
| 21,0851 m <sup>3</sup> -                  | 23,9580 m <sup>3</sup>      |
| <b>Por Hectare</b>                        |                             |
| 168,6807 m <sup>3</sup> -                 | 191,6641 m <sup>3</sup>     |
| <b>Área do manejo</b>                     |                             |
| 2.530.160,64 m <sup>3</sup> -             | 2.874.904,66 m <sup>3</sup> |
| Valor de t                                | 1,96                        |
| Intensidade Ideal de Amostragem           | 98,14                       |
| Expectativa de Erro (Erro amostral)       | 6,38                        |

## 6.3 BIOMASSA

### 6.3.2 ESTOQUE DE BIOMASSA

De acordo com o inventário florestal realizado pela empresa Florestal Ltda., utilizando a equação desenvolvida pelo INPA para áreas de floresta tropical na Amazônia, estimou-se a biomassa da floresta ombrófila densa de terra baixa em 301,9 ton.  $ha^{-1}$  (tabela 10). Nesta tipologia florestal foi estimado a maior quantidade de biomassa, provavelmente devido à ausência de distúrbios florestais por fogo ou extração seletiva de madeiras. Na floresta de

platô impactada por atividades de extração de madeiras, foi estimado 258,5 ton  $ha^{-1}$ , considerado o menor volume de madeiras na área de estudo. A menor quantidade de biomassa nesta área pode estar relacionada aos impactos da extração ilegal de madeiras ocorridas em anos anteriores nesta área. Em áreas de florestas impactadas pelo fogo, foi estimada 287,8 ton  $ha^{-1}$ , o que sugere que o fogo ocorrido em anos nesta área não afetou significativamente a quantidade de biomassa quando comparado com a floresta sem distúrbios. A média total de biomassa para a área de estudo foi 283,5ton  $ha^{-1}$ , um pouco inferior à média obtida para a região amazônica por Sampaio et al. (2003), estimada em 339,1 ton  $ha^{-1}$  de biomassa da floresta primária e um pouco superior ao valor obtido por Salomão (1974) de  $249,9 \pm 7,8$  ton  $ha^{-1}$ .

O modelo utilizado para estimar o estoque de biomassa na presente pesquisa, foi obtido a partir de teste de modelos estatísticos para floresta de terra-firme sobre platôs de latossolo amarelo. O modelo escolhido foi consistente nas simulações com  $n = 300$ ,  $n = 200$ ,  $n = 100$  e  $n=50$ , com desvios de +1,2% (0,4 e 1,6, menor e maior desvio, em valores absolutos), +3,1% (1,1 e 13,7), +3,8% (0,8 e 20,3) e - 4,8% (0,4 e 19,4), respectivamente. De um modo geral, o modelo superestima o peso das menores classes de diâmetro, porém para grandes inventários para estimativa de biomassa é o mais preciso, como é o caso do presente estudo, de acordo com a metodologia desenvolvida por Higuschi et al. (1988).

Os resultados de estoque de biomassa obtidos para a floresta ombrófila de terra baixa (FOTB), floresta de platô degradada por extração de madeira (FP-DEM) e floresta de platô degradada por extração de madeira e uso do fogo (FPDMF) são mostrados na tabela 10.

**Tabela 10** Resultados de estoque de Biomassa

|                                                          | <b>FOTB</b> | <b>FPDEM</b> | <b>FPDMF</b> | <b>Total</b> |
|----------------------------------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>DAP <math>\geq 5</math> e <math>&lt; 20</math> cm</b> |             |              |              |              |
| Soma (ton)                                               | 18,13075    | 13,04692     | 86,41375     | 117,5914     |
| Média (ton/ha)                                           | 145,0459    | 52,1876      | 98,7585      | 98,6640      |
| <b>DAP <math>\geq 20</math> cm</b>                       |             |              |              |              |
| Soma (ton)                                               | 1906,306    | 1957,836     | 4877,905     | 8742,047     |
| Média (ton/ha)                                           | 305,009     | 265,4693     | 297,8873     | 289,4552     |
| <b>DAP <math>\geq 5</math> cm (Total)</b>                |             |              |              |              |
| Média (ton/ha)                                           | 301,8725    | 258,4765     | 287,7866     | 283,5084     |

## **6.4 INDICES DE VEGETAÇÃO**

Os índices de vegetação foram derivados da imagem Landsat-5 TM utilizada neste estudo, a partir da aplicação de suas respectivas equações. A partir das imagens correspondentes aos índices de vegetação, foi estimado o valor médio do índice de vegetação para cada parcela, transecto e divisão de transecto, inventariados em campo:

As correlações foram feitas a partir dos valores médios de cada índice de vegetação (NDVI, EVI, SAVI, MSAVI, MSAVI af e SR) utilizado nesta análise, comparando com o estoque de biomassa de cada parcela inventariada em campo. Dessa forma, foi possível observar o índice mais apropriado para estimar as variáveis dendrométricas coletadas em campo por sensoriamento remoto. A média obtida para todas as análises de estimativa é de 283,5 ton/ha.

As figuras 10-a) a f) mostram a área de estudo refletida por cada índice de vegetação utilizado nesse estudo. Os índices NDVI, EVI, SAVI, MSAVI e MSAVI af apresentam os valores de reflectância de 0 a 1, sendo que os índices que apresentaram melhor correlação com o estoque de biomassa foram o EVI, e o MSAVI af respectivamente, e o que apresentou menor relação foi o NDVI. O índice SR apresentam os valores de reflectância maiores do que 1, ou seja, há uma maior variância. Segundo Huete et al. (1997) o índice de vegetação EVI permite um melhor monitoramento da vegetação através da redução de substrato do dossel e da influência da atmosfera, e ainda o NDVI é mais sensível à presença de clorofila e outros pigmentos responsáveis pela absorção da radiação solar na banda do vermelho, enquanto que o EVI é mais sensível à variação da estrutura do dossel (LAURENTINO, 2011). A maior sensibilidade a alterações de dossel do índice EVI é observada em outros trabalhos (HUETE et al., 2002), inclusive sendo mais apropriado para florestas de alta densidade, como é o caso do presente estudo, o qual se trata de uma floresta ombrófila densa. O MSAVI\_af apresentou a maior correção com os dados medidos em campo, provavelmente devido aos seus os menores efeitos atmosféricos, especialmente na região de estudo que apresenta grande quantidade de cobertura de nuvens ao longo do ano.

### **6.4.1 ESTIMATIVA POR PARCELA**

As análises de regressão feitas entre o estoque de biomassa e os índices de vegetação podem ser observadas da tabela 11, onde foi feita a análise de regressão considerando as 250 parcelas inventariadas. Nesta análise observou-se que os índices EVI e MSAVI\_af apresentam maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e menor erro padrão da média (SXY) comparados com o estoque de biomassa (ton/ha), respectivamente.



Através da figura 6, é possível visualizar a distribuição de resíduos, além do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e da equação gerada para cada índice.

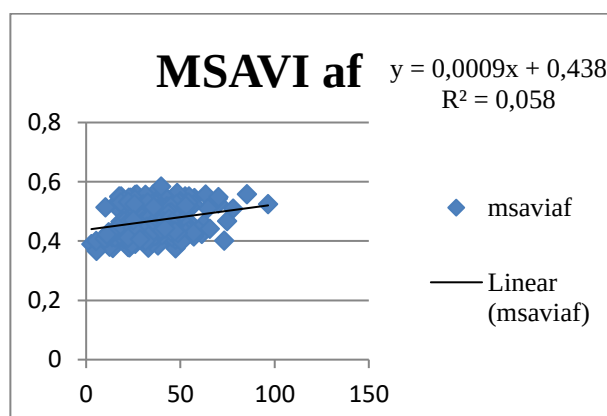
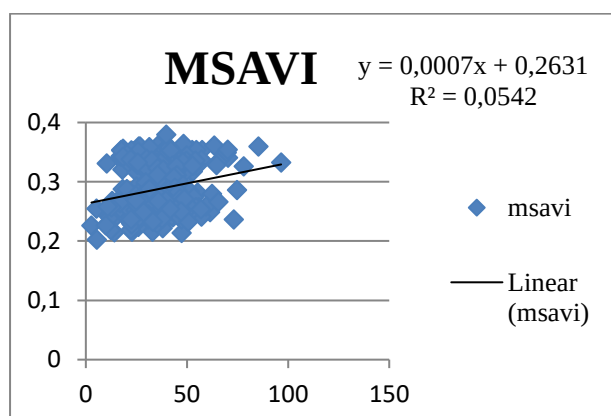
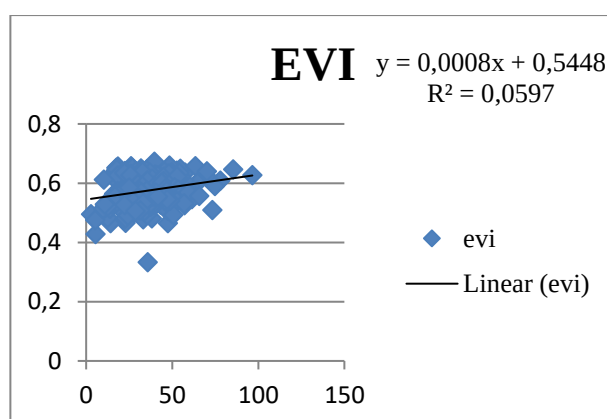
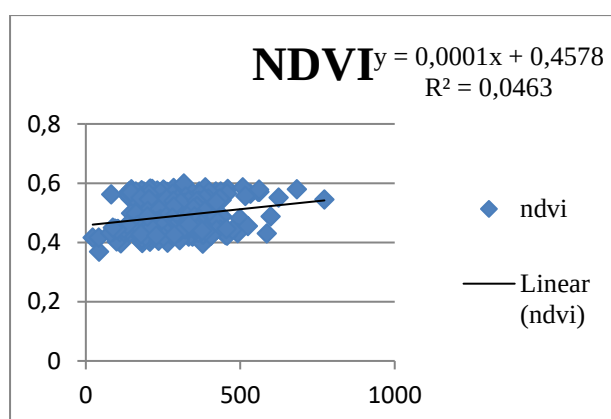
**Tabela 11** Estimativas dos parâmetros do modelo ajustado ( $\beta_0$  e  $\beta_1$ ); erro absoluto (SXY); erro relativo (SXY%) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para os índices analisados individualmente por parcela

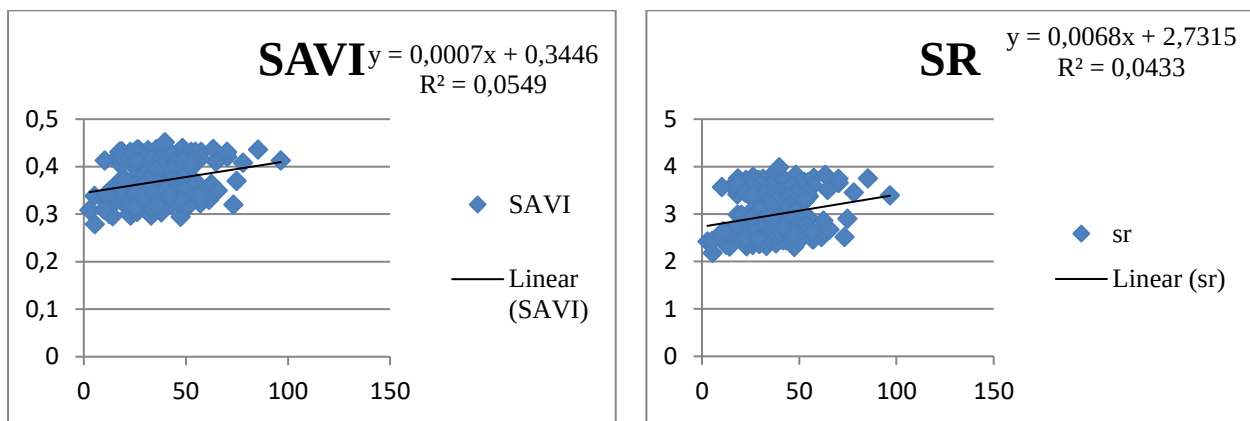
|                             | NDVI     | EVI      | SAVI     | MSAVI    | MSAVIaf  | SR       |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b><math>\beta_0</math></b> | 75,61625 | -43,4008 | 43,42077 | 101,6186 | 28,63518 | 131,6385 |
| <b><math>\beta_1</math></b> | 425,4548 | 568,9154 | 651,6568 | 632,8984 | 544,3214 | 51,10807 |
| <b>SXY</b>                  | 117,0758 | 116,2495 | 116,5503 | 116,5915 | 116,3574 | 117,2634 |
| <b>SXY%</b>                 | 41,29535 | 41,0039  | 41,11001 | 41,12454 | 41,04196 | 41,36153 |
| <b><math>R^2</math></b>     | 0,04633  | 0,059744 | 0,054872 | 0,054203 | 0,057998 | 0,043271 |

A partir da análise dos resultados dos cinco índices (NDVI, EVI, SAVI, MSAVI e MSAVI\_af) utilizados neste estudo, com o mesmo campo de variação (0-1), foi conduzido a modelagem utilizando os dois índices com maior correlação com os valores de biomassa estimados em campo e também foi utilizado o índice com menor correlação, a fim de ponderar o peso de cada índice, resultando numa maior robustez da equação, se comparado aos índices analisados individualmente. O resultado da modelagem dos índices é mostrado na tabela 12, onde é possível verificar o  $R^2$  muito baixo, não sendo confiável a estimação considerando todas as 250 amostras, devido ao alto grau de heterogeneidade entre elas, típico de florestas tropicais.

**Tabela 12** Estimativas dos parâmetros do modelo ajustado; erro absoluto (SXY); erro relativo (SXY%) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para os índices analisados por amostra.

| EVI <sup>2</sup> * MSAVIaf * NDVI |          |
|-----------------------------------|----------|
| INTERSEÇÃO                        | 309,7706 |
| EVI <sup>2</sup> *MSAVIaf         | 1243,793 |
| NDVI                              | -457,688 |
| SXY                               | 116,4239 |
| SXY%                              | 41,06541 |
| R <sup>2</sup>                    | 0,060724 |





**Figura 6.** Análise de regressão de índices de vegetação com o estoque de biomassa por parcela

#### 6.4.2 ESTIMATIVA POR TRANSECTO

Numa análise mais geral, foi correlacionado os dados dos índices de vegetação de cada transecto (14 transectos com as 250 parcelas inventariadas dentro deles) com o estoque de biomassa (ton/ha) estimado em campo (Tabela 13). Nesta análise os índices EVI e SAVI apresentam maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e menor erro (SXY) com o estoque de biomassa (ton/ha), respectivamente.

**Tabela 13** Estimativas dos parâmetros do modelo ajustado ( $\beta_0$  e  $\beta_1$ ); erro absoluto (SXY); erro relativo (SXY%) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para os índices analisados individualmente por transecto.

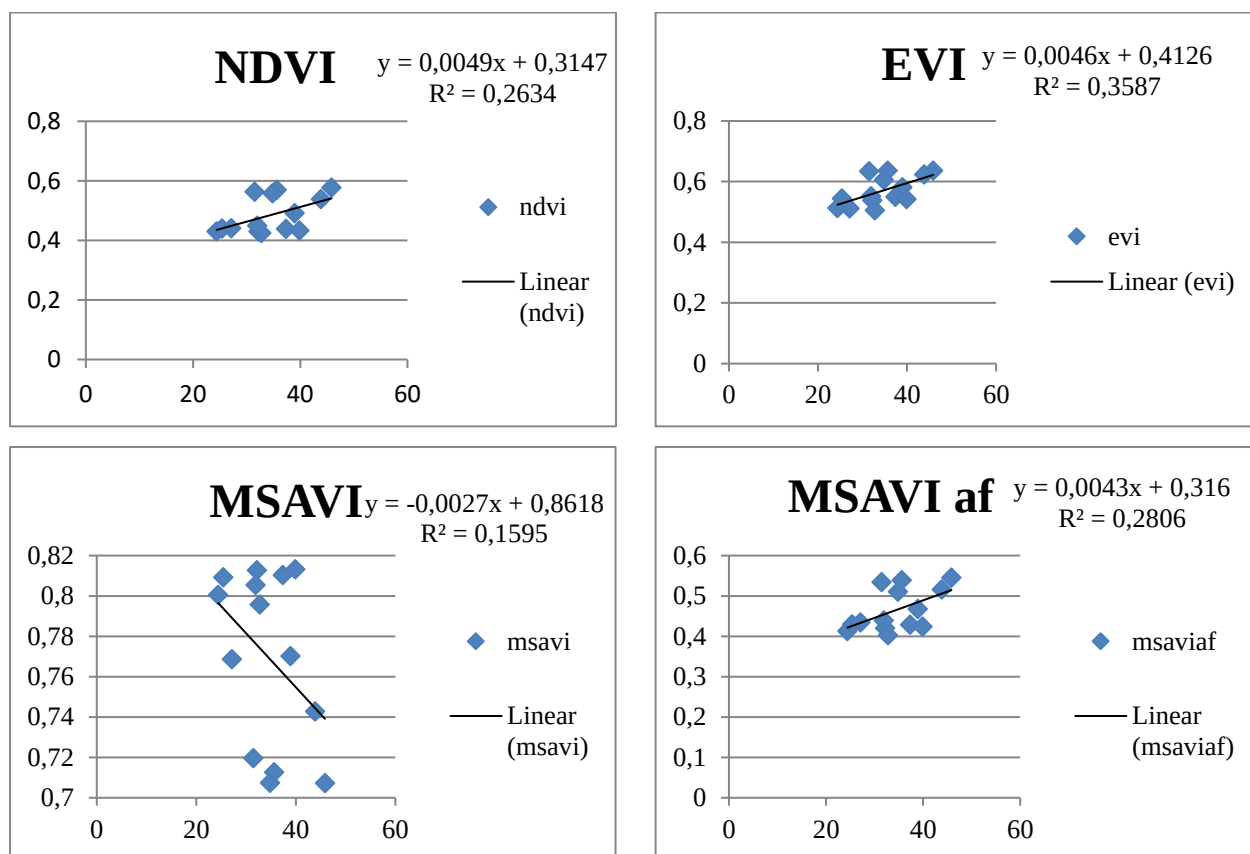
|                             | NDVI     | EVI      | SAVI     | MSAVI    | MSAVIaf  | SR       |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b><math>\beta_0</math></b> | 68,55379 | -82,6699 | 45,5938  | 103,0436 | 34,1442  | 123,8748 |
| <b><math>\beta_1</math></b> | 426,4236 | 628,1344 | 628,6941 | 605,1768 | 518,5518 | 51,3970  |
| <b>SXY</b>                  | 45,9480  | 42,8721  | 45,3146  | 45,6228  | 45,4070  | 46,3434  |
| <b>SXY%</b>                 | 16,2069  | 15,1220  | 15,9835  | 16,0922  | 16,0161  | 16,3464  |
| <b><math>R^2</math></b>     | 0,26338  | 0,358703 | 0,283551 | 0,273771 | 0,280624 | 0,250649 |

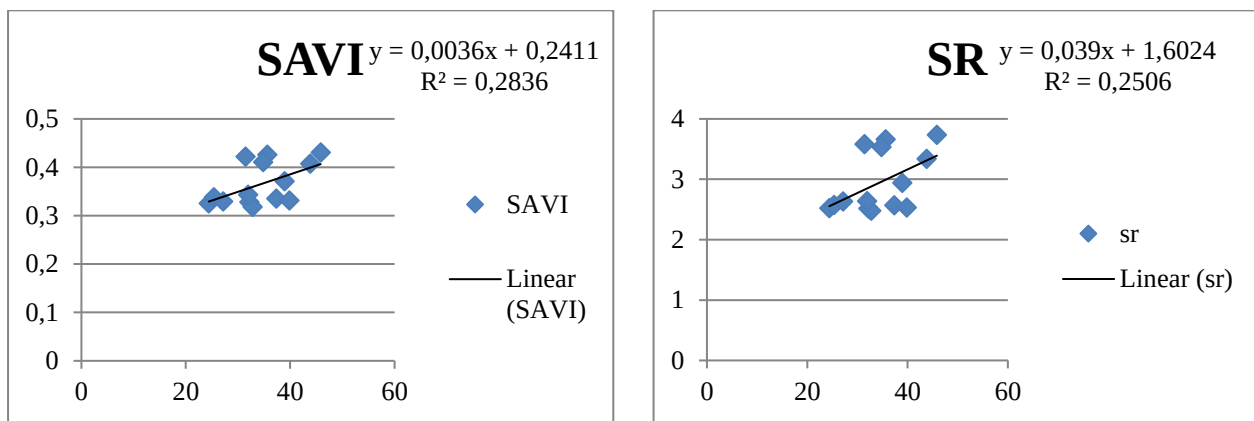
A partir dos dados apresentados na tabela 14, observa-se que os índices: EVI, SAVI (maior correlação) e NDVI (menor correlação), com mesmo campo de variação (0-1), quando modelados conjuntamente, apresentaram maior correlação e menor erro. Nesse caso o índice SAVI se mostra mais sensível aos resultados, se comparado ao MSAVIaf, devido a generalização dos dados, gerando uma maior homogeneização, sendo, portanto, o solo uma variável mais relevante do que o efeito atmosférico nessa análise.

**Tabela 14.** Estimativas dos parâmetros do modelo ajustado; erro absoluto (SXY); erro relativo (SXY%) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para os índices analisados conjuntamente por transecto.

| EVI <sup>2</sup> * SAVI * NDVI |              |
|--------------------------------|--------------|
| INTERSEÇÃO                     | 507,7590876  |
| EVI <sup>2</sup> *MSAVIaf      | 2865,794561  |
| NDVI                           | -1199,014796 |
| SXY                            | 43,95267     |
| SXY%                           | 15,50313     |
| R <sup>2</sup>                 | 0,382139     |

A Figura 8 apresenta mais detalhes dos resultados da análise de correlação entre os diversos índices de vegetação utilizados neste estudo e o estoque de biomassa por transectos adotados neste estudo.





**Figura 7** Análise de regressão de índices de vegetação com o estoque de biomassa por transecto

#### 6.4.3 ESTIMATIVA POR DIVISÃO DO TRANSECTO

Buscando reduzir a generalização observada na análise por transectos, e reduzir a heterogeneidade observada na análise por amostras, foram agrupadas amostras de 3 a 5 unidades, dentro do mesmo tipo de floresta e do mesmo transecto. Isso resultou em 62 unidades amostrais para a análise por divisão do transecto. Os resultados da análise por transecto, comparando o estoque de biomassa (ton/ha) e os índices de vegetação estão apresentados na Tabela 15. Nessa análise, observou-se resultados intermediários às estimativas anteriores deste estudo. Os resultados da análise de mostram que os índices EVI e MSAVIaf apresentam maior correlação ( $R^2$ ) e menor erro (SXY) com o estoque de biomassa (ton/ha), respectivamente.

**Tabela 15.** Estimativas dos parâmetros do modelo ajustado ( $\beta_0$  e  $\beta_1$ ); erro absoluto (SXY); erro relativo (SXY%) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para os índices analisados individualmente por divisão do transecto.

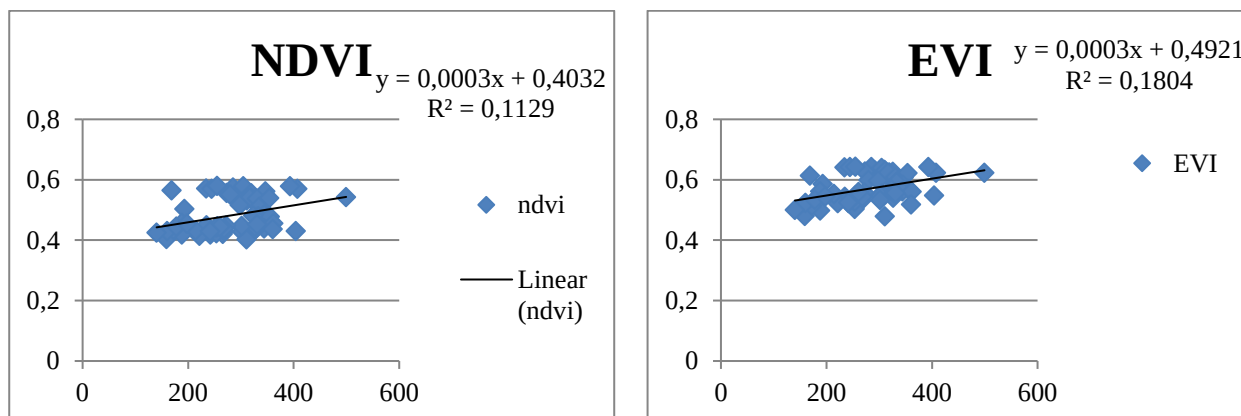
|                             | NDVI     | EVI      | SAVI     | MSAVI    | MSAVIaf  | SR       |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b><math>\beta_0</math></b> | 88,95111 | -86,1669 | 59,46042 | 115,3994 | 44,20306 | 144,5916 |
| <b><math>\beta_1</math></b> | 402,9775 | 647,1584 | 614,9615 | 594,3175 | 517,1993 | 47,54488 |
| <b>SXY</b>                  | 66,80798 | 64,2165  | 66,1065  | 66,20127 | 65,81989 | 67,24709 |
| <b>SXY%</b>                 | 23,57068 | 22,65637 | 23,32318 | 23,35662 | 23,22206 | 23,7256  |
| <b><math>R^2</math></b>     | 0,112948 | 0,180431 | 0,131478 | 0,128986 | 0,138993 | 0,101249 |

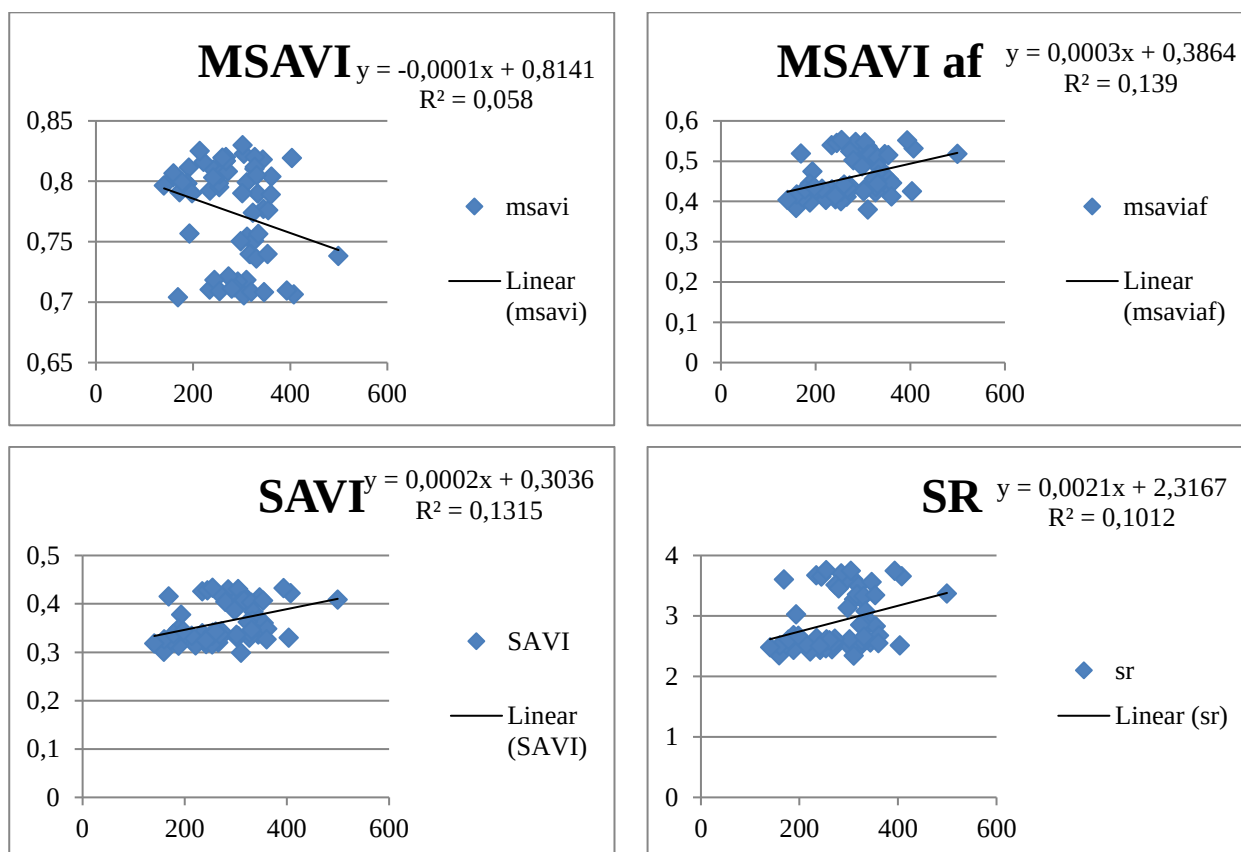
A partir dos resultados apresentados na Tabela 18, observa-se que a modelagem utilizando os três índices (NDVI, EVI e MSAVI af), com mesmo campo de variação (0-1), e analisados conjuntamente, apresentaram coeficiente de determinação relativamente superior e erro similar aos índices analisados individualmente, comparado com os resultados das análises anteriores deste estudo.

**Tabela 16.** Estimativas dos parâmetros do modelo ajustado; erro absoluto (SXY); erro relativo (SXY%) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para os índices analisados conjuntamente por divisão do transecto.

| <b>EVI<sup>2</sup> * MSAVI af * NDVI</b> |            |
|------------------------------------------|------------|
| <b>INTERSEÇÃO</b>                        | 459,8559   |
| <b>EVI<sup>2</sup> *MSAVIaf</b>          | 2062,7641  |
| <b>NDVI</b>                              | -1025,6582 |
| <b>SXY</b>                               | 64,5259    |
| <b>SXY%</b>                              | 22,7655    |
| <b>R<sup>2</sup></b>                     | 0,18630494 |

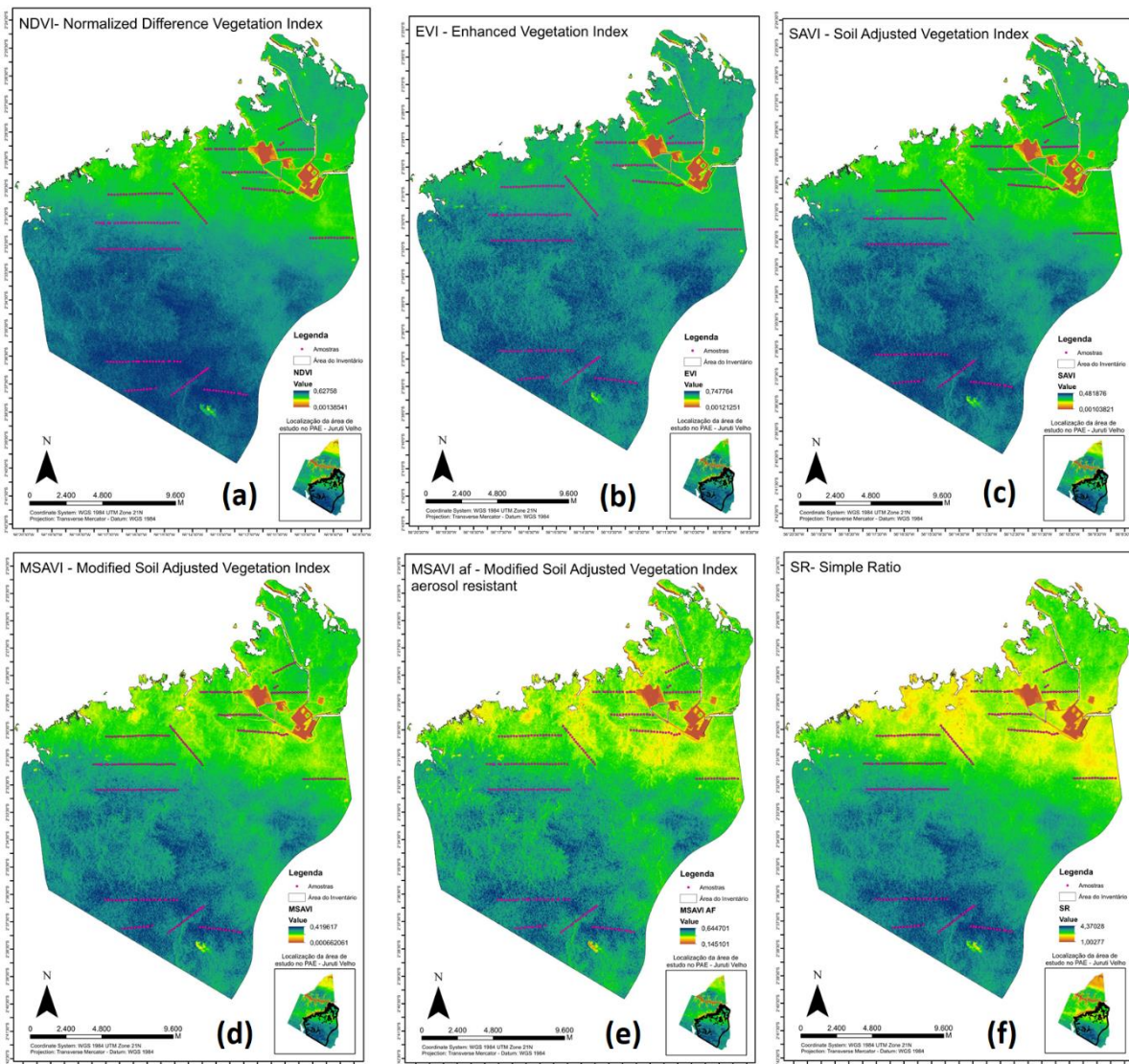
A Figura 9 apresenta mais detalhes dos resultados da análise de correlação entre os diversos índices de vegetação utilizados neste estudo e a quantidade de biomassa por transectos adotados neste estudo.





**Figura 8** Análise de regressão de índices de vegetação com o estoque de biomassa por divisão do transecto

A partir da figura 10 é possível observar visualmente os índices “b” e “e” que melhor apresentam correlação com a biomassa, é possível inferir da imagem que na parte centro-sul eles penetram a atmosfera de forma similar, no entanto, o EVI (b) é constante nas variações que o MSAVI\_af (e). É possível observar também que na parte centro-norte da área de estudo, os três primeiros índices (NDVI, EVI e SAVI) apresentam comportamento semelhante, ou seja variam menos em relação aos outros índices (MSAVI, MSAVI\_af e SR). Assim, conclui-se que para estimar biomassa em fitofisionomias de florestas tropicais através de índices de vegetação, é necessário que se escolha aqueles prioritariamente sensíveis à arquitetura do dossel florestal e que sejam eficientes para eliminar efeitos atmosféricos.

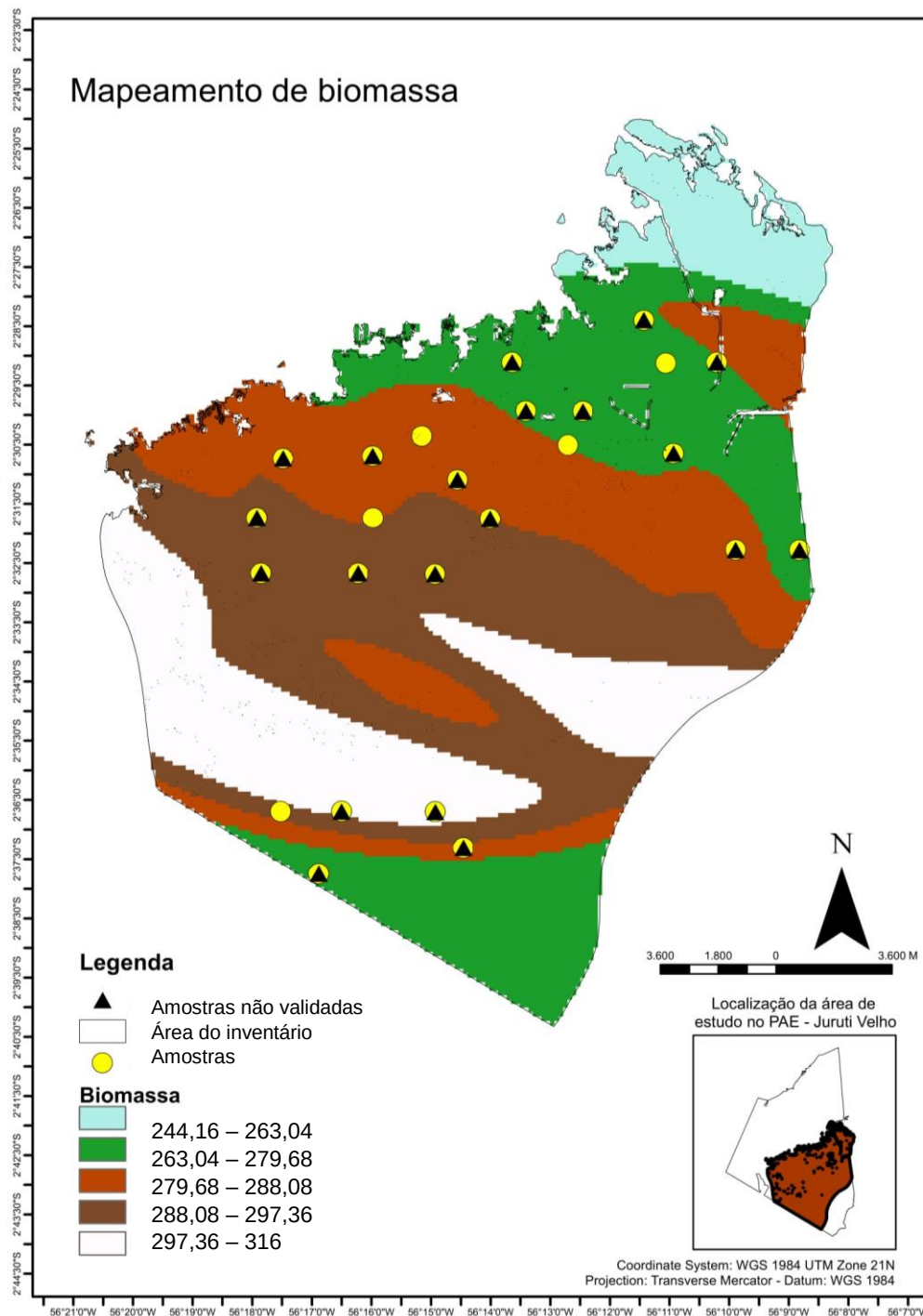


**Figura 9** Índice de vegetação- NDVI ajustado para a área de estudo (a); Índice de vegetação- EVI ajustado para a área de estudo (b); Índice de vegetação- SAVI ajustado para a área de estudo (c); Índice de vegetação- MSAVI ajustado para a área de estudo (d); Índice de vegetação- MSAVIaf ajustado para a área de estudo (e) e Índice de vegetação- SR ajustado para a área de estudo (f).

#### 6.4 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA BIOMASSA NA ÁREA DE ESTUDO

A distribuição espacial da biomassa (Figura 11) na área de estudo foi feita a partir da interpolação geoestatística, utilizando a técnica de krigagem. Foi utilizado dado do estoque de biomassa (ton/ha) de cada uma das 25 parcelas do inventário florestal.



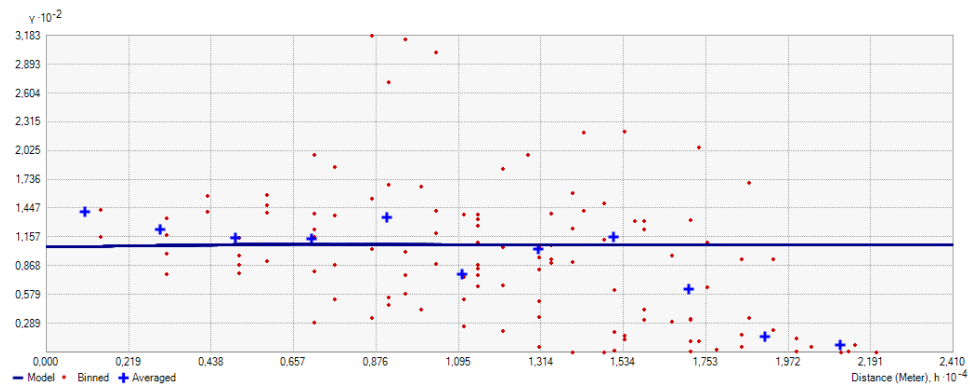


**Figura 10** Mapeamento de biomassa (ton/ha) da área de estudo

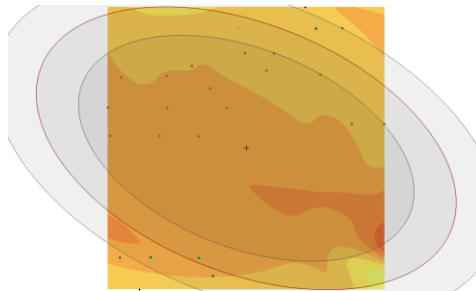
O semivariograma apresenta duas vertentes principais de diagnóstico, a primeira mostra a correlação entre as unidades amostradas (Duarte, 2000). A segunda parte do semivariograma mostra o potencial de caracterização da estrutura de continuidade espacial da característica avaliada (Scolforo e Mello, 2006).

A partir dos resultados do semivariograma (figura 12), observou-se que há uma grande tendência à constância dos dados de biomassa medidos em campo. Neste caso, houve um

efeito de crescimento da curva e posteriormente ocorreu a estabilização da covariância. De acordo com LANDIM et al. (2002) quando os dados apresentam uma tendência regionalizada, à anisotropia deve ser incorporada ao processo de interpolação.

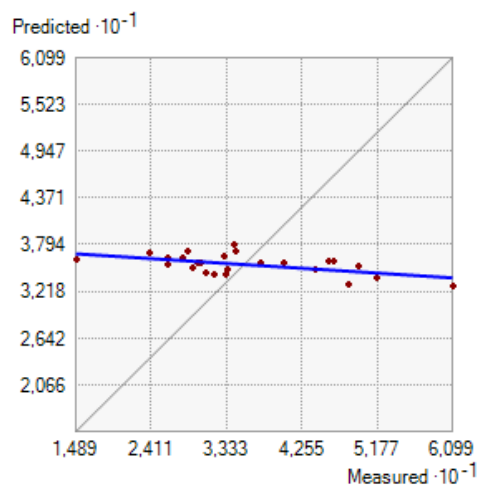


**Figura 11** Semivariograma gerada para a krigagem de estoque de biomassa (ton/há)



**Figura 12** Processo aleatorizado para krigagem

Ao realizar o processo aleatorizado de krigagem (figura 13) é possível observar que os pontos apresentam uma tendência de aproximação de valor de acordo com a distância, desta forma, foram escolhidos 5 pontos aleatórios dentre os 25 para validar o mapeamento da biomassa.



**Figura 13** Erro padrão para o método de Krigagem

**Tabela 17** Análise estatística para o método de Krigagem

|                                     |                      |
|-------------------------------------|----------------------|
| <b>Função gerada pela regressão</b> | -0,0990 * x + 3,5154 |
| <b>Estatística</b>                  |                      |
| <b>Amostras</b>                     | 25                   |
| <b>Média</b>                        | -0,0652              |
| <b>Erro médio padrão</b>            | 10,8450              |

Para validar o processo de interpolação dos dados de biomassa, foram escolhidas 5 parcelas sorteadas aleatoriamente para comparar com os dados interpolados. O resultado da comparação da biomassa estimada e seus respectivos erros são apresentados na tabela 17.

**Tabela 18** Tabela de validação de krigagem para estimativa de biomassa (ton) em Juruti Velho-PA

| <b>Amostra</b>       | <b>Biomassa real</b> | <b>Biomassa predita</b> | <b>Erro</b> | <b>Erro padronizado</b> |
|----------------------|----------------------|-------------------------|-------------|-------------------------|
| 1                    | 265,8472             | 273,5448                | 7,6976      | 10,67                   |
| 5                    | 352,9128             | 284,94                  | -67,973     | 10,65                   |
| 16                   | 370,8568             | 294,6416                | -76,215     | 10,69                   |
| 18                   | 275,3672             | 293,28                  | 17,9128     | 10,13                   |
| 20                   | 413,3144             | 284,94                  | -128,37     | 10,7                    |
| <b>Total</b>         | 1678,2984            | 1431,3464               | -246,95     | 52,84                   |
| <b>Média</b>         | 335,6596             | 286,2692                | -49,39      | 10,568                  |
| <b>Desvio Padrão</b> | 63,395               | 8,4364                  | 61,425      | 0,2456                  |

Conforme é mostrado na tabela 18, é possível observar que a média do erro padrão observado é de 10,56 ton ha<sup>-1</sup>.

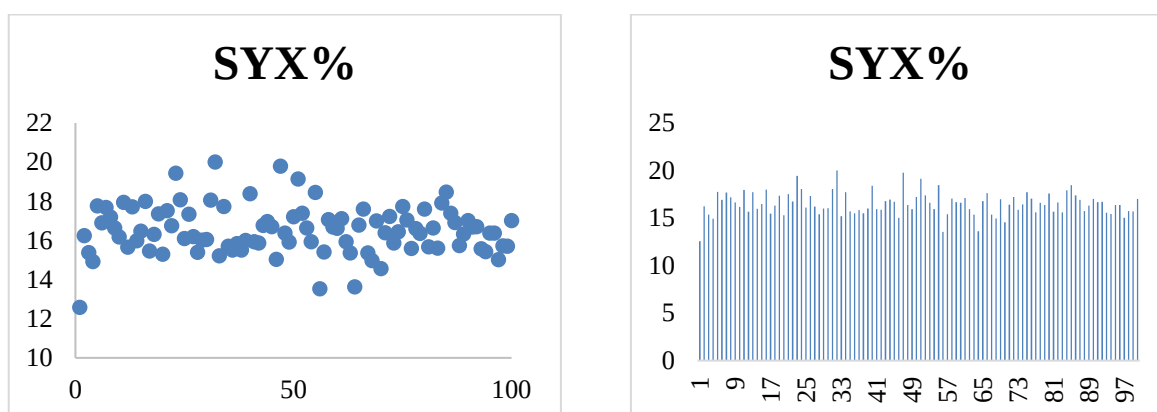
## 6.5 REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS

Os resultados da implementação de modelos baseados em redes neurais e dados de sensoriamento remoto para estimar a biomassa de florestas tropicais na região de Projeto de Assentamento Agroextrativista (PAE) no município de Juriti Velho, estado do Pará, são apresentados na tabela 19. Com base nesses resultados, os estoques de biomassa estimados pelas RNA's tiveram alto grau de exatidão, sendo o coeficiente de determinação 82,39%, ou

seja, 64% maior do que a estimativa feita apenas com a modelagem dos índices de vegetação, e o erro relativo obtido foi de 12,58%. Tal resultado implica dizer que houve ampliação de 10% da correlação da biomassa estimada em campo com os valores dos índices estimados para as mesmas áreas, com auxílio das redes neurais artificiais.

Segundo um trabalho com redes neurais artificiais para mapeamento de biomassa de floresta ombrófila densa de Schoeninger (2006), os melhores resultados com o emprego de RNA apresentaram um erro percentual médio, em relação às amostras de verificação, de 3,73% para a biomassa, enquanto a melhor equação de regressão linear apresentou erros padrão da estimativa da ordem de 29,8%, apresentando uma redução de 26%.

Segundo Foody et al. (2001) a biomassa de florestas tropicais estimadas no nordeste de Bornéu, utilizando imagens do Landsat 5 TM, foi obtido através do sensoriamento remoto e das técnicas de RNA, uma correlação de 80%, similar ao presente estudo.



**Figura 14** Gráficos de erros para as RNA's

**Tabela 19** Estatística da RNA 1

| RNA | SYX     | SYX%    | R <sup>2</sup> |
|-----|---------|---------|----------------|
| 1   | 35,6626 | 12,5822 | 0,8239         |

A partir dos dados treinados, selecionou-se a rede neural que melhor estimou a biomassa, sendo esta a RNA 1. Em seguida, foi feita a validação dos resultados com 30% dos dados, e conforme mostra a tabela x e y, é possível observar a diferença agregada de - 3,30%, um valor baixo, ou seja, este modelo está subestimando a biomassa da floresta tropical e 3,3%, sem os dados de campo, apenas com os índices de vegetação associado as redes neurais artificiais. Segundo Machado (2008), a diferença agregada (DA) é uma forma de estatística

muito utilizada no passado como índice para ajuste de modelos, e esta serve como critério indicador de sub ou superestimativas, esta é usada para uma melhor visualização dos resultados, onde o somatório dos valores observados é relativizado.

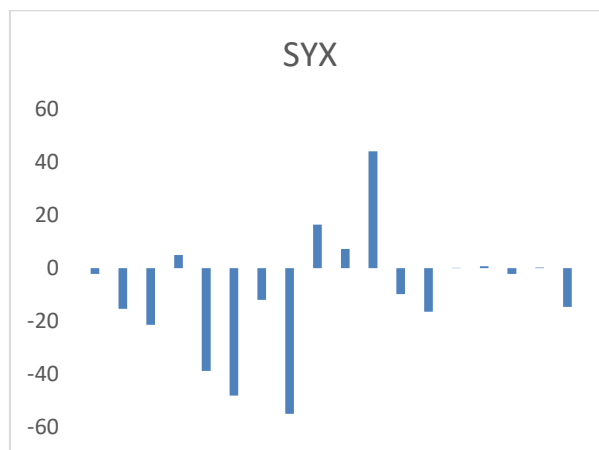
**Tabela 20** Validação da RNA

| Amostra       | Tipo | Biomassa/ha real | Biomassa/ha predita | SYX      |
|---------------|------|------------------|---------------------|----------|
| 4             | 1    | 284,8441         | 286,9968            | -2,1527  |
| 11            | 2    | 279,6891         | 295,0689            | 15,3798  |
| 14            | 2    | 168,7357         | 190,1421            | 21,4065  |
| 16            | 3    | 325,6738         | 320,6927            | 4,9810   |
| 17            | 3    | 318,8528         | 357,6246            | 38,7718  |
| 18            | 3    | 316,5965         | 364,7459            | 48,1494  |
| 21            | 3    | 353,6167         | 365,6081            | 11,9915  |
| 26            | 3    | 332,8233         | 387,8885            | 55,0652  |
| 28            | 3    | 323,3355         | 306,9044            | 16,4310  |
| 30            | 3    | 304,9052         | 297,5964            | 7,3088   |
| 31            | 3    | 327,4529         | 283,3203            | 44,1325  |
| 33            | 3    | 191,4565         | 201,2043            | -9,7478  |
| 34            | 3    | 234,5488         | 250,9956            | 16,4469  |
| 44            | 2    | 158,8869         | 158,8827            | 0,0041   |
| 45            | 2    | 310,3682         | 309,6803            | 0,6878   |
| 49            | 2    | 301,6235         | 303,7668            | -2,1433  |
| 52            | 3    | 159,954          | 159,7383            | 0,2156   |
| 55            | 3    | 213,8768         | 228,4897            | 14,6129  |
| Total         |      | 4907,24          | 5069,346            | 281,541  |
| Média         |      | 272,6245         | 281,6304            | 15,64117 |
| Desvio Padrão |      | 66,00627         | 70,06742            | 19,0563  |

**Tabela 21** Estatística da Validação da RNA

| SYX      | SYX %    | DA (%)   |
|----------|----------|----------|
| 26,55443 | 9,740295 | -3,30342 |

A média da biomassa estimada para as amostras de validação foi de 264,62 ton ha<sup>-1</sup>, e para as estimadas com redes neurais artificiais foi de 281, 63 ton ha<sup>-1</sup>, é possível observar também, a partir da figura 14, a distribuição dos erros nas amostras validadas, onde a maior subestimação foi de 55,06 ton ha<sup>-1</sup>, e a de menos subestimação foi de 0,0041 ton ha<sup>-1</sup>, e a média do erro é de 26,55 ton ha<sup>-1</sup>, ou seja 9,7% de superestimação do estoque de biomassa por amostra.



**Figura 15** Erro relativo da validação

## 7CONCLUSÃO

A média da biomassa estimada para área do presente estudo foi de 283,5 ton há<sup>-1</sup> a partir de dados de inventário florestal conduzidos em áreas de florestal ombrófila tropical.

A estimativa de estoque de biomassa para a área de estudo utilizando dados de sensoriamento remoto é muito promissora. O EVI e o MSAVI af apresentaram maior correlação e menores erros de estimativa de biomassa, comparado com dados de campo. A menor correlação e o maior erro foram observados para o SR e o NDVI.

Complementarmente, as estimativas da biomassa a partir de dados de sensoriamento remoto utilizando como referência de campo as parcelas (250), transectos (14) e divisão dos transectos (62), conclui-se que os melhores resultados para a estimativa da biomassa podem ser alcançados utilizando índices de vegetação e redes neurais artificiais de forma conjunta. Neste caso, o uso dos dados com a divisão dos transectos apresentou resultados intermediários, porém mais robusto e mais confiáveis. As análises utilizando como referência os dados por transectos foram muito genéricos e a análise por parcela muito heterogênea, levando a um valor alto de erro e baixa correlação.

A partir da validação feita com os dados de índices de vegetação aprimorados com redes neurais artificiais, foi obtida a biomassa média com dados de inventário, a qual apresentou o valor de 264,62 ton ha<sup>-1</sup> e a estimada com redes neurais artificiais e sensoriamento remoto foi de 281,63, a qual apresentou um erro relativo de 9,7%, indicando uma subestimativa de 3,3% (diferença agregada).

A estimativa da distribuição espacial a partir da interpolação dos dados mensurados em campo pode ser feita com boa precisão utilizando a técnica Krigagem Ordinária. É possível observar que as maiores concentrações de biomassa são encontradas prioritariamente nas

áreas de floresta de terra baixa, seguida da floresta ombrófila densa submontana degradada por extração de madeira e fogo, e por fim a floresta ombrófila densa submontana degradada por extração de madeira, assim como os resultados obtidos pelos dados de inventário florestal. Os resultados de validação para krigagem mostra que para amostras selecionadas a média da biomassa predita foi de 286,26 ton há<sup>-1</sup>, onde a média da biomassa real era de 335,62 ton há<sup>-1</sup>. E ainda é possível, inferir a partir dos resultados, que apesar da extração de madeira, o uso do fogo incrementou a quantidade de biomassa na floresta de Submontana.

## 8 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AMORIM, D. M.; SILVA, L. S.; SOUSA, L. C. M.; SILVA, N. G. E.; TRINDADE, N. G. P.; CAVALCANTE, T. V. Plano de recuperação de áreas degradadas (PRAD) Alcoa alumínio S/A – Projeto Juruti. Universidade Federal do Pará Altmira, Pará. 43p. 2013.

ANDRIOTTI, J.L.S. Fundamentos de estatística e geoestatística. Editora da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos). Coleção Manual Universitário. São Leopoldo/RS. 1ª reimpressão. 165p. 2005.

ARAÚJO, M. A. T.; BELO, P. S. Grandes Projetos Minerários E Comunidades Tradicionais Na Amazônia: impactos e perspectivas. **Revista Política Pública São Luis**, v. 13, n. 2, p. 265-277. 2009.

ARAUJO, A. C. S. C. Redes Neurais Artificiais para quantificação volumétrica de florestas nativas no Estado de Minas Gerais. Dissertação (Mestre em Ciência Florestal). Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina. 2015.

AURÉLIO, M.; ARAÚJO, T. GRANDES PROJETOS MINERÁRIOS E COMUNIDADES TRADICIONAIS NA AMAZÔNIA : impactos e perspectivas. p. 265–277, 1970.

BARNES, E.M.; T.R. CLARKE; S.E. RICHARDS; P.D. COLAIZZI; J. HABERLAND; M. KOSTRZEWSKI; et al. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. In: **Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture**. 2000.

BERRA, E.F.; PEREIRA, R. S.; BRANDELERO, C. Estimativa de volume florestal com

imagem Landsat 5. **XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Anais. 2011.

BRANDÃO, Z. N.; BEZERRA, M. V. C.; SILVA, B. B. Uso do NDVI para determinação da Biomassa na Chapada do Araripe. **XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 75–81, 2007.

BROWN, S.; GILLESPIE, A. J.; LUGO, A. E. 1989. Biomass estimation methods for tropical forest with applications to forest inventory data. **Forest Science**, 35(4): 881-902.1989

CÂMARA, C.; MONTEIRO, A.M; FUCKS, S.D.; CARVALHO, M.S. Análise espacial de dados espaciais. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE**. São José dos Campos, SP. 2002.

CNEC (Consórcio Nacional de Engenheiros Consultores). Relatório de Impacto Ambiental que integrou o pedido de licença prévia do empreendimento minerário da ALCOA no Município de Juruti, Pará, 2005

CUTLER, M.E.J.; BOYD, D.S.; FOODY, G.M.; VETRIVEL, A. Estimating tropical forest biomass with a combination of SAR image texture and Landsat TM data: an assessment of predictions between regions. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.70, p.66-77, 2012.

DIAS-FILHO, M. B.; ANDRADE, C. M. S. Pastagens no trópico úmido. Belem, PA: **Embrapa Amazonia Oriental**, 30p, 2006.

DUARTE, J.B. Sobre o emprego e a análise estatística do delineamento em blocos aumentados no melhoramento genético vegetal. Piracicaba. Tese de doutorado –Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. 292p, 2000.

FEAMSIDE, Philip M. Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia. National Institute for Research in the Amazon (INPA). C.P. 478, 69011-970 Manaus, Amazonas, Brazil. **Forest Ecology and Management**. p.59-87. 1996.

FERRAZ, Antonio Santana; SOARES, Vicente Paulo; SOARES, Carlos Pedro Boechat;



RIBEIRO, Carlos Antônio Alvares Soares; BINOTI, Daniel Henrique Breda; LEITE, Hélio Garcia. Estimativa do Estoque de Biomassa em um Fragmento Florestal Usando Imagens Orbitais. UFV, Viçosa/MG, Brasil. **Floresta e Ambiente**. 21(3):286-296. 2014.

FERRAZ, A. S. et al. Estimativa do estoque de biomassa em um fragmento florestal usando imagens orbitais. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 3, p. 286–296, 2014.

FERREIRA, Elton Emanuel Costa; VIEIRA, Thiago Almeida; GAMA, João Ricardo Vasconcellos; SOUSA, Luciana Karla Valéria dos Santos. Uso de Produtos Florestais Não Madeireiros em Projeto de Assentamento Agroextrativista na Amazônia. **Espacios**. Vol. 37 (Nº 38) 19p. 2016.

FLATMAN, G.T.; YFANTIS, A.A. Geostatistical strategy for soil sampling: the survey and the census. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.4, p 335-349, 1984.

FLORESTAL-PLANEJAMENTO, PAISAGISMO E CONSULTORIA LTDA. Relatório final- inventário florestal estratificado. 84p.2011.

GAMA Vasconcellos, João Ricardo, Botelho Alvarenga, Soraya, Gama de Matos Bentes, Michelliny, Scolforo Soares, José Roberto. Estrutura e potencial futuro de utilização da regeneração natural de floresta de várzea alta no município de Afuá, Estado do Pará. **Ciência Florestal**. Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 71-82. 2013.

GÖRGENS, Eric Bastos. Estimating tree volume using artificial neural nets. Dissertação (Mestrado em Manejo Florestal; Meio Ambiente e Conservação da Natureza; Silvicultura; Tecnologia e Utilização de) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 94p, 2006.

HEINSDIJK, D.; BASTOS, A.M. Inventários florestais na Amazônia. **Boletim do Serviço Florestal**, 6: 1-100. 1963.

HIGUCHI, N.; SANTOS, J.; RIBEIRO, R. J.; MINETTE, L. & BIOT, Y. Biomassa da parte aérea da vegetação da floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia brasileira. **Acta Amazônica** 28(2): 153-166. 1998.

HIGUCHI, N.; SANTOS, J. dos; RIBEIRO, J. R.; MINETTE, L.; BIOT, Y. Biomassa da parte aérea da floresta tropical úmida de terra firme da Amazônia Brasileira. **Acta Amazonica**, 28 (2):153-166. 1998a.

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**, n. 83, p. 195-213, 2002.

HUETE, A.R.; LIU, H.Q.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, n. 3, p. 440-451, 1997.

HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. Catálogo de Imagens. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>

Instituto de Desenvolvimento Econômico, Social e Ambiental do Pará - IDESP. Estatística Municipal: Aspectos Físico-Territoriais de Juruti 2011. Disponível em <http://www.idesp.pa.gov.br/paginas/produtos/EstatisticaMunicipal/pdf/Juruti.pdf>.

IPCC – INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGES. Land use, land use change, and forestry special report. Summary for Policymakers. Based on WATSON, R et al. as Core Writing Team. Montreal. 2000.

JENSEN, J. R. Sensoriamento Remoto do Ambiente. Tradução de José Carlos Neves Epiphânio; Antonio Roberto Formaggio, et al. 2a. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

JORDAN, C. F. Derivation of leaf area index from quality of light on the Forest floor. **Ecology**, 50:663-666, 1969.

JOSÉ, P. et al. INVESTIGAÇÃO MULTITEMPORAL DE ILHAS DE CALOR E DE FRESCOR NO CAMPUS DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ- PR

UTILIZANDO IMAGENS DO SATÉLITE LANDSAT5 TM . 2011.

LANDIM, P.M.B; STURARO, J.R; MONTEIRO, R.C. Krigagem ordinária para situações com tendência regionalizada. UNESP/Rio Claro, 12pp. 2002

LASLETT, G.M. Kriging and splines: an empirical comparison of their predictive performance in some applications. J. Am. Stat. Assoc., 89:391-400, 1994.

LEAL, F. A. Estimativa do volume de madeira a partir de dados de sensoriamento remoto e geoestatística aplicados em um povoamento de *Eucalyptusurophylla* S. T. Blake em Rio Verde/Goiás. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais. Universidade de Brasília - UnB, Brasília, DF, 143p. (2012).

LEMOS, A. L. F.; SILVA, J. DE A. Desmatamento na Amazônia Legal: Evolução, Causas, Monitoramento e Possibilidades de Mitigação Através do Fundo Amazônia. Floresta e Ambiente, v. 18, n. 1, p. 98–108, 2011.

LOURENÇO, R. W.; LANDIM, P. M. B. Estudo Da Variabilidade Do “ Índice De Vegetação Por Diferença Normalizada / Ndvi ” Utilizando Krigagem Indicativa Study on the Variability of “ Normalized Difference Vegetation Index / Ndvi ” By Indicative Kriging. Holos Environment, v. 4, p. 38–55, 2004.

MACHADO, A. et al. Modelagem volumétrica para bracatinga (*Mimosa scabrella*) em povoamentos da Região Metropolitana de Curitiba. . n. 1, 1981.

MACHADO, S. do A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 2 ed. Guarapuava: Editora UNICENTRO, 2006, 316 p;

MEIRELES, Leonardo Dias; SHEPHERD, George John; KINOSHITA, Luiza Sumiko. Variações na composição florística e na estrutura fitossociológica de uma floresta ombrófila densa alto-montana na Serra da Mantiqueira, Monte Verde, MG. **Revista Brasil. Bot.**, V.31, n.4, p.559-574, 2008.

MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, M. S. Krigagem e

inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 27, p. 925-933, 2003.

MIGUEL, E. P. et al. Redes neurais artificiais para a modelagem do volume de madeira e biomassa do cerradão com dados de satélite. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 9, p. 829–839, 2015.

MIRANDA, J.F.N. Modelos de regressão e de redes neurais artificiais na quantificação de carbono e biomassa lenhosa em floresta estacional decidual no Brasil Central. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) — Universidade de Brasília, Brasília, 76p, 2015.

MYERS, D.E. Spatial interpolation: an overview. **Geoderma**, 62:17-28, 1994.

Pará (Estado). Governo do Estado. Plano de prevenção, controle e alternativas ao desmatamento do estado do Pará. Belem: MMA / PNUD; 33 p. 2009.

PERCÍLIA, E. "Aspectos naturais do Pará"; Brasil Escola. Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/brasil/aspectos-naturais-para.htm>>. Acesso em 25 de julho de 2017.

ROUSE, J.W. et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: **ERTSSYMPOSIUM**, 3., Washington: NASA, p.309-317. 1973.

SALOMÃO, R.P. Estimativas de biomassa e avaliação do estoque de carbono da vegetação de florestas primárias e secundárias de diversas idades (capoeiras) na Amazônia Oriental, município de Peixe-boi, Pará. Dissertação de Mestrado, UFPA/MPEG, Belém. 53p. 1994.

SAMPAIO, F. A. R., FONTES, L. E. F., COSTA, L. M., JUCKSCH, I., BALANÇO DE NUTRIENTES E DA FITOMASSA EM UM ARGISSOLO AMARELO SOB FLORESTA TROPICAL AMAZÔNICA APÓS A QUEIMA E CULTIVO COM ARROZ. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2003.

SANTANA, S. H. C.; MORAIS, Y. C. B. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.3182. **Anais**

**XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto** - SBSR, n. 2003, p. 3182–3189, 2011.

SARTORI, A. . D. C. et al. Influência do período de estiagem no Índice de Vegetação (NDVI), no município de Botucatu-SP. *Anais*. p25-30, n. 2006, p. 4363–4369, 2009.

SCHOENINGER, E. R. et al. Uso de redes neurais artificiais como uma alternativa para mapeamento de biomassa e carbono orgânico no componente arbóreo de florestas naturais. Artificial neural network use as an alternative to biomass and organic carbon mapping in natural forest trees. **Ambiência**, v. 4, n. 3, p. 529–549, 2008.

SCOLFORO, J.R.S.; MELLO, J.M. de. Inventário Florestal/ José Roberto Soares Scolforo, José Márcio de Mello. Lavras: UFLA/FAEPE, 2006.

SHARMA, T., SUDHA, K.S., RAVI, N., NAVALGUND, R.R., TOMAR, K.P., CHAKRAVARTY, N.V.K., Das, D.K. Procedures for wheat yield prediction using Landsat MSS and IRS-1A data. *Int. J. Remote Sensing* v.14, n.13, p.2509–2518, 1993.

SILVA, V.S.M. Manejo de Florestas Nativas: Planejamento, Implantação e Monitoramento. UFMT – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá-MT, 2006.

SILVA, S. M. A. da, CARVALHO, J. O. P. de, COSTA, D. H. M., TAVARES, M. Diretrizes para Instalação e Medição de Parcelas Permanentes em Florestas Naturais da Amazônia Brasileira, Embrapa Amazonia Oriental. Belem (no prelo)

SILVA, J.; HAMULAK, T. M.; RIBEIRO, S. R. A.. Comparação entre índices de vegetação em imagem landsat 5 – TM. **Anais do Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto** - GEONORDESTE 2014. Aracaju, Brasil, 2014.

SOUSA, C. L.; PONZONI, F. J. Avaliação de índices de vegetação e de bandas TM/Landsat para estimativa de volume de madeira em floresta implantada de Pinus spp. **IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. D, p. 1537–1547, 1998.

TEIXEIRA, A. H. DE C. et al. *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto* - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE. **Anais XVI Simposio**

**Brasileiro de Sensoriamento Remoto** - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, n. 1986, p. 6917–6922, 2013.

THOMPSON, S.K. Sampling. New York: Wiley, 343 p., 1992.

VERÍSSIMO, A. et al. Zoneamento de Áreas para Manejo Florestal no Pará. **O Estado da Amazônia**, v. 8, p. 4, 2006a.

VERÍSSIMO, A et al. Áreas para produção florestal manejada: Detalhamento do macrozoneamento ecológico econômico do Estado do Pará, relatório para o governo do Estado do Pará. Pará, p. 190–300, 2006b.

VERMOTE, E. F.; TANRE, D.; DEUZE, J. L.; HERMAN, M. & MORCRETTE, J. J. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: an overview. **IEEE Trans. Geosc. and Remote Sensing**. 35 (3): 675-686, 1997.

VIEIRA, S.; Estatística Experimental. São Paulo: **Atlas**, (Vol. 2). 1999.

VIEIRA, S. A. et al. Estimation of biomass and carbon stocks: the case of the Atlantic Forest. **Biota Neotropica**, v. 8, n. 2, p. 21–29, 2008.

WATSON, R. T. Land Use, Land-Use Change, and Forestry, 2000. Disponível em: <<http://books.google.com/books?id=EyXQW-gRey0C>>

WATZLAWICK, L. F. Estimativa de biomassa e carbono em floresta ombrófila mista e plantações florestais a partir de dados de imagens do satélite Ikonos II. v. 28, n. 1, p. 120, 2003.

WATZLAWICK, L.F.; KIRCHNER, F.F.; SANQUETTA, C.R. Estimativa de biomassa e carbono em floresta com araucária utilizando imagens do satélite Ikonos II. **Ciência Florestal**, v.19, p.169-181, 2009.

YAMONOTO, J.K. Avaliação e classificação de Reservas Minerais, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo. v 38, 2001.