

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Simulação dos ventos e tomografia de impulso: sinergia na
avaliação do risco de queda de árvores**

Maria Carolina Garutti

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências, Programa: Recursos Florestais
Opção em: Conservação de Ecossistemas
Florestais

**Piracicaba
2015**

**Maria Carolina Garutti
Engenheira Agrônoma**

**Simulação dos ventos e tomografia de impulso: sinergia na avaliação do risco
de queda de árvores**

Orientador:
Prof. Dr. **DEMÓSTENES FERREIRA DA SILVA FILHO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências, Programa: Recursos Florestais
Opção em: Conservação de Ecossistemas
Florestais

**Piracicaba
2015**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Garutti, Maria Carolina

Simulação dos ventos e tomografia de impulso: sinergia na avaliação do risco de queda de árvores / Maria Carolina Garutti. - - Piracicaba, 2015.

71 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Risco de queda 2. Tomografia de impulso 3. Simulação dos ventos 4. Zonas de turbulência 5. ENVI-met I. Título

CDD 715.2
G243s

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

AGRADECIMENTOS

Aos meus amados guias e mestres, por sempre iluminarem meus passos;

À minha querida mãe, por sempre ter colocado minha educação em primeiro lugar e pela sua presença, ainda que agora em outros planos;

À Mada, pelo seu incondicional apoio e amor;

À Universidade de São Paulo, pela oportunidade;

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, por fazer parte da minha vida desde minha graduação;

Às árvores do Campus, por me ensinarem mais sobre a vida do que qualquer livro e por serem minha grande inspiração;

Ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais, por tanto aprendizado e suporte;

À Capes, pela bolsa de estudos;

Ao meu orientador Prof. Demóstenes Ferreira da Silva Filho, pela oportunidade, pela orientação e pela sincera amizade;

À Giovana Oliveira, pela sua incontável assistência em tantas questões administrativas;

A todos os meus professores, por compartilharem tanto conhecimento comigo;

Ao Laboratório de Métodos Quantitativos, pelos instalações e recursos;

Ao Jefferson Lordello Polizel, por ser o braço direito de todos nós do LMQ;

Ao Flávio Mendes, pela disponibilidade e ajuda;

Ao Serviço de Atividades Internacionais, por possibilitar uma valiosa experiência;

À Marisa Regitano D’Arce, pela amizade e confiança;

A Ib Skovgaard e Grete Bertelsen, por me acolherem tão ternamente e serem agora minha família em terras longínquas;

A todos os meus amigos, pelas boas risadas e por me ajudarem tanto, em tantos aspectos e em tantos momentos;

A todas as pessoas queridas que cruzaram meu caminho, sempre trazendo algo de bom;

À Dona Laurinda, pela casinha tão perfeita;

Ao Nowak, pela companhia silenciosa e cuidadora, e por sempre fazer valer a pena.

Há tanto para agradecer que somente esta frase de Goethe poderia resumir o que eu gostaria de expressar aqui: “Es würde wenig von mir übrig bleiben wenn ich alles

abgeben müsste was ich andern verdanke”. Infelizmente, qualquer tentativa de tradução ficaria à margem do real significado, assim deixo como está.

Enfim, a todos aqueles e a todas as coisas que fizeram parte direta ou indiretamente do meu caminhar, fica aqui a minha mais sincera e profunda gratidão.

De coração, eu agradeço!

Mais uma árvore tomba,
Tonta,
Ao sabor da ventania.
Desaba
E se acaba.
Terá sido só a ventania
braba?
Uma ventania maldita,
Ou uma outra razão não
dita?
Quem irá chorar por ela?
O João?
A Rita?
Outrora foi bela,
Agora jaz.
E o rapaz
Que gostava dela
Não mais a verá
Quando abrir a sua janela.

Márcio J. Rodrigues

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT.....	11
LISTA DE FIGURAS.....	13
LISTA DE MAPAS.....	15
1 INTRODUÇÃO.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 Árvores em ambientes urbanos.....	19
2.2 Benefícios gerais.....	19
2.3 Riscos associados e avaliação do risco de queda.....	23
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1 Área de estudo.....	25
3.2 Tomografias de impulso.....	27
3.3 Simulação dos ventos.....	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
4.1 Tomografias de impulso.....	41
4.2 Simulação dos ventos.....	52
5 CONCLUSÕES.....	65
REFERÊNCIAS.....	67

RESUMO

Simulação dos ventos e tomografia de impulso: sinergia na avaliação do risco de queda de árvores

Os efeitos ambientais negativos da urbanização podem ser mitigados pela presença de espaços verdes dentro e ao redor das cidades. Os elementos mais valiosos de tais áreas são reconhecidamente as árvores. Entretanto, existem também alguns riscos associados com a sua presença, os quais expressam a possibilidade de queda da árvore ou de seus galhos por perda de resistência biomecânica, resultando em perigo de morte e estragos a propriedades, bens e infraestrutura. Nesse sentido, a tomografia de impulso tem se mostrado como uma técnica bastante eficaz em detectar fragilidades biomecânicas no lenho. Considerando ainda que o vento é a principal força dinâmica atuante na copa das árvores, este estudo se propôs a (a) simular o comportamento dos ventos sobre a região do Parque Zoobotânico do Museu Paraense Emílio Goeldi, localizado em Belém-PA, durante quatro eventos de chuvas e ventos fortes usando o ENVI-met, (b) quantificar a perda de resistência biomecânica através da tomografia de impulso em 12 árvores presentes no referido parque e (c) identificar as árvores que possuem um maior risco de queda. Os modelos gerados pelo ENVI-met foram capazes de mostrar zonas de turbulência atuando sobre a copa das árvores tomografadas, e levando em conta a perda de resistência biomecânica, o Guajará foi identificado como apresentando o maior risco de queda entre todas as árvores estudadas. Concluiu-se que o ENVI-met prestou-se perfeitamente para a identificação de zonas de turbulência atuando na copa das árvores. Uma vez conhecidas essas turbulências e considerando a perda de resistência biomecânica acusada pela tomografia, ações de manejo pontuais podem ser propostas e executadas visando diminuir o risco de queda de árvores por ventos fortes em eventos futuros.

Palavras-chave: Risco de queda; Tomografia de impulso; Simulação dos ventos; Zonas de turbulência; ENVI-met

ABSTRACT

Wind modelling and impulse tomography: synergy in tree risk assessment

Negative environmental effects of urbanization can be mitigated by the presence of green spaces in and around cities. The most valuable elements of such green spaces are considered to be trees. Nonetheless, trees can pose some risks, which encompass the likelihood of mechanical failure of trunk or branches, causing injury to people or damaging buildings and properties. Accordingly, impulse tomography has proven to be a very effective technique in detecting biomechanical weaknesses in the wood. Considering wind as the main dynamic force acting on the tree crown, this study aimed to (a) simulate the behavior of winds over the region of the Goeldi Museum (located in Belém, Pará State, Brazil) during four events of heavy rain and strong winds using the ENVI-met software, (b) quantify the loss of biomechanical resistance for 12 trees located at the Museum and (c) identify trees with high possibility of failure. The models generated by ENVI-met were able to find areas of turbulence influencing the canopy of those trees. Together with the loss of biomechanical resistance, it was possible to identify the Guajará as having the greatest risk of failure among all the analyzed trees. It was concluded that ENVI-met represents a great tool in the identification of turbulence areas that influence trees. Once these areas are identified, and considering the loss of biomechanical resistance given by the impulse tomography, punctual management actions can be proposed and put into action for the sake of reducing risk of failure in future events of strong winds.

Keywords: Biomechanical failure; Impulse tomography; Wind modelling; Turbulence; ENVI-met

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Belém-PA e imagem da área de estudo.....	26
Figura 2 – Localização e identificação das árvores tomografadas.....	29
Figura 3 – ARBOTOM e seção transversal de inserção dos sensores.....	31
Figura 4 – Identificação das copas das árvores que formam o dossel do Parque Zoobotânico.....	33
Figura 5 – Base de dados original referente à vegetação.....	34
Figura 6 – Base de dados proposta e utilizada referente à vegetação.....	35
Figura 7 – Preenchimento dos grids com alturas de construções em metros e identificação da vegetação.....	35
Figura 8 – Gráficos, equações e valores obtidos para o arquivo de configuração para 31/10/2012.....	38
Figura 9 – Gráficos, equações e valores obtidos para o arquivo de configuração para 02/11/2012.....	38
Figura 10 – Gráficos, equações e valores obtidos para o arquivo de configuração para 20/01/2015.....	39
Figura 11 – Gráficos, equações e valores obtidos para o arquivo de configuração para 01/02/2015.....	39
Figura 12 – Arquivos de configuração para as datas escolhidas.....	40
Figura 13 – Quadros de velocidades e diagramas de dispersão para as árvores 1, 2, 3 e 4.....	42
Figura 14 – Quadros de velocidades e diagramas de dispersão para as árvores 5, 6, 7 e 8.....	43
Figura 15 – Quadros de velocidades e diagramas de dispersão para as árvores 9, 10, 11 e 12.....	44
Figura 16 – Imagens tomográficas das árvores 1, 2 e 3.....	46
Figura 17 – Imagens tomográficas das árvores 4, 5 e 6.....	47
Figura 18 – Imagens tomográficas das árvores 7, 8 e 9.....	48
Figura 19 – Imagens tomográficas das árvores 10, 11 e 12.....	49

LISTA DE MAPAS

Mapa 1 – Simulação do vento a 16 metros de altura em 31/10/2012.....	54
Mapa 2 – Simulação do vento a 32 metros de altura em 31/10/2012.....	55
Mapa 3 – Simulação do vento a 16 metros de altura em 02/11/2012.....	56
Mapa 4 – Simulação do vento a 32 metros de altura em 02/11/2012.....	57
Mapa 5 – Simulação do vento a 16 metros de altura em 20/01/2015.....	58
Mapa 6 – Simulação do vento a 32 metros de altura em 20/01/2015.....	59
Mapa 7 – Simulação do vento a 16 metros de altura em 01/02/2015.....	60
Mapa 8 – Simulação do vento a 32 metros de altura em 01/02/2015.....	61

1 INTRODUÇÃO

Apesar dos inúmeros benefícios proporcionados pelas árvores em ambientes urbanos, existe também um risco associado com a sua presença. Certamente que os primeiros mais que compensam os segundos, uma vez que a vida nas cidades se tornaria insensatez sem a presença de árvores. Por risco, suscita a possibilidade de que uma árvore e/ou suas partes, como galhos por exemplo, venham a cair, causando injúrias a pessoas, bens ou construções. Em ambientes naturais como as florestas, a queda de árvores pode ser considerada o motor propulsor da sucessão secundária pois possibilita a abertura de clareiras, sendo inerente ao equilíbrio do sistema. Entretanto, é preciso olhar para esse fato com bastante cuidado quando se trata de árvores em ambientes urbanos, onde as consequências resultantes da queda de uma árvore e/ou de suas partes podem ter implicações um tanto quanto sérias, inclusive num âmbito legal.

As árvores apresentam estruturas bastante complexas de um ponto de vista biomecânico, que respondem tanto a cargas internas quanto externas, e atuam num sentido de manter o equilíbrio e a integridade da árvore como um todo. Não obstante, fragilidades estruturais, muitas vezes ocasionadas por práticas inadequadas de manejo, somadas a condições climáticas adversas, como temporais e ventanias, propiciam a queda da árvore ou de seus galhos. Muitas são as metodologias empregadas na avaliação do risco de queda de árvores, algumas com um enfoque mais quantitativo, e outras com uma abordagem mais qualitativa e subjetiva. Complementando, quando uma avaliação visual da árvore indica a presença de deterioração do lenho, por exemplo cavidades no tronco ou corpos de frutificação de fungos, e se torna necessário saber o estado interno de uma seção do lenho para quantificar a perda de resistência biomecânica, a tomografia de impulso tem se mostrado como uma técnica bastante promissora.

Muitos também são os estudos que se propuseram a explicar como se dá a estabilidade das árvores e a quantificar o efeito dos ventos sobre essa estabilidade, incluindo simulações estáticas e dinâmicas de ventos. Entretanto, a simples identificação de zonas de turbulência nas imediações das copas poderia ser uma ferramenta bastante apropriada para uma avaliação mais cuidadosa do risco de queda de árvores.

Nesse sentido, a identificação dessas zonas de turbulência poderia ser feita através de um software chamado ENVI-Met, por meio de seu componente de simulação do comportamento dos ventos. Este software é bastante utilizado nos estudos de microclima urbano, porém, até onde se tem conhecimento, ainda não foi utilizado com esse intuito, evidenciando o caráter pioneiro e singular deste estudo, que se caracteriza pelo seu feitiço qualitativo.

Assim, a realização desta pesquisa foi motivada pela hipótese de que o modelo gerado pelo ENVI-met é capaz de identificar nuances de ventos que podem influenciar a estabilidade biomecânica das árvores. Uma vez conhecidas essas nuances, a análise do risco de queda pode ser melhor embasada.

Considerando alguns eventos reais de chuvas e ventos fortes que ocorreram na cidade de Belém do Pará no final de 2012 e início de 2015, e ainda, considerando algumas árvores presentes no Parque Zoobotânico do Museu Paraense Emílio Goeldi, os objetivos gerais deste estudo consistem em:

- Simular, através do ENVI-met, o comportamento dos ventos nas proximidades e sobre o Parque Zoobotânico do Museu Paraense Emílio Goeldi, baseando-se em dados de eventos reais ocorridos; e
- Quantificar a perda de resistência biomecânica das árvores através da tomografia de impulso.

Figuram como objetivos específicos:

- Identificar regiões de turbulência nas proximidades das copas das árvores tomografadas;
- Validar as tomografias realizadas;
- Identificar as árvores mais vulneráveis e/ou que apresentam maior risco de queda baseando-se nas imagens tomográficas e na influência das zonas de turbulência.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Árvores em ambientes urbanos

Nos últimos 100 anos, a sociedade humana experimentou uma mudança demográfica dramática resultante de um enorme crescimento na população global e subsequente explosão em urbanização (CARREIRO et al., 2008). À medida que a urbanização continua a desenvolver-se, o que se torna cada vez mais relevante é a qualidade do ambiente urbano (KONIJNENDIJK et al., 2005). 'Ambiente urbano', como em oposição ao termo 'ambiente natural', geralmente transmite a ideia de um ambiente adverso e desfavorável, ou como descrito por Edwards e Gale (2003), um ambiente hostil. Os efeitos ambientais negativos da urbanização podem ser mitigados pela presença de espaços verdes dentro e ao redor das cidades.

Existe um grande debate acerca da definição de espaços verdes urbanos. Nilsson, Konijnendijk e Nielsen (2013) os definem como todos os espaços vegetados presentes áreas urbanas, incluindo parques, matas, jardins, terrenos arborizados, sendo geralmente de caráter público. Randrup et al. (2005) sugerem, através de pesquisa realizada, a inclusão de espaços verdes urbanos em um conceito mais amplo, o de 'floresta urbana', abarcando esta toda vegetação arbórea e não-arbórea presente no meio urbano. De qualquer forma, os elementos mais valiosos de tais áreas são reconhecidamente as árvores, e embora haja custos associados com seu estabelecimento e manutenção, seus benefícios são mais que compensadores (KONIJNENDIJK et al., 2005).

2.2 Benefícios gerais

Apenas para facilitar a compreensão, Tyrväinen et al. (2005) classificam os benefícios que as árvores proporcionam ao ambiente urbano em (a) climáticos e físicos, (b) estéticos e arquitetônicos, (c) ecológicos, (d) econômicos e (e) sociais.

(a) climáticos e físicos

As árvores interceptam partículas suspensas através de sua folhagem e absorvem gases poluentes como ozônio, dióxido de enxofre e dióxido de nitrogênio, os removendo dessa forma da atmosfera e contribuindo, portanto, com a redução da poluição atmosférica (NILSSON; KONIJNENDIJK; NIELSEN, 2013). Neste sentido, os trabalhos de Brack (2002), realizado em Camberra, na Austrália; Yang et al.

(2005), realizado em Beijing, na China; Nowak, Crane e Stevens (2006), realizado nos Estados Unidos; Escobedo e Nowak (2009), realizado em Santiago, no Chile, trazem significativas contribuições sobre o assunto.

As árvores no ambiente urbano também possuem um importante papel na atenuação da poluição sonora. As ondas sonoras são parcialmente refletidas e refratadas pelas folhas, galhos e troncos das árvores, produzindo um fenômeno de dispersão dos ruídos (BUCUR, 2006). Adicionalmente, a copa das árvores atua na redução da reflexão da luz e do seu efeito ofuscante. Esse efeito ofuscante é definido por Chiabrando, Fabrizio e Garnero (2009) como a perda temporária da visão ocasionada por uma superfície cuja luminescência, em um determinado momento e na direção do observador, excede a luminescência que pode ser percebida pelo olho humano. A título de curiosidade, Jim e Chen (2006), em uma pesquisa participativa feita da cidade de Guangzhou, na China, demonstram que essa atenuação foi percebida como bastante importante pelos moradores do local.

O clima urbano também pode ser positivamente influenciado pelas árvores. A sombra proporcionada por suas copas, assim como a evapotranspiração de suas folhas, são fatores que modificam a temperatura e o grau de umidade local, tendo um efeito 'atenuante' ou até mesmo 'refrescante'. Georgi e Zafiriadis (2006) e Meier e Scherer (2012) demonstram esse fato de forma bastante interessante. Akbari e Taha (1992), além de considerarem esses aspectos já mencionados, abordam ainda a redução do vento proporcionada pelas árvores, que servem como um escudo. Os autores demonstram, assim, como as árvores ajudam em uma considerável economia de energia tanto para calefação quanto para resfriamento de casas e prédios. É importante notar ainda, que as árvores no ambiente urbano, quando consideradas coletivamente, podem abrandar a intensidade das ilhas de calor por alterarem o balanço de calor na cidade como um todo (AKBARI, 2002).

As árvores em ambiente urbano também interceptam a água das chuvas e, como salientado por McPherson et al. (1997), reduzem seu escoamento superficial (runoff). Soares et al. (2011) demonstram esse fato na cidade de Lisboa, em Portugal. Com a redução no escoamento superficial, também as inundações e o prejuízo que estas acarretam são reduzidos (SJÖMAN; ÖSTBERG; BÜHLER, 2012).

(b) estéticos e arquitetônicos

Os benefícios estéticos estão relacionados com as características intrínsecas de cada espécie arbórea, como por exemplo, formato e densidade da copa, cores da folhagem e das flores, tamanho e estrutura geral, incluindo o formato e a textura do tronco. Essa experiência estética é muito subjetiva, mas impacta positivamente o estado mental e emocional das pessoas. O deslumbre proporcionado por uma árvore majestosa ou em floração são inquestionáveis.

Adicionalmente a essa experiência pessoal, até mesmo uma única árvore estrategicamente posicionada pode contribuir enormemente com a qualidade estética de um determinado lugar (TYRVÄINEN et al., 2005).

Já os benefícios arquitetônicos são aqueles que proporcionam variações na paisagem local, e dependem de diferenças em alturas e densidades de copas, cores, texturas e formas. Assim, as árvores urbanas podem ser usadas para compor panoramas e proporcionar dimensão às paisagens (TYRVÄINEN et al., 2005). Por exemplo, quando plantadas em uma avenida, as árvores podem quebrar a monotonia das linhas retas e adicionar profundidade de visão.

(c) ecológicos

Os espaços verdes são essenciais na manutenção de comunidades da fauna silvestre (LINTOTT et al., 2014) e as árvores são consideradas o componente mais importante em promover sua diversidade em ambientes urbanos (BROWN; FREITAS, 2002). Densidade de cobertura arbórea, quantidade de árvores e idade das árvores são reconhecidos por Dreistadt, Dahlsten e Frankie (1990) como significativos fatores influenciando essa diversidade. Por exemplo, as copas das árvores podem servir de habitat para pássaros e invertebrados, e árvores mais velhas, que geralmente têm cavidades, podem ser um importante habitat para morcegos (GUSTAVSSON et al., 2005). Além do mais, somente as cavidades proporcionam local para ninho e abrigo para uma diversa gama de taxa num nível mundial, incluindo invertebrados (RANIUS, 2002), répteis (WEBB; SHINE, 1997), pássaros (NEWTON, 1994) e mamíferos (LINDENMAYER et al., 1990).

As árvores também desempenham um importante papel na provisão de alimentos para a fauna silvestre urbana, fornecendo diretamente, por exemplo, pólen, néctar, frutos e sementes. Considerando que muitos pequenos mamíferos e aves são insetívoros, é possível afirmar que indiretamente as árvores condicionam também o

suprimento de insetos e outros invertebrados. Entretanto, a abundância e riqueza de espécies de todos esses tipos de organismos variam grandemente em função das espécies das árvores.

Espécies de árvores nativas geralmente sustentam um maior número de organismos do que as espécies exóticas (por exemplo, HELDEN; STAMP; LEATHER, 2012). Elas representam espécies localmente adaptadas, o que significa que utilizam os recursos disponíveis de maneira mais eficiente e são consideradas mais efetivas em sustentar a biodiversidade nativa de plantas e animais (McKINNEY, 2006).

Também de suma importância é a diversidade de espécies arbóreas. Uma maior variedade de espécies de árvores presentes em áreas urbanas não só previne ataques de pragas e doenças, como também beneficia diferentes grupos de animais. McKinney (2002) ainda acrescenta que uma maior variedade de espécies arbóreas estimula a manutenção de vários processos ecológicos dentro de ecossistemas urbanos.

(d) econômicos

Os benefícios econômicos gerados pelas árvores em áreas urbanas se traduzem de forma mais evidente nos valores atribuídos às propriedades, tanto residenciais quanto comerciais. Usando ainda o conceito de externalidade positiva, onde árvores em uma propriedade aumentam o valor de posse de propriedades vizinhas, Sander, Polasky e Haight (2010) demonstraram o impacto da cobertura arbórea urbana nos preços de venda de residências em Minneapolis, EUA. Donovan e Butry (2010) também correlacionaram positivamente o número de árvores e área de copa nas proximidades de residências com o valor atribuído a estas.

(e) sociais

As árvores influenciam a saúde humana e o bem-estar de uma maneira bastante positiva. Não unicamente as árvores, mas os espaços que as contêm, desempenham um importante papel na recreação ao ar livre. Tais espaços são propícios para atividades de lazer e para a prática de esportes, como por exemplo corrida e caminhada. Também ajudam na redução das pressões e tensões emocionais e psicológicas (stress). Nesse sentido, Kaplan (1995) explicita as características necessárias para que as experiências restaurativas aconteçam e

como a natureza presente nas cidades pode ser a grande propulsora dessa restauração mental e emocional (por exemplo, BERTO, 2005).

Adicionalmente, Kuo (2003) evidencia a conexão entre as árvores e padrões mais saudáveis tanto das pessoas quanto das vizinhanças onde moram, apontando para um tema mais amplo – as árvores e a saúde pública.

Por fim, cabe ressaltar que as árvores também possuem um papel importante em promover consciência ambiental e um entendimento da natureza naqueles que moram nas cidades.

Em seu conjunto, esses benefícios se enquadram no que é denominado de serviços ecossistêmicos urbanos (JOHNSTON; HIRONS, 2014).

2.3 Riscos associados e avaliação do risco de queda

Não obstante os inúmeros benefícios proporcionados pelas árvores em ambientes urbanos, existem também alguns riscos associados com a sua presença. Esses riscos advêm de uma possível queda de uma árvore e/ou de suas partes, resultando em perigo de morte e estragos a propriedades, bens e infraestrutura. Mattheck e Breloer (1997) elucidam que tais quedas podem ocorrer simplesmente devido ao envelhecimento do lenho em galhos pesados ou então podem ser resultantes da deterioração do lenho ou da formação de defeitos estruturais.

No que tange ao entendimento do 'risco', Norris (2007) o define de forma bastante elementar como a probabilidade/chance/predisposição de que algo não planejado, e geralmente num sentido negativo, aconteça num dado período de tempo. Assim, o risco de queda de uma árvore e/ou de suas partes não representa uma exatidão e sempre leva em consideração a presença de defeitos ou fraquezas estruturais e as consequências resultantes da queda, se realmente vier a acontecer. Como explicitado por Matheny e Clark (1994), o risco associado a uma árvore envolve três componentes: 1) uma árvore com um potencial de queda (baseado na presença, dimensão e severidade de defeitos ou fraquezas estruturais), 2) um ambiente que pode contribuir com essa queda (por exemplo, exposição do vento e textura do solo), e 3) uma pessoa que poderia ser ferida ou um objeto que poderia ser danificado (valor daquilo que poderia ser atingido, o alvo em questão). Nesse sentido, o entorno de uma árvore que apresenta um potencial de queda é muito vulnerável, uma vez que está exposto ao risco.

Muitos são os métodos de avaliação do risco de queda de árvores, alguns com uma abordagem mais qualitativa (subjetiva) e outros com uma abordagem mais quantitativa. Norris (2007) coloca à disposição uma avaliação da metodologia e da funcionalidade de 15 desses métodos.

É importante salientar que a avaliação do risco de queda de árvores é mais uma ferramenta para auxiliar no manejo das árvores urbanas. Os riscos sempre podem ser reduzidos ou minimizados. Entretanto, existem situações em que as quedas não são previsíveis, especialmente quando há ausência de sinais externos indicando algum problema estrutural (MORTIMER; KANE, 2004).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada no centro urbano do município de Belém-PA e compreende o Parque Zoobotânico do Museu Paraense Emílio Goeldi e suas adjacências.

O Museu Goeldi, como é também intitulado, foi estabelecido em 1871 e hoje é reconhecido mundialmente como uma das mais importantes instituições de investigação científica sobre a Amazônia brasileira. O Parque Zoobotânico foi fundado em 1895 e possui área de 5,2 hectares, abrigando uma significativa mostra da fauna e flora amazônicas. O acervo florístico ex-situ é bastante exuberante e diversificado, composto desde majestosas árvores a ervas diversas formando o sub-bosque, sendo aproximadamente 3.000 espécimes, distribuídos em 64 famílias e 300 espécies.

Como a rugosidade urbana interfere diretamente na ação dos ventos e, portanto, na sua simulação, uma considerável área adjacente ao Parque Zoobotânico também foi considerada para fins deste estudo. Com o intuito de tornar esta metodologia o mais acessível possível para outras pesquisas, inclusive em termos de fácil replicabilidade, a imagem considerada da área de estudo foi obtida a partir do Google Earth. O Google Earth como fonte da imagem de satélite também foi proposto por Moro, Westerkamp e Araújo (2014), com resultados bastante satisfatórios. A imagem obtida foi então georreferenciada através da ferramenta 'georreferenciar' do QGIS versão 2.8.2, utilizando coordenadas de canto, datum WGS84 e sistema de coordenadas UTM fuso 22S.

A Figura 1 ilustra a cidade de Belém-PA juntamente com a imagem da área de estudo.



Figura 1 – Belém-PA e imagem da área de estudo

Segundo a classificação climática de Köppen, Belém-PA apresenta clima do tipo Af, ou seja, clima de floresta tropical chuvosa. A época mais chuvosa ocorre no verão e outono (dezembro a maio) e a época menos chuvosa ocorre no inverno e primavera (junho a novembro). A cidade está sob influência do regime de marés, apresenta relevo predominantemente plano, e está muito próxima à faixa equatorial, onde ocorre predominância de ventos fracos e de direções variáveis. Entretanto, dependendo da época do ano, os ventos de norte estão relacionados com tempo instável; os ventos de nordeste, leste e sudeste são originados dos anticiclones subtropicais semiestacionários, dos Açores e do Atlântico Sul, e encontram-se associados às condições de tempo estável ou instável; e os ventos de sul e oeste são raros (SUDAM; EMBRAPA, 1993).

Antes de prosseguir para a obtenção dos dados e descrições metodológicas, cabe aqui uma observação. O museu forneceu dados valiosos de inventário florestal das árvores do Parque Zoobotânico, sem os quais esse estudo, da forma como foi proposto, não poderia ter sido executado. O inventário foi realizado anteriormente a 2010 e é utilizado somente para uso interno do Museu Paraense Emílio Goeldi, sendo que os dados não foram publicados, mas somente disponibilizados para que este estudo pudesse ser viabilizado. Incluem identificação, localização e alturas das árvores, e foram empregados para pontuar as copas das árvores tomografadas bem como para identificar aquelas copas que formam o dossel do Parque Zoobotânico e que são, portanto, visíveis na imagem obtida da área de estudo.

3.2 Tomografias de impulso

A técnica da tomografia de impulso foi realizada em 12 espécimes arbóreos localizados dentro do Parque Zoobotânico com o intuito de quantificar a perda de resistência biomecânica dessas árvores. Quatro tomografias foram realizadas em 2011 e oito tomografias foram realizadas em 2014. A seleção das árvores foi feita por indicação de funcionários do museu, e correspondem, em sua grande maioria, a árvores majestosas, de elevado valor histórico, com idade entre 70 e 142 anos.

Para cada árvore selecionada foi atribuído um número de identificação. A Tabela 1 indica quais foram as árvores selecionadas, seus respectivos números de identificação (atribuídos para fins deste estudo), alturas e ano de realização das tomografias.

Tabela 1 – Informações elementais sobre as árvores tomografadas

Nº	Nome popular	Nome científico	Altura (m)	Ano
1	Guajará	<i>Chrysophyllum excelsum</i>	32	2014
2	Samaumeira	<i>Ceiba pentandra</i>	34	2011
3	Samaumeira	<i>Ceiba pentandra</i>	27	2011
4	Tacacazeira	<i>Sterculia elata</i>	15	2011
5	Cedro	<i>Cedrela odorata</i>	16	2014
6	Castanha-do-Pará	<i>Bertholletia excelsa</i>	12	2014
7	Andira-uchi	<i>Andira inermis</i>	22	2014
8	Bálsamo	<i>Myroxylon balsamum</i>	16	2011
9	Ucuúba-branca	<i>Virola surinamensis</i>	16	2014
10	Quaruba	<i>Vochysia inundata</i>	18	2014
11	Pau-d´arco-amarelo	<i>Tabebuia serratifolia</i>	12	2014
12	Pau-d´arco-amarelo	<i>Tabebuia serratifolia</i>	10	2014

A Figura 2 traz as copas dessas árvores pontuadas na imagem da área de estudo, uma composição feita através do QGIS versão 2.8.2 para facilitar a visualização da localização das referidas árvores.



Figura 2 – Localização e identificação das árvores tomografadas

O equipamento utilizado para elaboração das imagens tomográficas é de marca RINNTECH modelo ARBOTOM. Possui 12 sensores do tipo acelerômetro, uma bateria e transmissor de dados e um computador portátil tipo Tablet PC marca Samsung, além de cabos de conexão tipo “firewire”.

As árvores foram tomografadas em seções transversais do caule em alturas diversas definidas conforme a estrutura morfológica de cada espécime e considerando locais de maior fragilidade e por isso mais suscetíveis à falha biomecânica.

Uma vez definida a altura das seções transversais, os pinos responsáveis pelo encaixe dos sensores foram inseridos por meio de um martelo, até que a ponta dos pinos estivesse em contato com o alburno. O primeiro pino foi posicionado na direção norte em todas as tomografias realizadas e os demais pinos em sequência, no sentido horário, para reproduzir as principais deformações da seção em relação ao perímetro circular imaginário.

Os sensores foram então inseridos e conectados entre si através de cabos de conexão, assim como com o componente de bateria contendo o distribuidor de dados para o computador. O aparelho foi então acionado e cinco batidas foram produzidas com um martelo em cada sensor para gerar ondas mecânicas pelo tecido na seção transversal. O computador contém o programa para decodificação e interpretação dos impulsos produzidos, chamado ARBOTOM 1.73 já previamente instalado. A Figura 3 ilustra (a) o equipamento utilizado, (b) a inserção dos pinos em uma das árvores e (c) a representação de uma seção transversal do caule de uma árvore com a posição de instalação dos sensores para que o programa possa, por meio das distâncias entre cada sensor e entre a circunferência, recriar a forma da seção de maneira precisa.

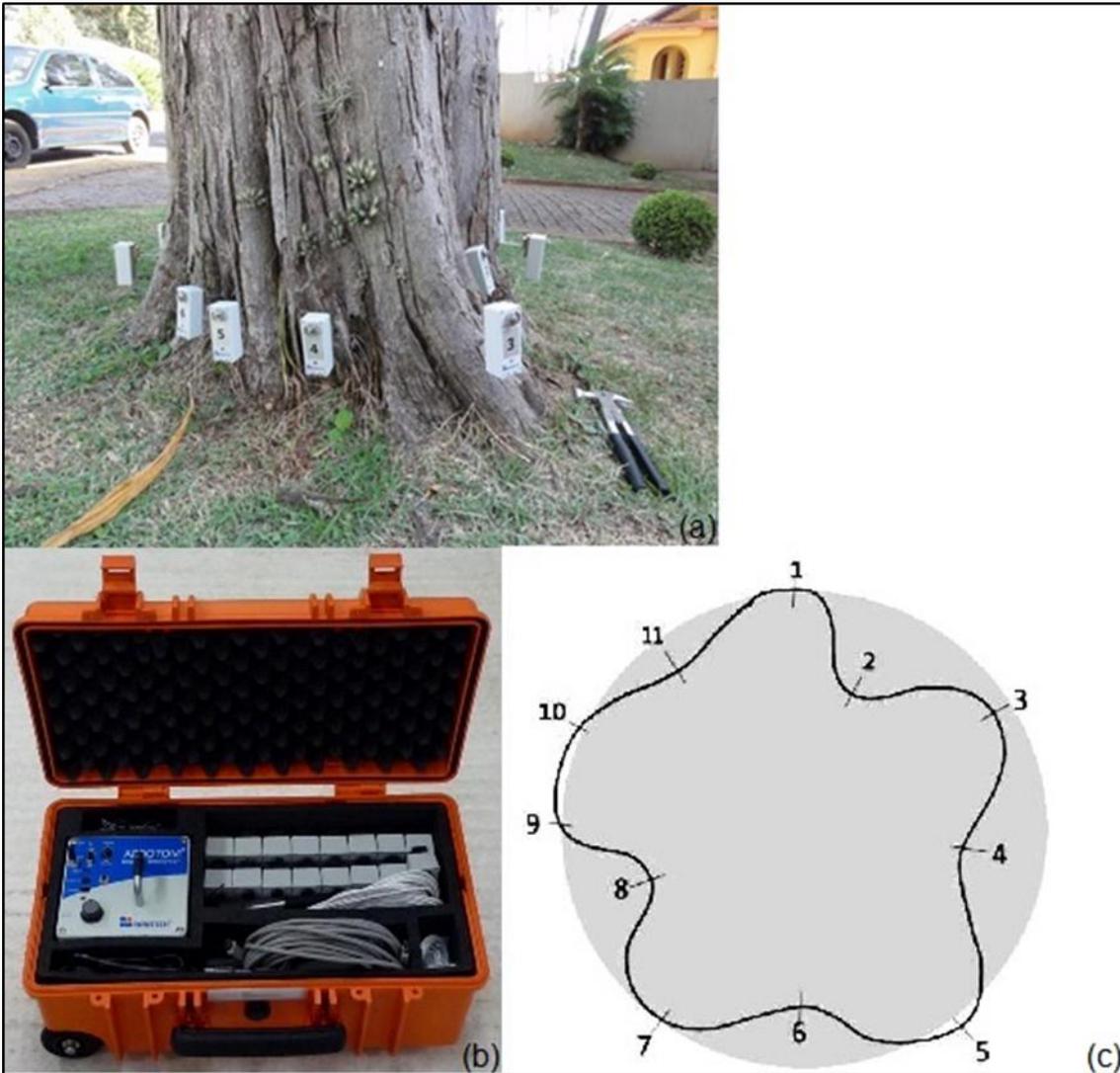


Figura 3 – ARBOTOM e seção transversal de inserção dos sensores

Nota: (a) Maleta contendo todos os componentes do tomógrafo de impulso.

(b) Sensores instalados na altura de maior fragilidade biomecânica.

(c) Representação de uma seção transversal do caule de uma árvore e a posição de instalação dos sensores.

Assim, o ARBOTOM 1.73, que nada mais é que um software, foi o responsável por filtrar os dados discrepantes de tempos de cronometragem de saída e chegada das ondas mecânicas produzidas, através do coeficiente de variação das cronometragens em cada um dos doze sensores, e por gerar a imagem gráfica para predição da condição biomecânica da área averiguada.

Uma vez gerada a imagem gráfica, é possível verificar o correto funcionamento do aparelho para maior confiabilidade da precisão dessa imagem, ou seja, se essa imagem é fiel às condições encontradas de fato na seção transversal do lenho. Para isso, as velocidades de chegada e de saída da propagação das ondas sonoras foram correlacionadas e avaliadas através de diagramas de dispersão elaborados através do Excel 2013.

3.3 Simulação dos ventos

Para a simulação dos ventos, foi utilizado o ENVI-met versão 3.1 e visualizador de mapas LEONARDO versão 3.75. Os passos seguidos e os ajustes feitos foram baseados em recomendações de Bruse (2009). Quando o download do software é efetuado, são instalados os seguintes componentes: (a) editor de área (para o preparo de arquivos com extensão .in), (b) editor de configuração (para o preparo de arquivos com extensão .cf), (c) processador de dados e (d) visualizador de mapas (LEONARDO). Os componentes são utilizados na mesma ordem em que foram apresentados.

O primeiro passo então consistiu em trabalhar com o editor de área, começando por inserir a imagem da área de estudo no formato Bitmap de 24 bits e, neste caso, com resolução de 2400 dpi (a melhor possível para nitidez de visualização). Essa imagem é a mesma previamente apresentada na Figura 1. Vale ressaltar que a imagem inserida serve apenas para a digitalização dos dados representados por essa imagem, interessando apenas as informações que são colocadas sobre ela através de grids. A imagem inserida foi então inicialmente ajustada considerando os seguintes aspectos:

- (1) Nome do local: Museu Goeldi / Latitude: -1.45 e Longitude: -48.48 / Zona de tempo de referência: GMT-3 e longitude de referência: -45.00 / Não houve rotação no norte verdadeiro;
- (2) Número de grids: x-Grids = 160 e y-Grids = 186;
- (3) Tamanho de cada grid: $dx = 7.20$ e $dy = 7.20$.

Em seguida, todos os grids foram preenchidos com a informação que continham: tipo de solo, altura de construções ou altura e tipo de vegetação. Os tipos de solo aqui referem-se a tudo aquilo que não é nem construção nem vegetação. Foram considerados asfalto, concreto, solo arenoso e água. Para estimar a altura das construções foi utilizado o Google Maps com Street View.

Para a estimativa da altura da vegetação presente na área externa ao Parque Zoobotânico, também se fez uso do Google Maps com Street View. Já a aferição da altura das copas das árvores do Parque Zoobotânico foi realizada a partir das informações provenientes do inventário florestal de uso interno do museu. A Figura 4 ilustra o esforço realizado para encontrar as copas mais elevadas e, portanto, as que

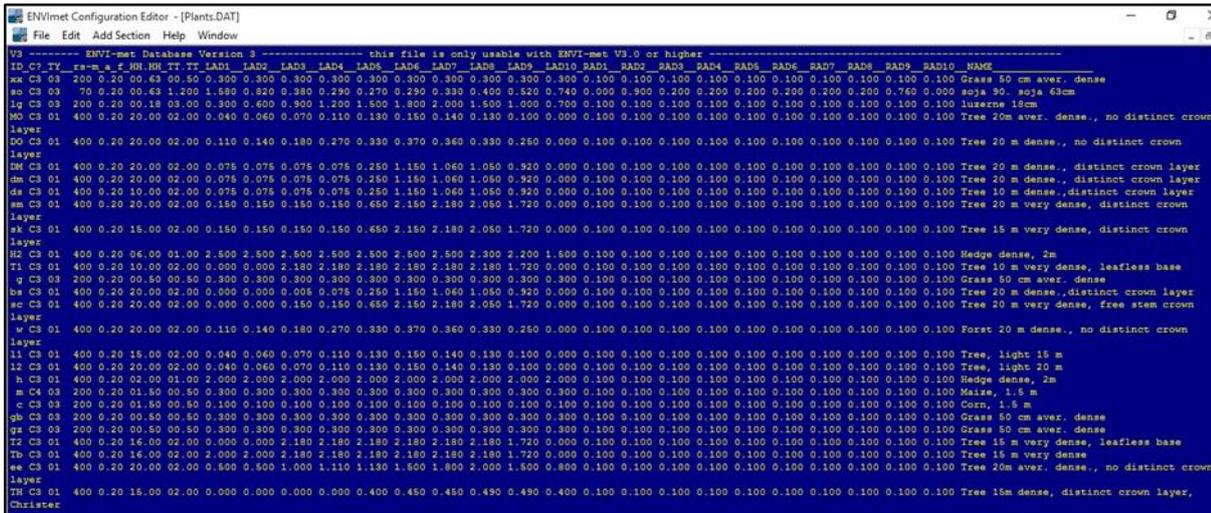
mais se sobressaíam, para que a área de estudo pudesse estar representada o mais fiel possível à realidade.



Figura 4 – Identificação das copas das árvores que formam o dossel do Parque Zootônico

Nota: Números indicam alturas em metros

Entretanto, as classes de vegetação tiveram que ser repensadas e adaptadas para a vegetação brasileira, ou mais especificamente, para a região amazônica, uma vez que esse software foi desenvolvido considerando espécies arbóreas de clima temperado. Na Figura 5, é apresentada a base de dados referente às plantas como incluído na instalação do programa.



```

ENVI-met Configuration Editor - [Plants.DAT]
File Edit Add Section Help Window
----- this file is only usable with ENVI-met V3.0 or higher -----
ID C7 TV es-m a f HH NH TT TT LAD1 LAD2 LAD3 LAD4 LAD5 LAD6 LAD7 LAD8 LAD9 LAD10 RAD1 RAD2 RAD3 RAD4 RAD5 RAD6 RAD7 RAD8 RAD9 RAD10 NAME
so C3 03 70 0.20 00.63 1.200 1.880 0.820 0.980 0.290 0.270 0.290 0.330 0.400 0.520 0.740 0.000 0.900 0.200 0.200 0.200 0.200 0.200 0.200 0.760 0.000 soja 90. soja 63cm
lg C3 03 200 0.20 00.18 03.00 0.300 0.400 0.300 1.200 1.500 1.300 2.000 1.500 1.000 0.700 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
mo C3 01 400 0.20 20.00 02.00 0.040 0.060 0.070 0.110 0.130 0.150 0.140 0.130 0.100 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
Layer
DO C3 01 400 0.20 20.00 02.00 0.110 0.140 0.180 0.270 0.330 0.370 0.360 0.330 0.250 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
Layer
RM C3 01 400 0.20 20.00 02.00 0.075 0.075 0.075 0.075 0.250 1.150 1.060 1.050 0.920 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
dm C3 01 400 0.20 20.00 02.00 0.075 0.075 0.075 0.075 0.250 1.150 1.060 1.050 0.920 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
ds C3 01 400 0.20 10.00 02.00 0.075 0.075 0.075 0.075 0.250 1.150 1.060 1.050 0.920 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
sm C3 01 400 0.20 20.00 02.00 0.150 0.150 0.150 0.150 0.650 2.150 2.180 2.050 1.720 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
Layer
sk C3 01 400 0.20 15.00 02.00 0.150 0.150 0.150 0.150 0.650 2.150 2.180 2.050 1.720 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
Layer
H2 C3 01 400 0.20 06.00 01.00 2.500 2.500 2.500 2.500 2.500 2.500 2.500 2.500 2.300 2.200 1.500 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
T1 C3 01 400 0.20 10.00 02.00 0.000 0.000 0.000 2.180 2.180 2.180 2.180 2.180 1.720 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
g C3 03 200 0.20 00.50 00.50 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
bs C3 01 400 0.20 20.00 02.00 0.000 0.000 0.008 0.075 0.280 1.150 1.060 1.050 0.920 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
sc C3 01 400 0.20 20.00 02.00 0.000 0.000 0.000 0.150 0.150 0.650 2.150 2.180 2.050 1.720 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
Layer
w C3 01 400 0.20 20.00 02.00 0.110 0.140 0.180 0.270 0.330 0.370 0.360 0.330 0.250 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
Layer
l1 C3 01 400 0.20 15.00 02.00 0.040 0.060 0.070 0.110 0.130 0.150 0.140 0.130 0.100 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
l2 C3 01 400 0.20 20.00 02.00 0.040 0.060 0.070 0.110 0.130 0.150 0.140 0.130 0.100 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
h C3 01 400 0.20 02.00 01.00 2.000 2.000 2.000 2.000 2.000 2.000 2.000 2.000 2.000 2.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
m C4 03 200 0.20 01.50 00.50 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
c C3 03 200 0.20 01.50 00.80 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
gb C3 03 200 0.20 00.50 00.50 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
gz C3 03 200 0.20 00.50 00.50 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
T2 C3 01 400 0.20 16.00 02.00 0.000 0.000 0.000 2.180 2.180 2.180 2.180 2.180 1.720 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
T3 C3 01 400 0.20 16.00 02.00 2.000 2.000 2.180 2.180 2.180 2.180 2.180 2.180 1.720 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
ee C3 01 400 0.20 20.00 02.00 0.000 0.000 1.000 1.110 1.130 1.500 1.800 1.800 1.800 0.800 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
Layer
TH C3 01 400 0.20 15.00 02.00 0.000 0.000 0.000 0.000 0.400 0.450 0.450 0.490 0.490 0.400 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
Christer
  
```

Figura 5 – Base de dados original referente à vegetação

Na Figura 6 são apresentadas as novas classes de vegetação propostas e utilizadas, ressaltando que alturas indicadas como 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35 metros equivalem respectivamente a intervalos de 5 a 7,5; 7,6 a 12,5; 12,6 a 17,5; 17,6 a 22,5; 22,6 a 27,5; 27,6 a 32,5; e 32,6 a 37,5 metros de altura.

Assim, foi gerado um arquivo com extensão .in válido e que foi adicionado à pasta de input do software.

O segundo passo foi trabalhar com o editor de configuração. Para tanto, os seguintes dados precisavam ser conhecidos ou então calculados: (a) data em que a simulação se inicia, (b) horário em que a simulação se inicia, (c) tempo total de simulação, (d) velocidade do vento (m/s) a 10 metros, (e) direção do vento, (f) temperatura potencial inicial atmosférica a 2500 metros, (g) umidade específica a 2500 metros, (h) umidade relativa a 2 metros.

(a) data em que a simulação se inicia

Para representar situações reais de chuvas e ventos fortes, foram selecionados 4 eventos noticiados na cidade de Belém-PA que implicaram na queda de árvores pela cidade. Esses eventos diferiram entre si na intensidade e/ou direção dos ventos e aconteceram nos dias 31/10/2012, 02/11/2012, 20/01/2015 e 01/02/2015. Para esclarecimento, o dia 31/10/2012 representa condições que antecederam o evento do dia 02/11/2012, ocasião esta da queda de um dos galhos do Guajará avaliado pela tomografia de impulso.

(b) horário em que a simulação se inicia

Todas as simulações se iniciaram às 21h00 (considerando como zona de tempo de referência GMT-3), horário em que as condições atmosféricas são neutras.

(c) tempo total de simulação

Foram consideradas 48 horas de simulação apenas para aquela que se iniciou no dia 31/10/2012, pois a velocidade do vento era relativamente mais baixa. Para as demais datas, considerou-se apenas 2 horas de simulação.

(d) velocidade do vento e (e) direção do vento

Por meio do site do National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA, do Departamento de Comércio dos Estados Unidos, foi possível ter acesso aos dados de velocidade e direção do vento da Estação Meteorológica Val de Cans, localizada na cidade de Belém-PA, para as datas selecionadas. Uma vez dispondo dessas informações, foi possível identificar as altas velocidades do vento que ocasionaram

os transtornos na cidade, assim como suas direções. As velocidades foram disponibilizadas em milhas/hora e a direção em graus. Como o arquivo de configuração do software trabalha com velocidades em metros/segundo, considerou-se: 2,7 m/s (6 mph) e 360° (norte) para 31/10/2012; 6,3 m/s (14 mph) e 40° (nordeste) para 02/11/2012; 9,4 m/s (21 mph) e 120° (sudeste) para 20/01/2015; 13,4 m/s (30 mph) e 40° (nordeste) para 01/02/2015.

(f) temperatura potencial inicial atmosférica a 2500 metros, (g) umidade específica a 2500 metros e (h) umidade relativa a 2 metros

Para o cálculo dessas variáveis, foram utilizados dados disponibilizados pelo site do Departamento de Ciências Atmosféricas, da Escola de Engenharia da Universidade de Wyoming, e que também foram feitos pela Estação Meteorológica Val de Cans. Esses dados englobam pressão atmosférica (hPa), altura (m), temperatura (°C), temperatura do ponto de orvalho (°C), e umidade específica (g/kg), apenas citando aqueles que foram utilizados.

Para calcular a temperatura potencial, foram necessárias duas regressões, uma entre altura e temperatura, outra entre altura e pressão. Assim, foram encontrados os valores de temperatura e pressão a 2500 metros, e então através da calculadora Shodor, a temperatura potencial.

Para calcular a umidade específica a 1500 metros, somente foi necessária uma regressão entre altura e umidade específica.

Por fim, para o cálculo da umidade relativa a 2 metros, foram necessárias 3 regressões. Uma entre altura e temperatura, outra entre altura e pressão, e a terceira entre altura e ponto de orvalho. Os valores obtidos foram utilizados na calculadora Vaisala, encontrando-se assim os valores de umidade relativa.

Os gráficos e suas equações, bem como a síntese dos valores calculados para posterior inserção no editor de configuração, encontram-se nas Figuras 8, 9, 10 e 11, respectivamente para as datas 31/10/2012, 02/11/2012, 20/01/2015 e 01/02/2015.

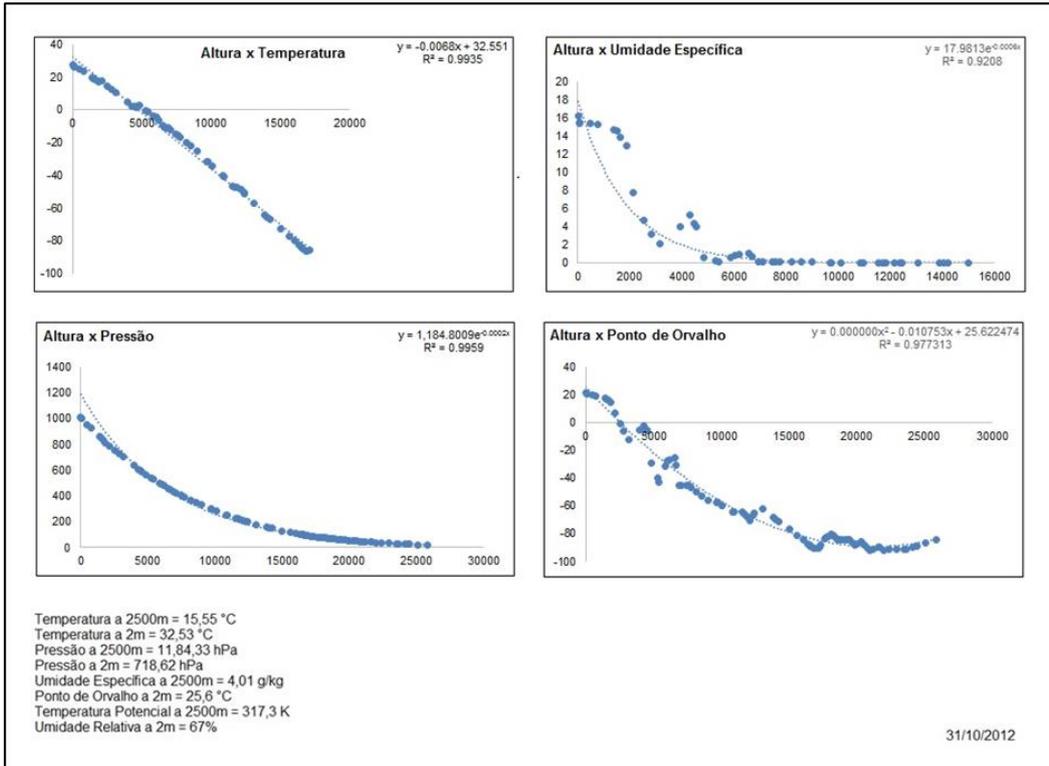


Figura 8 – Gráficos, equações e valores obtidos para o arquivo de configuração para 31/10/2012

Nota: Os valores indicados pelos gráficos estão em proporções relativas

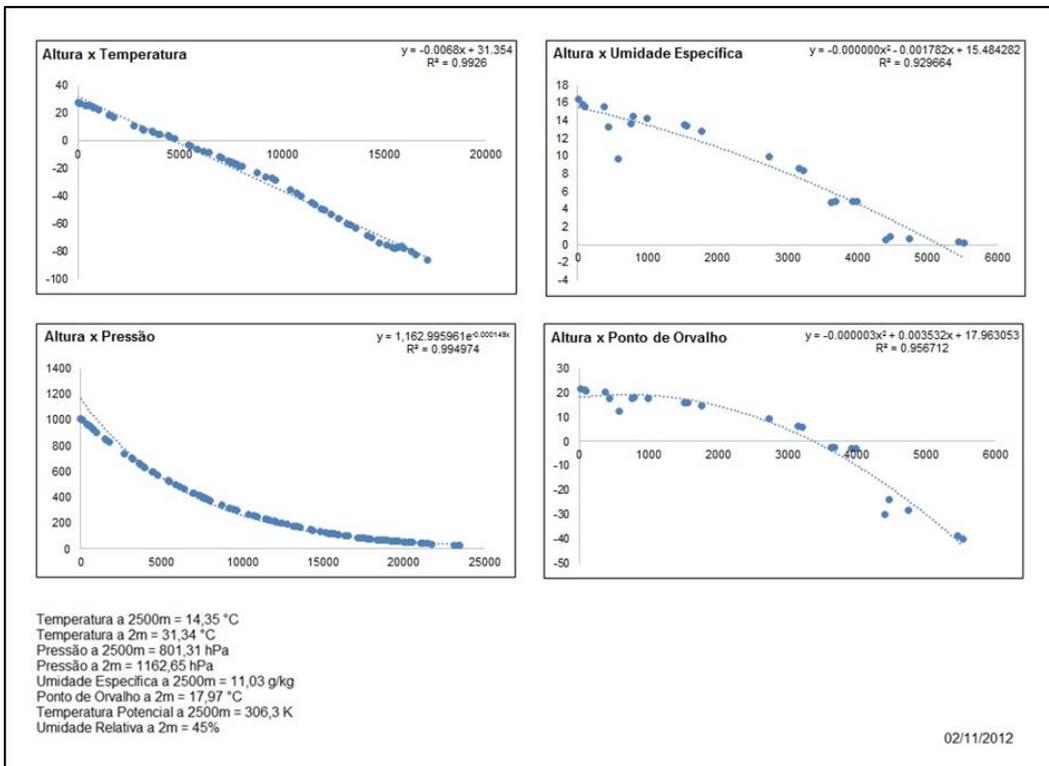


Figura 9 – Gráficos, equações e valores obtidos para o arquivo de configuração para 02/11/2012

Nota: Os valores indicados pelos gráficos estão em proporções relativas

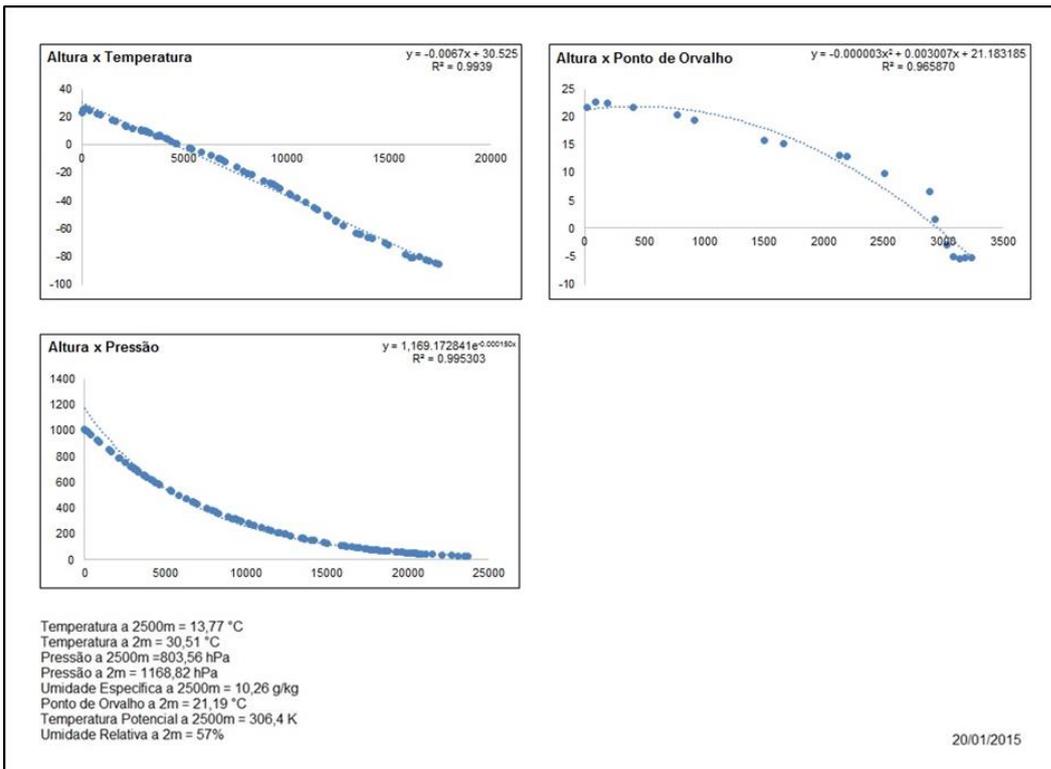


Figura 10 – Gráficos, equações e valores obtidos para o arquivo de configuração para 20/01/2015

Nota: Os valores indicados pelos gráficos estão em proporções relativas
 A umidade específica a 2500m de altura foi fornecida pela estação meteorológica

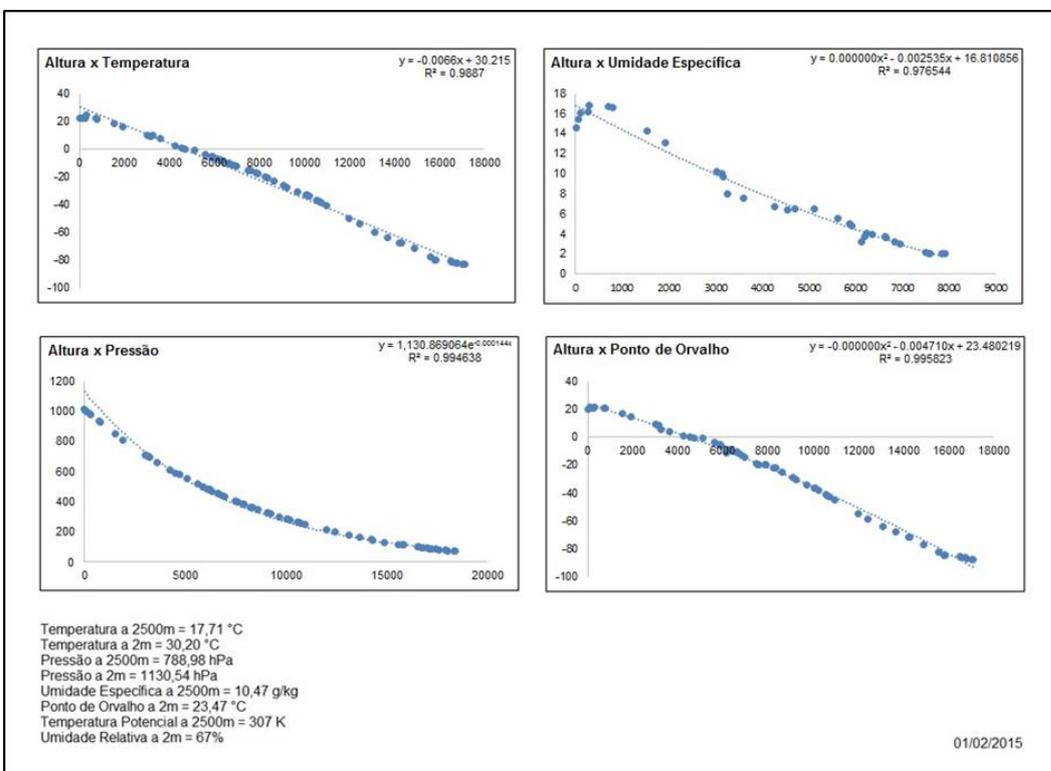


Figura 11 – Gráficos, equações e valores obtidos para o arquivo de configuração para 01/02/2015

Nota: Os valores indicados pelos gráficos estão em proporções relativas

Assim, os valores foram então inseridos no arquivo de configuração, como mostra a Figura 12. Dessa maneira, foram criados quatro arquivos com extensão .cf.

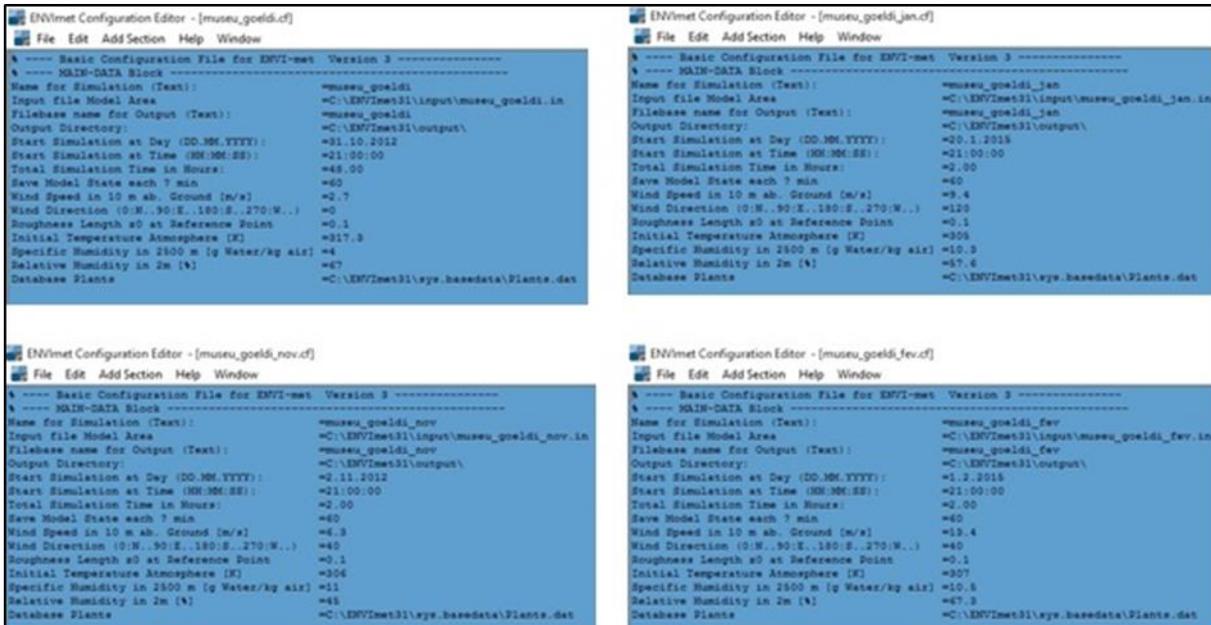


Figura 12 – Arquivos de configuração para as datas escolhidas

Para o processamento dos dados, o arquivo com extensão .in criado inicialmente serviu para todas as quatro simulações, apenas diferindo os arquivos com extensão .cf. Os dados foram então processados em máquina virtual pertencente à USP e utilizada pelo Laboratório de Métodos Quantitativos. Como output, a única variável selecionada e de interesse para os fins deste estudo foi velocidade do vento (m/s).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para facilitar a sequência de apresentação dos dados obtidos e sua discussão, optou-se por dividi-los em tomografias de impulso e simulação dos ventos.

4.1 Tomografias de impulso

Através do software ARBOTON 1.73, o tempo que o impulso gerado pela batida do martelo levou para chegar a todos os outros sensores foi registrado e, considerando a distância entre os sensores, transferido para velocidades. Essas velocidades do impulso foram então reunidas em uma matriz para a geração do gráfico da superfície da seção tomografada.

A verificação desses conjuntos de velocidades, através de diagramas de dispersão, correlacionando velocidades de saída (aquelas provenientes do impulso que foi emitido por cada sensor) com as velocidades de chegada (aquelas provenientes do impulso que foi recebido por cada sensor), estão apresentadas na Figura 13 para as árvores 1, 2, 3 e 4; na Figura 14 para as árvores 5, 6, 7 e 8; e na Figura 15 para as árvores 9, 10, 11 e 12.

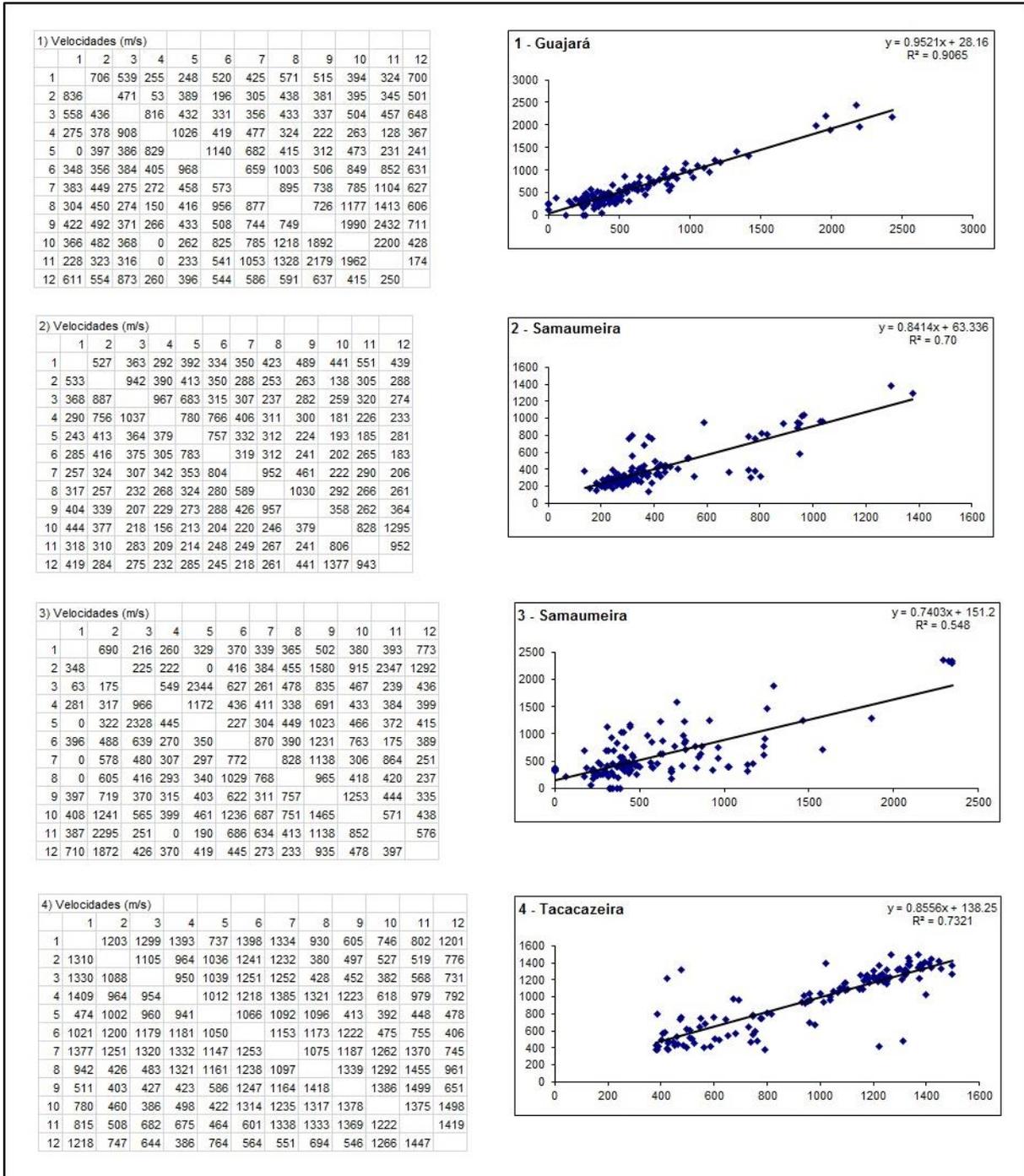


Figura 13 – Quadros de velocidades e diagramas de dispersão para as árvores 1, 2, 3 e 4

Nota: Os valores indicados pelos diagramas estão em proporoes relativas

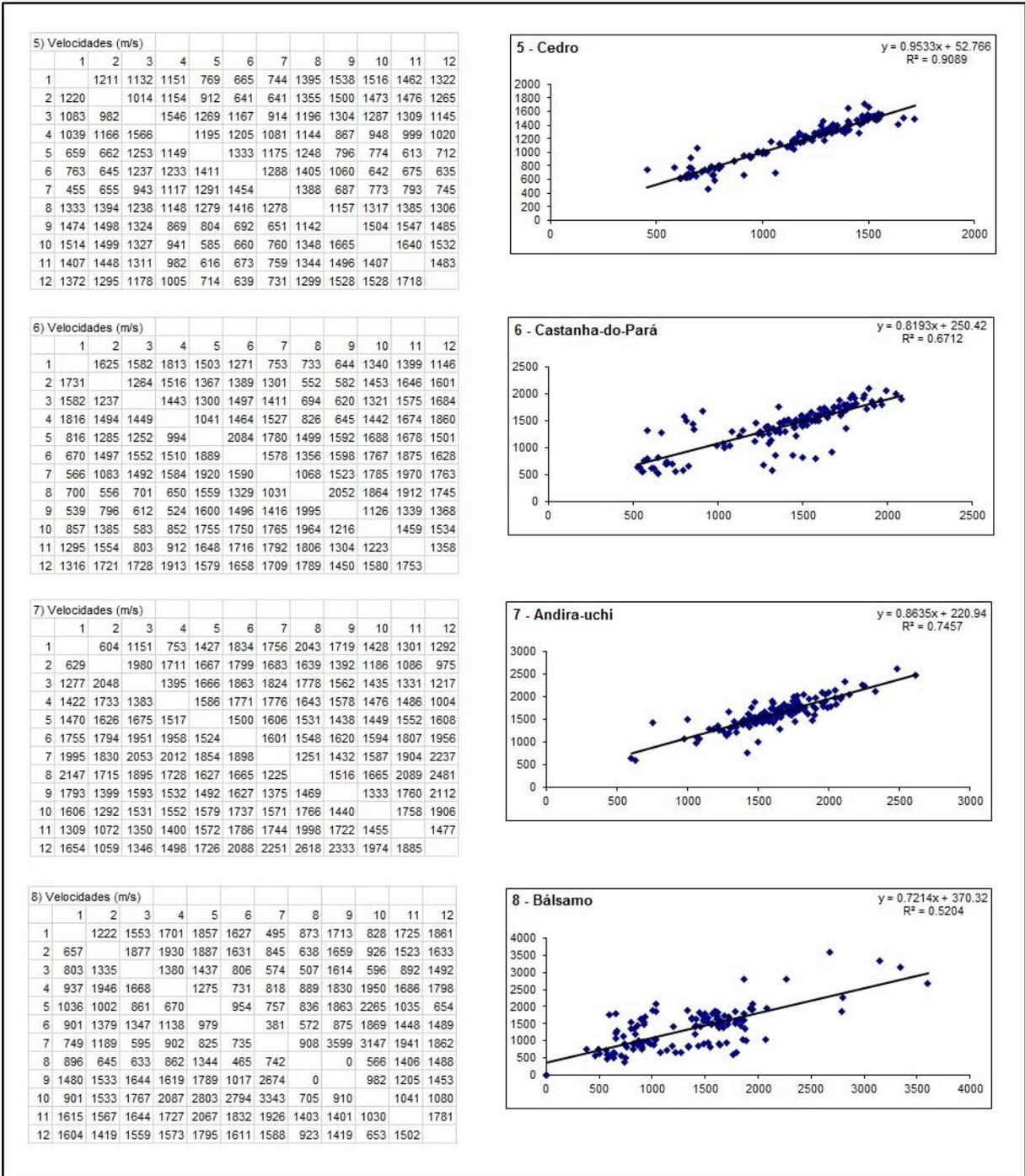
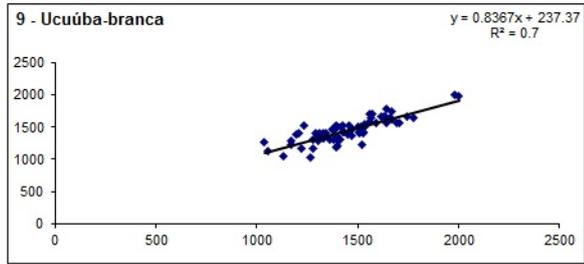


Figura 14 – Quadros de velocidades e diagramas de dispersão para as árvores 5, 6, 7 e 8

Nota: Os valores indicados pelos diagramas estão em proporções relativas

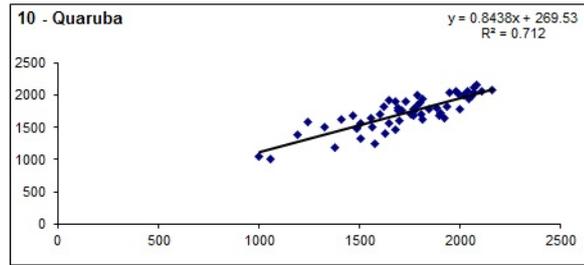
9) Velocidades (m/s)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		1220	1277	1329	1423	1470	1303	1378	1391
2	1169		1129	1277	1380	1458	1402	1513	1508
3	1168	1056		1235	1308	1376	1396	1561	1534
4	1329	1303	1522		1403	1331	1426	1670	1642
5	1430	1451	1412	1292		1636	1629	1746	1777
6	1470	1515	1472	1402	1664		1984	1696	1705
7	1364	1511	1531	1530	1666	2004		1267	1402
8	1305	1505	1590	1620	1671	1561	1039		1403
9	1194	1417	1543	1566	1642	1572	1210	1345	



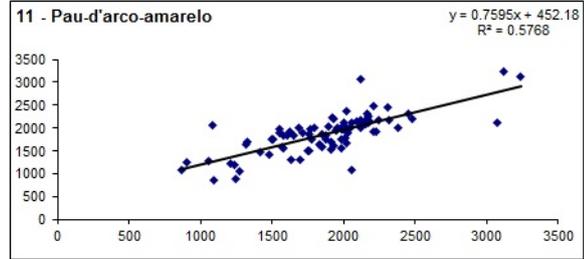
10) Velocidades (m/s)

	1	2	3	4	5	6	7	8
1		1058	1560	1695	1777	1798	1623	1330
2	1001		1193	1410	1603	1728	1645	1467
3	1647	1377		1487	1769	2068	2080	1947
4	1810	1626	1487		1566	2055	2068	1992
5	1766	1700	1691	1509		1710	1786	1816
6	1886	1904	2035	1980	1754		1682	1786
7	1816	1920	2160	2111	2001	1900		1243
8	1505	1679	2043	2020	1934	1846	1578	



11) Velocidades (m/s)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		1095	1481	1781	2054	1910	1945	2013	1876	1854
2	867		906	1326	1655	1573	1686	1624	1608	1555
3	1418	1244		1772	2029	1852	2121	1987	2047	2059
4	1771	1694	1986		1747	1635	2095	1991	2146	2178
5	1084	1836	1898	1502		1276	2021	1796	2169	2208
6	1548	1582	1583	1322	1057		2123	1509	1934	1918
7	1949	2021	2175	2157	2378	3079		1238	2121	2157
8	1959	1931	2006	1981	2011	1763	1213		3118	2308
9	1761	1844	2012	2124	2317	2208	2003	3241		1710
10	1873	1987	2131	2250	2477	2225	2179	2452	1909	



12) Velocidades (m/s)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		1265	1613	1764	2350	2027	1690	1632	1777	737
2	1455		1924	1757	2362	2122	1733	1785	2037	1598
3	1686	1897		1597	2228	1872	1414	1571	1978	1720
4	1859	1731	1618		1435	1683	1385	1602	2043	1942
5	2291	2188	2024	1435		1689	1261	1672	2275	2438
6	2061	2079	1859	1625	1847		1275	1665	1900	2115
7	1885	1837	1550	1468	1454	1594		2029	2194	2161
8	1492	1593	1415	1453	1649	1518	1719		1248	1608
9	1696	1873	1763	1793	2164	1734	1725	1232		2026
10	851	1514	1703	1867	2564	2086	1949	1771	2264	

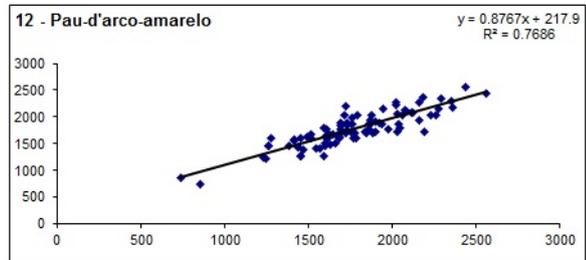


Figura 15 – Quadros de velocidades e diagramas de dispersão para as árvores 9, 10, 11 e 12

Nota: Os valores indicados pelos diagramas estão em proporções relativas

As linhas das tabelas representam velocidades de saídas e as colunas representam velocidades de chegada. A primeira coluna e a primeira linha indicam o número de sensores utilizados, sendo 12 sensores para as árvores indicadas como 1 a 8 (em virtude do maior diâmetro da seção transversal tomografada); 9 sensores para a árvore 9; 8 sensores para a árvore 10; e 10 sensores para as árvores 11 e 12.

Todos os diagramas de dispersão apresentam comportamento linear da linha de tendência. Excelentes coeficientes de determinação (R^2), próximos a 0,9, foram encontrados nos dados das árvores 1 e 5. R^2 da ordem de 0,7 foi encontrado nos dados da maioria das árvores, sendo as de número 2, 4, 6, 7, 9, 10 e 12, podendo ser considerado muito bom.

Apenas os dados de três árvores exibem R^2 próximo de 0,5, as de número 3, 8 e 11, não obstante, pode-se observar que há certa coerência na distribuição dos dados apresentados. O software filtra inicialmente os dados discrepantes, mas isso pode ter acontecido pela heterogeneidade das condições encontradas na madeira, ou então por erros de medição mesmo. Assim, pode-se proceder novas tomografias dessas árvores e comparar se com um R^2 maior o gráfico gerado através das velocidades do impulso se modifica consideravelmente ou não.

Uma vez validadas as velocidades, parte-se para as imagens tomográficas propriamente ditas, geradas a partir dessas velocidades.

A Figura 16 ilustra as imagens tomográficas provenientes do componente de gráfico mecânico para o Guajará e as duas Samaumeiras. A Figura 17, para a Tacacazeira, o Cedro e a Castanha-do-Pará. A Figura 18, para a Andira-uchi, o Bálsamo e a Ucuúba-branca. Por fim, Figura 19, para a Quaruba e os dois Paus-d'arco-amarelos.

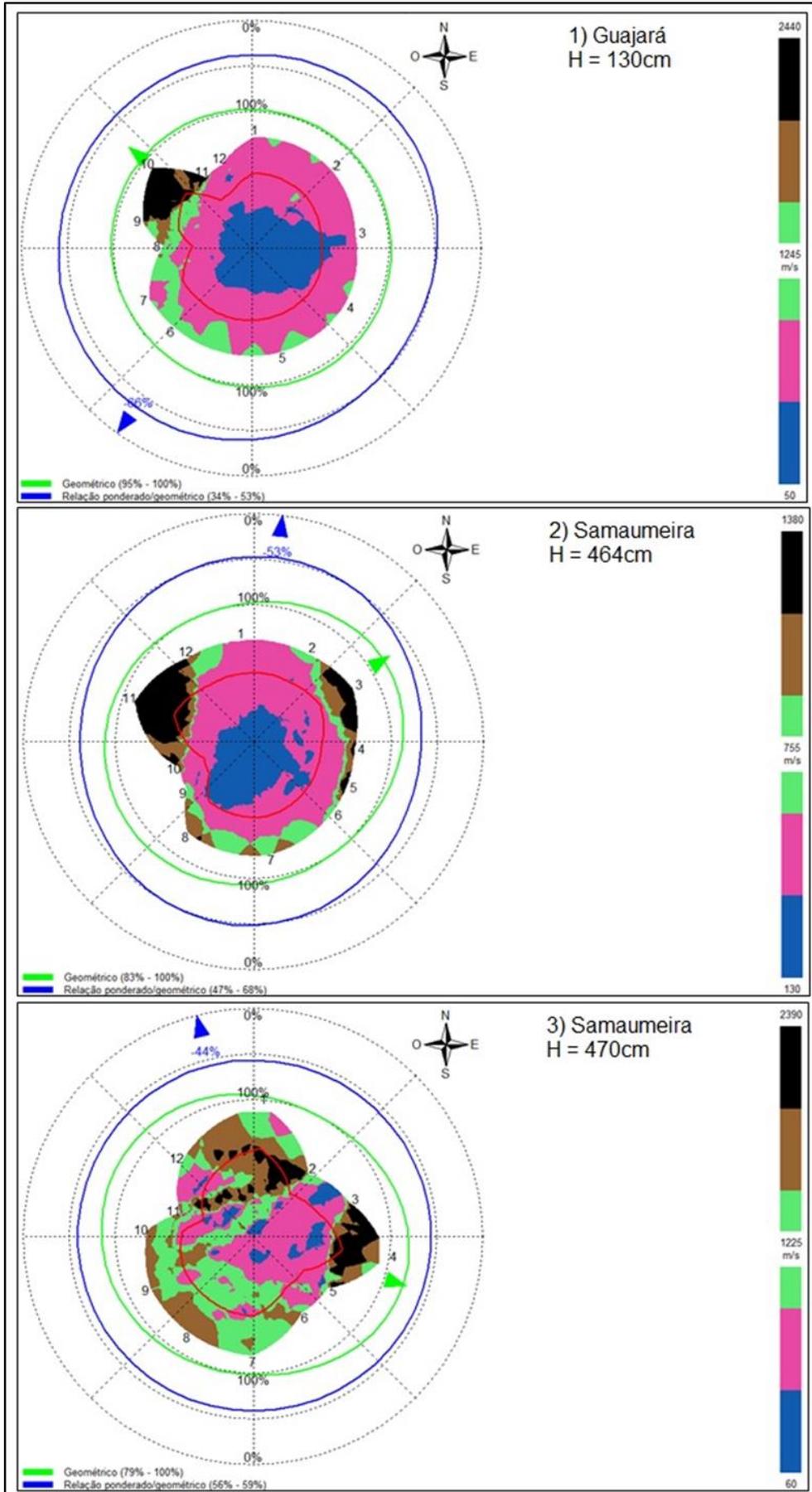


Figura 16 – Imagens tomográficas das árvores 1, 2 e 3

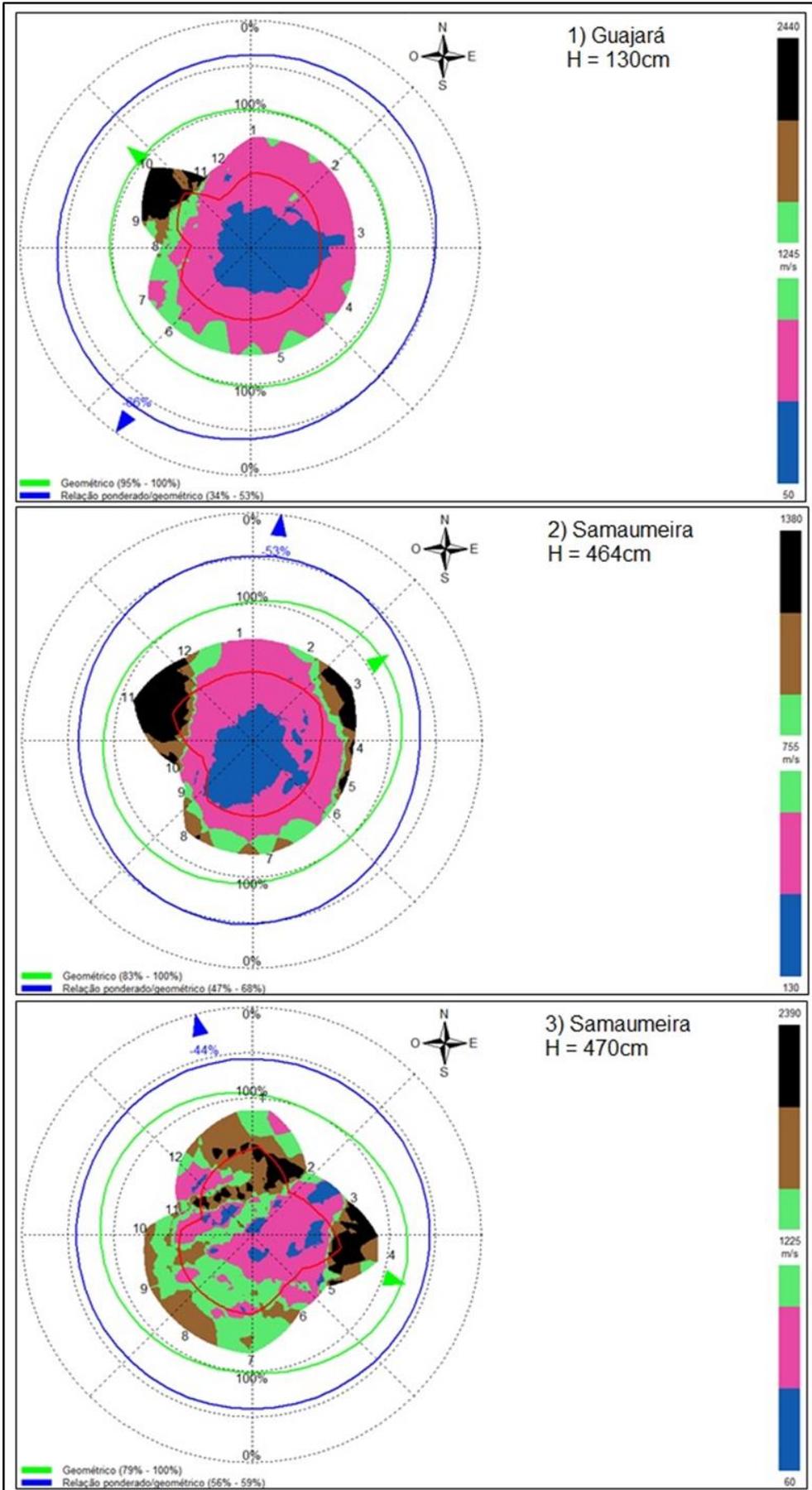


Figura 17 – Imagens tomográficas das árvores 4, 5 e 6

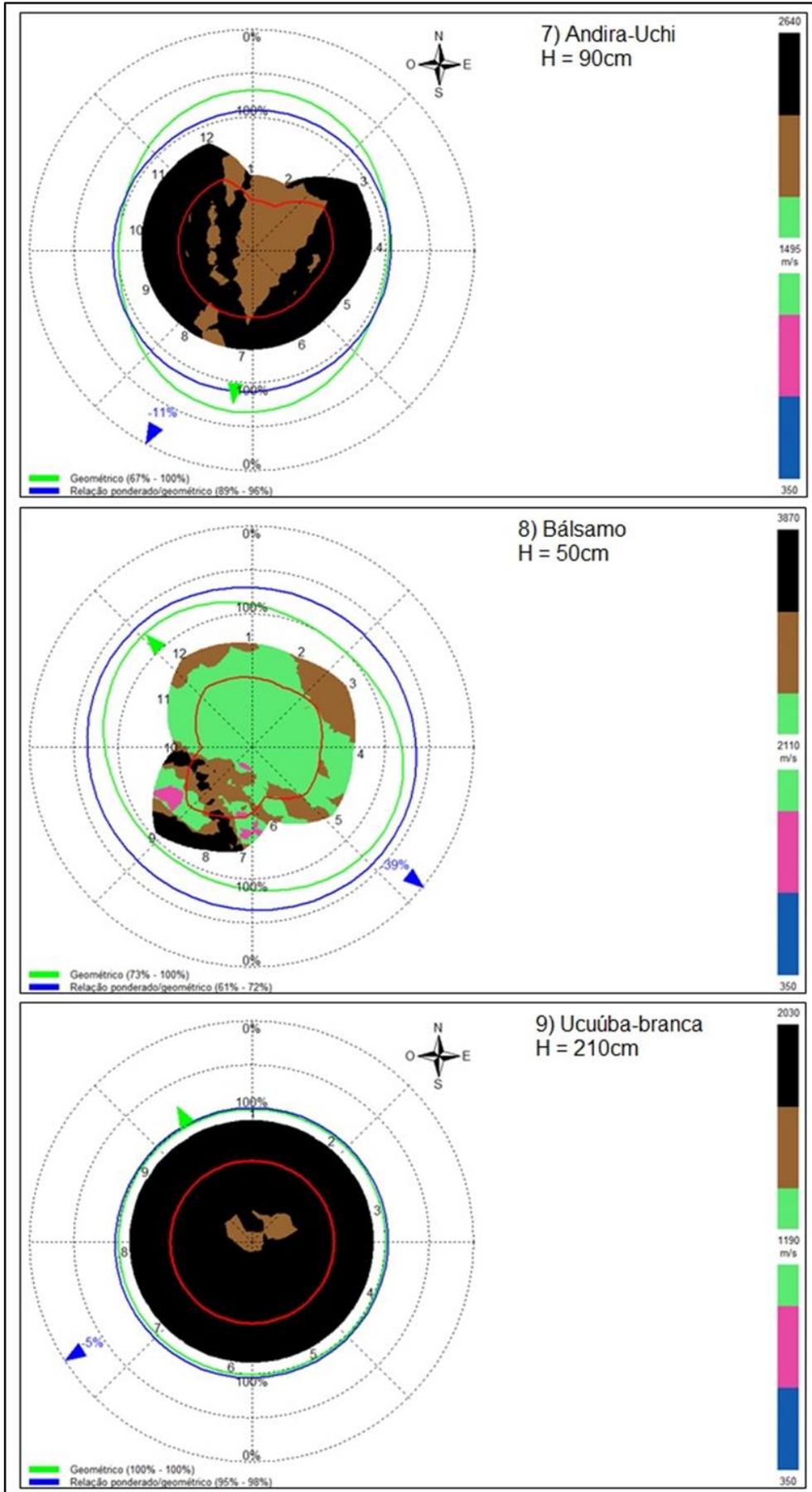


Figura 18 – Imagens tomográficas das árvores 7, 8 e 9

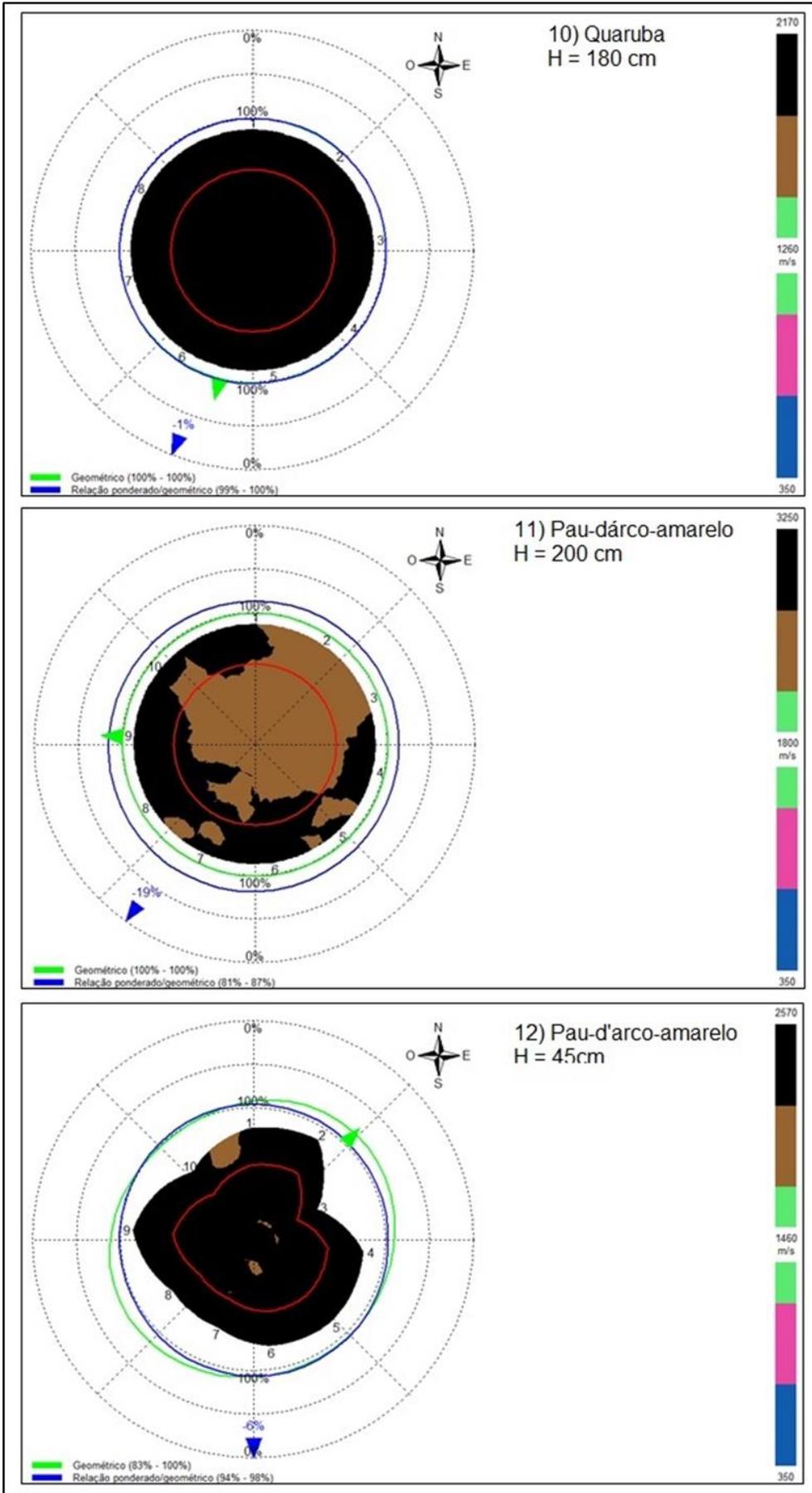


Figura 19 – Imagens tomográficas das árvores 10, 11 e 12

H representa a altura em que os sensores foram alocados, o que variou de árvore para árvore pois representa o ponto de maior fragilidade mecânica, e por isso, o mais significativo para cada árvore em si para a avaliação do risco de queda por ruptura do tronco.

A barra vertical de cores representa as classes de velocidades, indo da mínima até a máxima. É importante frisar que isso não representa uma escala de qualidade da madeira, com os valores mínimos representando deterioração e cavidades no lenho, e os valores máximos representando lenho intacto e de alta qualidade. Para todas as imagens tomográficas, considerou-se a velocidade máxima como aquela observada para cada um dos indivíduos. No que tange à velocidade mínima, consideremos o seguinte: a velocidade de propagação do som no ar gira em torno de 350 m/s; assim, podemos afirmar que abaixo desse valor existe madeira friável, com algum grau de deterioração, ou com ocos. Portanto, o valor de velocidade mínima considerado foi 350 m/s para aquelas árvores que apresentavam valores mínimos acima deste. Somente as três primeiras árvores apresentavam velocidade mínima abaixo de 350 m/s, sendo mantidos esses valores. Consideremos também que valores próximos a 1200 m/s denotam boa qualidade do lenho, e valores da ordem de 1800 m/s ou superiores denotam lenho de alta qualidade e sem perda de resistência biomecânica. O software permite que os valores mínimos e máximos sejam ajustados livremente, mas isso também modifica o gráfico biomecânico, podendo levar a conclusões errôneas a respeito da perda de resistência da árvore.

A linha vermelha no interior da seção transversal indica a espessura da parede residual (hipotética), expressa como 33% (t/r), não interferindo nas medições, mas apenas servindo como orientação na avaliação das imagens tomográficas. A linha verde indica a perda de resistência biomecânica devido unicamente à forma geométrica da seção. A linha azul indica a proporção entre a perda de resistência por deterioração do lenho ou outras injúrias e a linha verde, resultando na perda de resistência biomecânica total e indicando a direção de maior fragilidade.

Cabe aqui uma ressalva. O gráfico mecânico somente considera esforços de tensão e compressão, desconsiderando aqueles provenientes de torção.

Ao observar imagens tomográficas, fica evidente que as árvores de maior risco ou então mais vulneráveis são aquelas representadas na Figura 16, ou seja, o Guajará (1) e as duas Samaumeiras (2 e 3). O Guajará apresenta uma perda de resistência biomecânica de 66%, o que é bastante considerável, com indicação para o

sudoeste. Ou seja, ventos fortes que sopram de nordeste podem ter efeitos bastante graves sobre esta árvore. Interessantíssimo notar, porém, que há tecidos bastante íntegros circundando a região de maior fragilidade, como que em resposta biomecânica à perda de resistência, numa tentativa da árvore em compensar-se. Assim, devem ser mantidas as precauções quanto a queda de galhos e uma medida muito importante seria uma amarração dos galhos primários, por meio de cabos.

As Samaumeiras também apresentam uma perda de resistência biomecânica considerável. A Samaumeira de número 2 apresenta uma perda de resistência de 53%, indicando para a direção norte. Felizmente, os ventos que sopram de sul são raros em Belém-PA. A imagem tomográfica mostra um expressivo oco na região central, porém é possível observar uma parede de tecidos íntegros circundando este oco quase em sua totalidade. Já a Samaumeira de número 3 apresenta uma condição um pouco melhor. Seu gráfico acusa uma perda de resistência biomecânica de 44%, indicando também para a direção norte, um pouco noroeste. Levando em conta que as velocidades representam as peças-chave para a avaliação do estado do lenho, uma vez que estão relacionadas com a densidade e a elasticidade da madeira, elas variam de acordo com a espécie arbórea e até mesmo dentro de uma mesma espécie. Isso é um fato curioso que se pode notar quando da comparação entre as duas imagens tomográficas dessa mesma espécie, a Samaumeira. Enquanto o indivíduo 2 apresenta velocidades entre 130 e 1380 m/s, o indivíduo 3 apresenta velocidades entre 60 e 2390 m/s. O valor máximo do primeiro, indicando um bom tecido, representa valores medianos do segundo. Daí conclui-se que a Samaumeira 3 apresenta pequenas regiões ocas ou mais friáveis, mas a maior parte de seu tecido é bem íntegro.

As árvores apresentadas na Figura 17 são a Tacacazeira (4), o Cedro (5) e a Castanha-do-Pará (6), que apresentam perdas de resistência muito baixas, respectivamente 11%, 8% e 2%. As duas primeiras apresentam um tecido menos denso no interior, mas com o restante em ótimas condições. Já na última isso é muito pouco expressivo, denotando quase que inexistência de perda de resistência biomecânica.

A Figura 18 apresenta as imagens tomográficas para a Andira-uchi (7), o Bálsamo (8) e a Ucuúba-branca (9). A Andira-uchi apresenta perda de resistência biomecânica de 11% e a Ucuúba-branca de 5%, valores estes pouco expressivos. Já o Bálsamo apresentou perda de resistência de 39%. Novamente, é preciso olhar

para isso com cautela. Por exemplo, áreas coloridas em verde representam velocidades próximas a 2110 m/s. Esses valores são superiores aos valores máximos observados para a Ucuúba-branca, estando esta em perfeito estado. Mesmo que sejam espécies diferentes, uma velocidade daquela ordem representa tecidos em boa condição.

Por fim, as imagens tomográficas para a Quaruba (10) e os dois Paus-d'arco- amarelos (11 e 12) estão representados na Figura 19. A Quaruba e o Pau-d'arco- amarelo 12 estão em perfeitas condições biomecânicas, uma vez que a perda de resistência é, respectivamente, 1% e 5%. O Pau-d'arco-amarelo 11 apresenta perda de resistência biomecânica de 19%, indicando para a região sudeste. Entretanto, não se verifica a presença de ocos ou cavidades, e perdas de resistência da ordem de 50% é que se tornam de fato muito graves. Mais uma vez se pode observar que mesmo entre uma mesma espécie, agora no caso o Pau-d'arco-amarelo, as velocidades de propagação do impulso variam consideravelmente, por exemplo, velocidade máxima de 3250 m/s para o 11 e 2570 m/s para o 12, representadas pela mesma cor (preto).

As árvores realmente mais preocupantes pela sua perda de resistência biomecânica e possível ruptura do tronco se submetidas a ventos fortes são, nessa ordem, o Guajará, a Samaumeira 2 e a Samaumeira 3. Isso não significa que as outras árvores estejam isentas de risco. Dependendo da força dos ventos e de fragilidades na região radicular, pode acontecer um 'efeito vela', onde as árvores tombam inteiras.

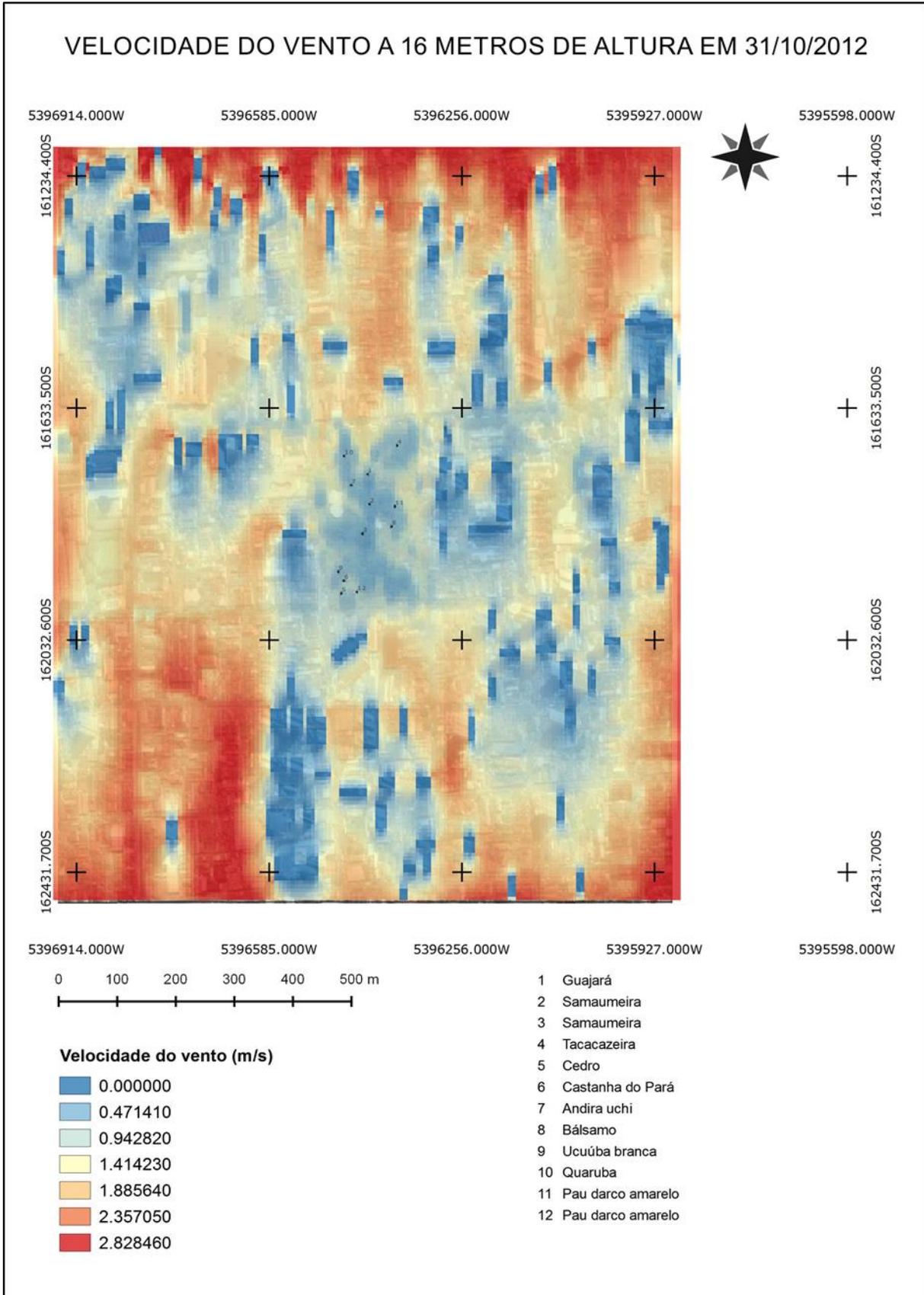
É importante ressaltar que devido às propriedades físicas e anatômicas da madeira, as imagens tomográficas são meras reconstruções da condição mecânica interna da árvore. Por isso, não devem ser usadas como única fonte de embasamento para tomada de decisões no que concerne à avaliação da estabilidade mecânica da árvore, devendo ser usadas em conjunto com outros dados coletados.

4.2 Simulação dos ventos

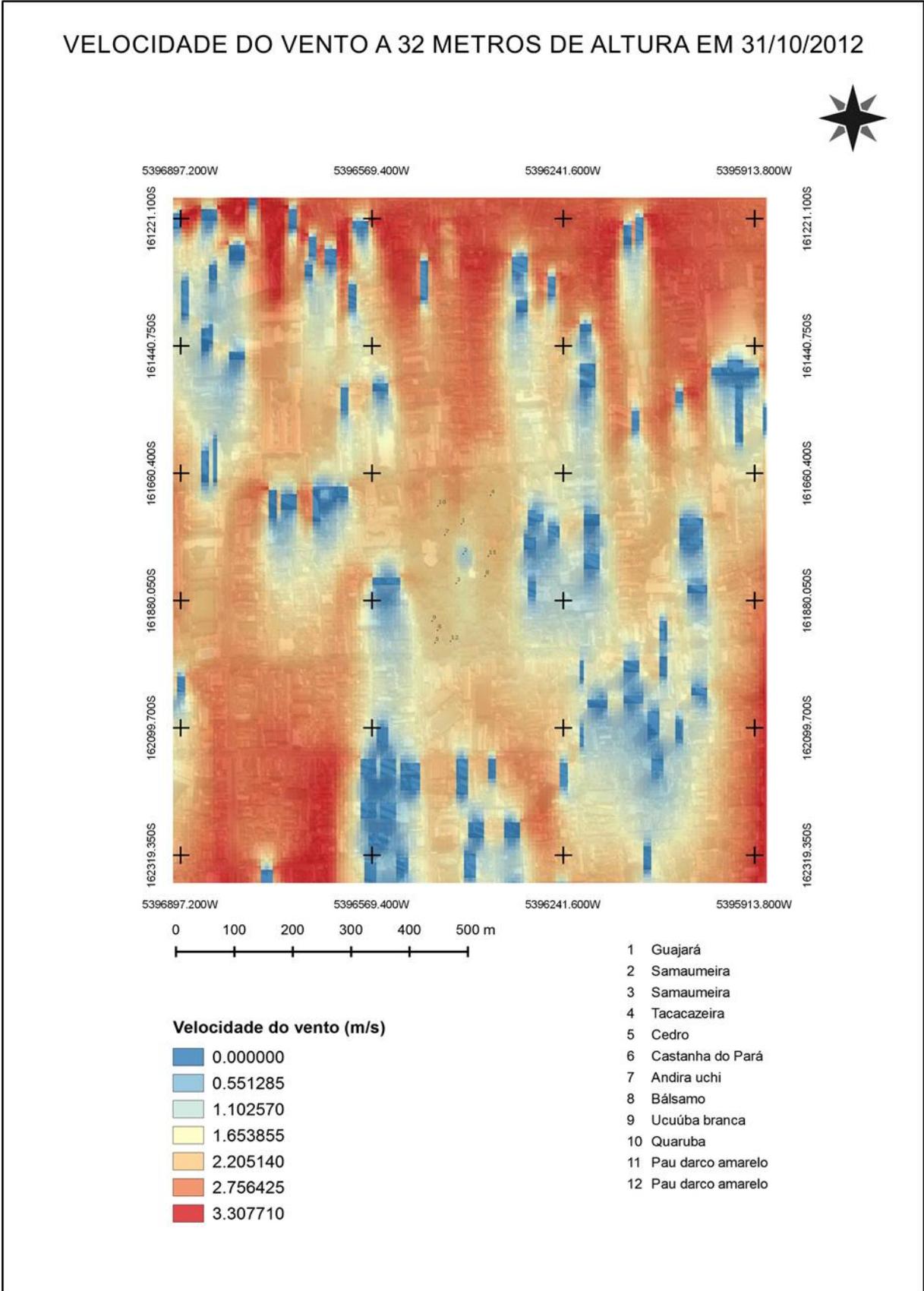
Considerou-se duas alturas, 16 e 32 metros, para a visualização dos resultados da simulação dos ventos nas datas consideradas. Através do visualizador de mapas LEONARDO, os resultados de velocidades dos ventos na área de estudo, para cada data e alturas, puderam ser disponibilizados na forma de arquivos com extensão .Dat. Esses arquivos foram então usados no QGIS versão 2.8.2 para que pudessem

ser georreferenciados, através da ferramenta georreferenciar, a partir da imagem da área de estudo já previamente georreferenciada, também utilizando coordenadas de canto, datum WGS84 e sistema de coordenadas UTM fuso 22S, resultando em 8 arquivos com extensão .tif, contendo as informações sobre a velocidade dos ventos. Esses arquivos, juntamente com o arquivo da imagem da área de estudo e com o arquivo da localização das copas das árvores tomografadas, foram então reunidos e sobrepostos através do QGIS versão 2.8.2, para a composição de uma imagem onde realmente fosse possível identificar pontos de aceleração dos ventos, ou regiões de turbulência, sobre as árvores estudadas ou em suas imediações, cumprindo com o objetivo proposto. Para a composição dessas imagens finais, considerou-se a imagem da área de estudo como base, com extensão .tif, representando a camada raster inicial. Sobreposta a ela, foi inserido o arquivo de localização das árvores, com extensão .shp (arquivo do tipo shape), representando uma camada vetor. E por fim foi inserida a imagem contendo as informações da velocidade dos ventos, com extensão .tif, também como uma camada raster. A transparência dessas três camadas foi então ajustada para que todas pudessem estar visíveis. Assim, foram gerados 8 mapas, contendo todas as informações para a visualização da ação dos ventos na área de estudo.

Os Mapas 1 e 2 representam a simulação dos ventos para 31/10/2012, sendo o primeiro a 16 metros de altura e o segundo a 32 metros de altura. Os Mapas 3 e 4 exibem a simulação dos ventos para 02/11/2012, sendo o primeiro a 16 metros de altura e o segundo a 32 metros de altura. Os Mapas 5 e 6 representam a simulação dos ventos para 20/01/2015, sendo o primeiro a 16 metros de altura e o segundo a 32 metros de altura. E por fim, os Mapas 7 e 8 exibem a simulação dos ventos para 01/02/2015, sendo o primeiro a 16 metros de altura e o segundo a 32 metros de altura.

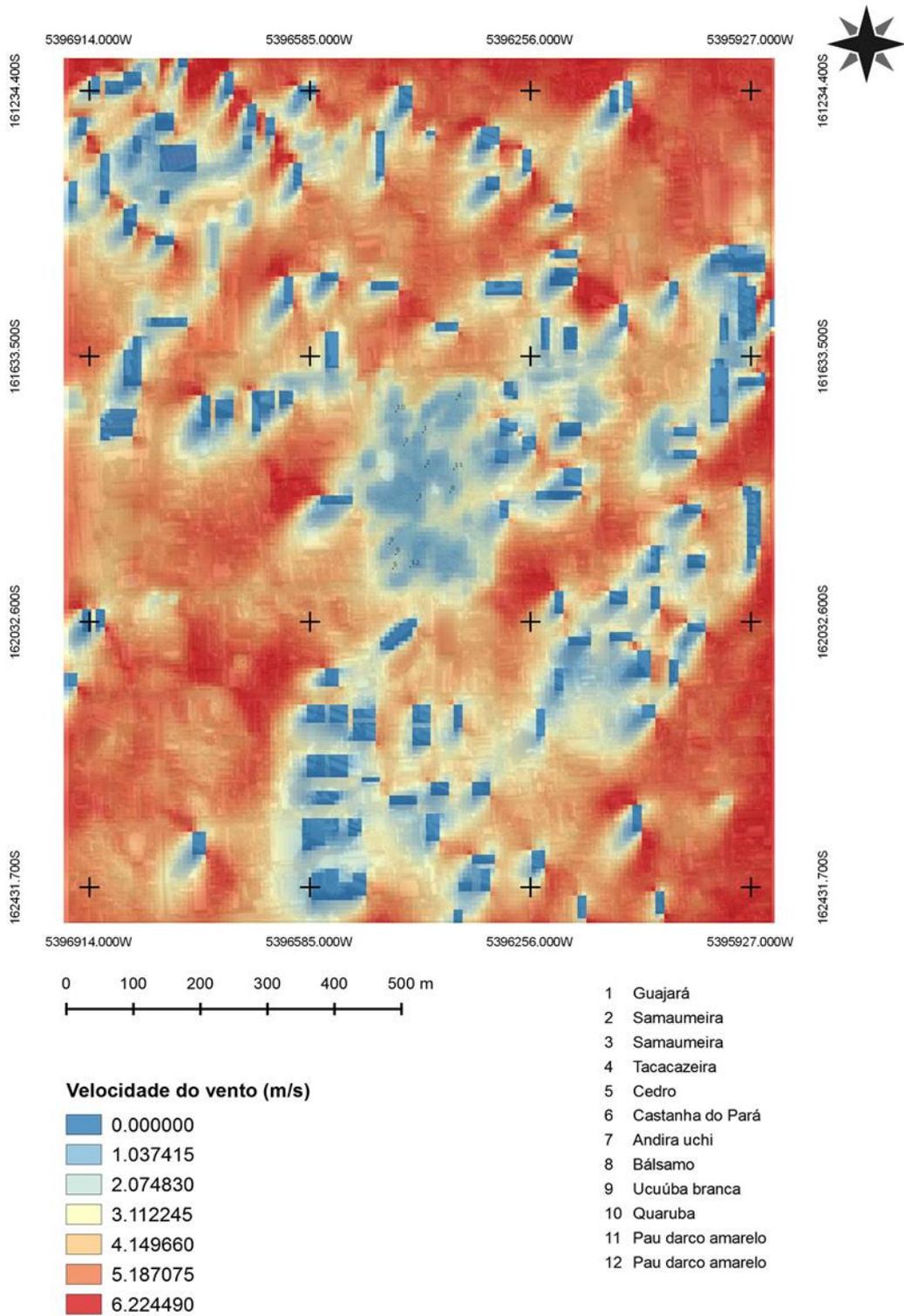


Mapa 1 – Simulação do vento a 16 metros de altura em 31/10/2012

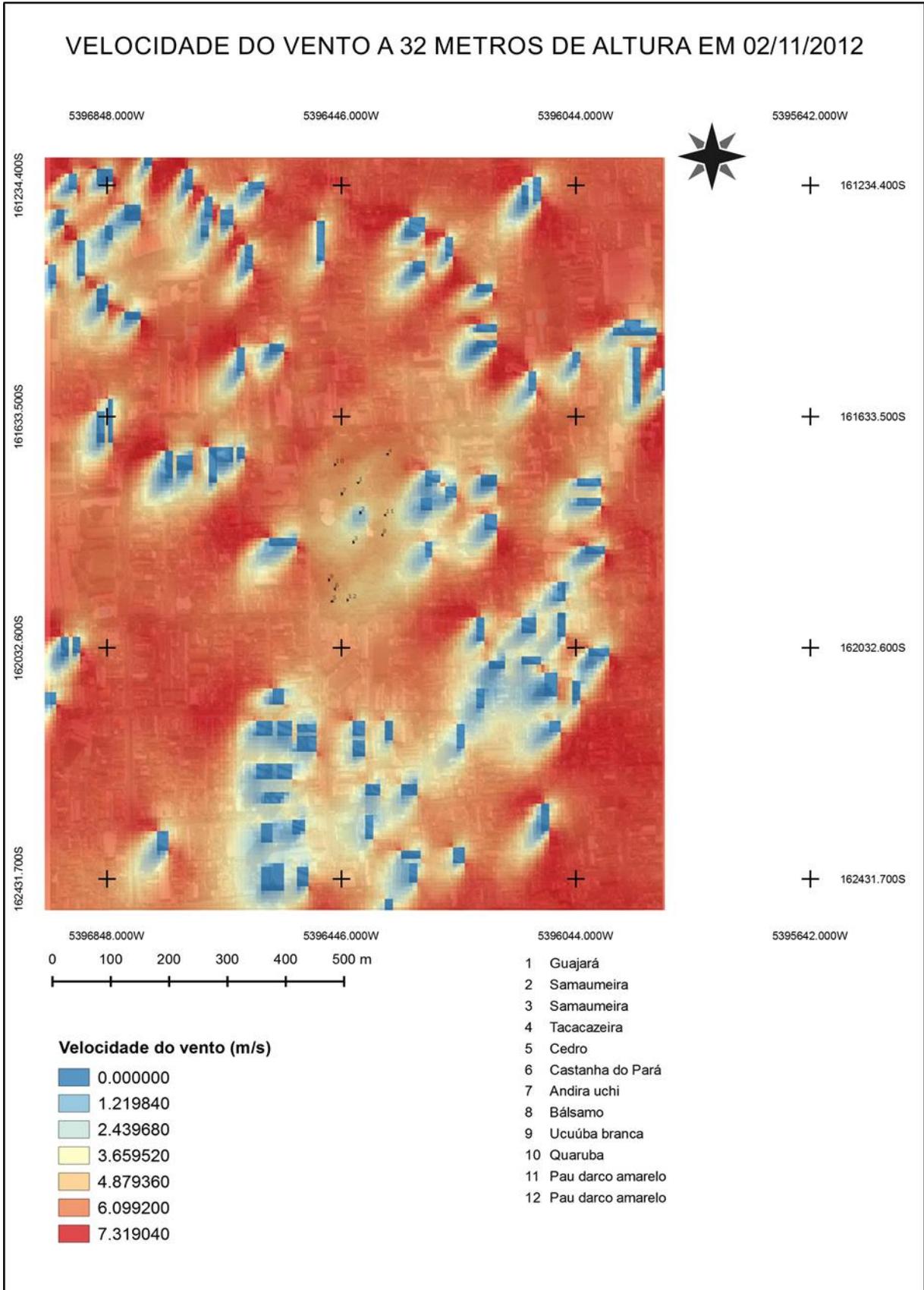


Mapa 2 – Simulação do vento a 32 metros de altura em 31/10/2012

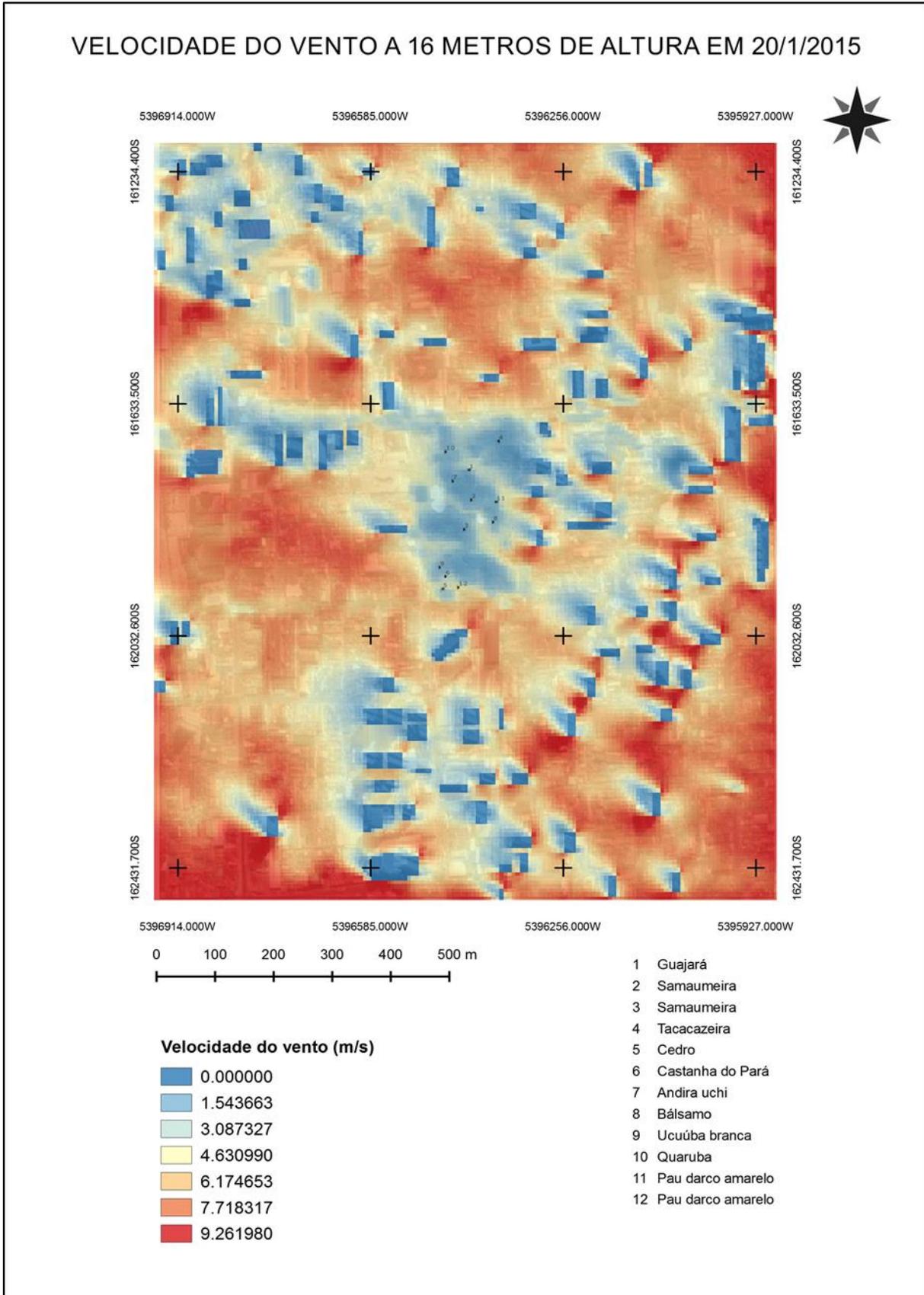
VELOCIDADE DO VENTO A 16 METROS DE ALTURA EM 02/11/2012



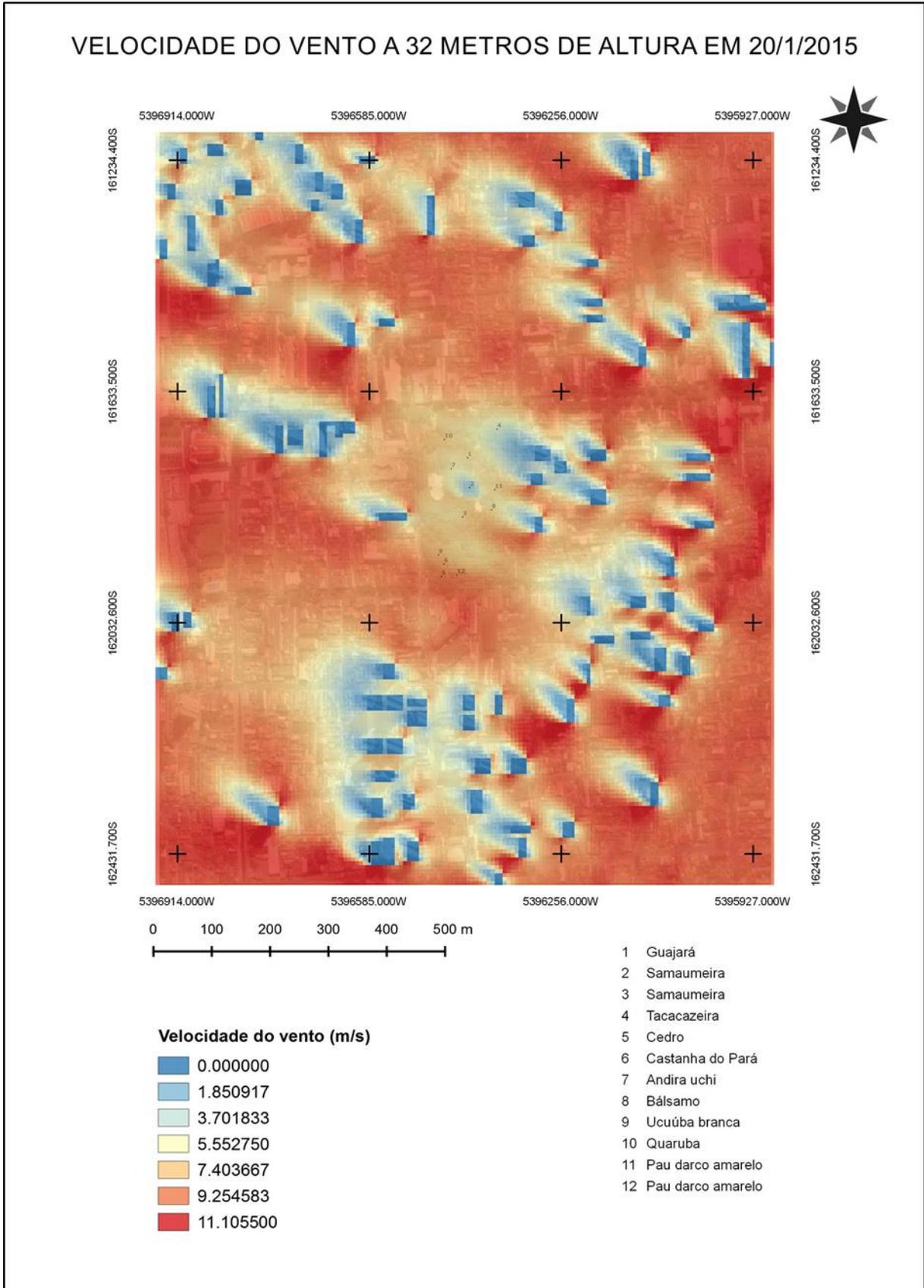
Mapa 3 – Simulação do vento a 16 metros de altura em 02/11/2012



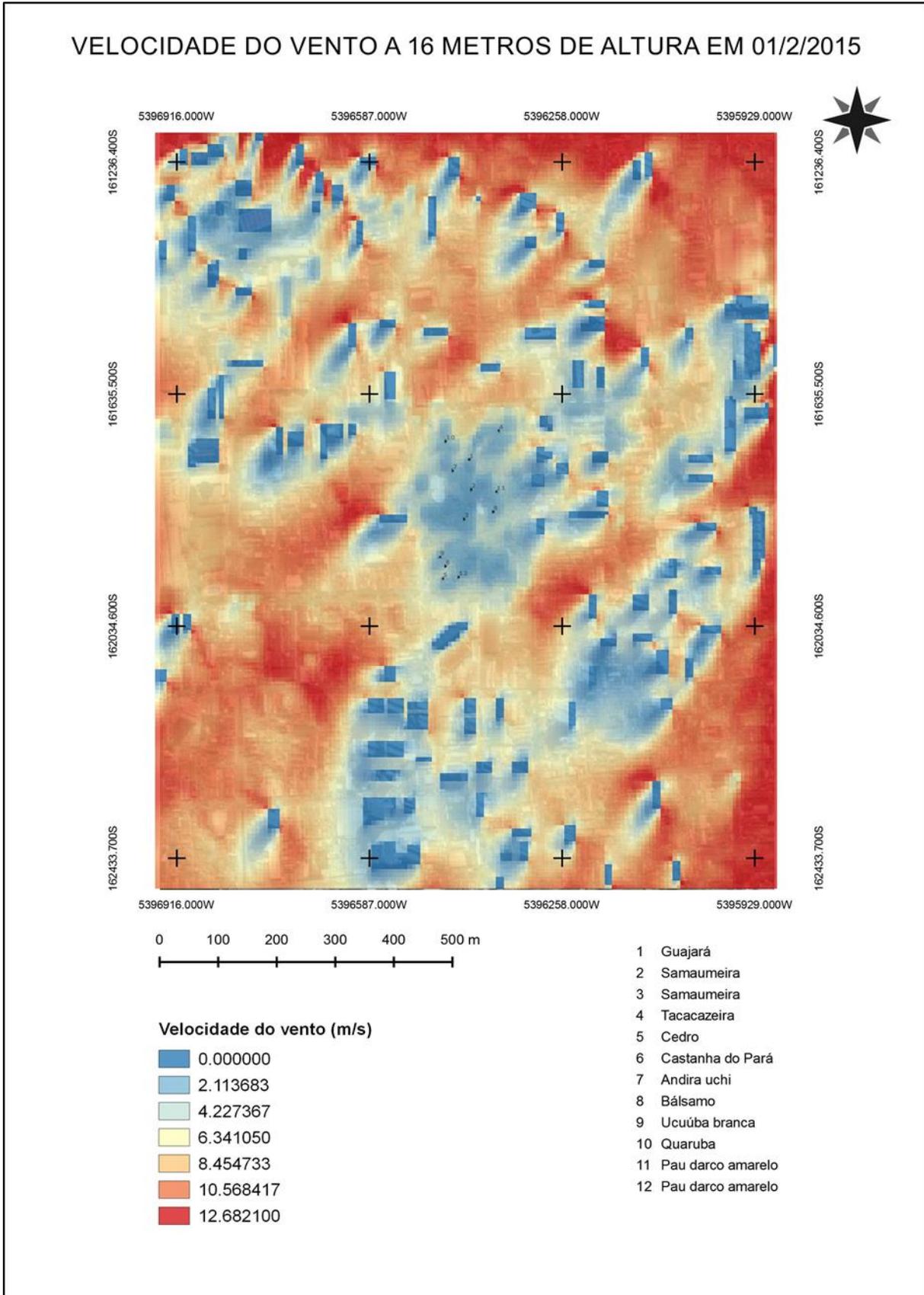
Mapa 4 – Simulação do vento a 32 metros de altura em 02/11/2012



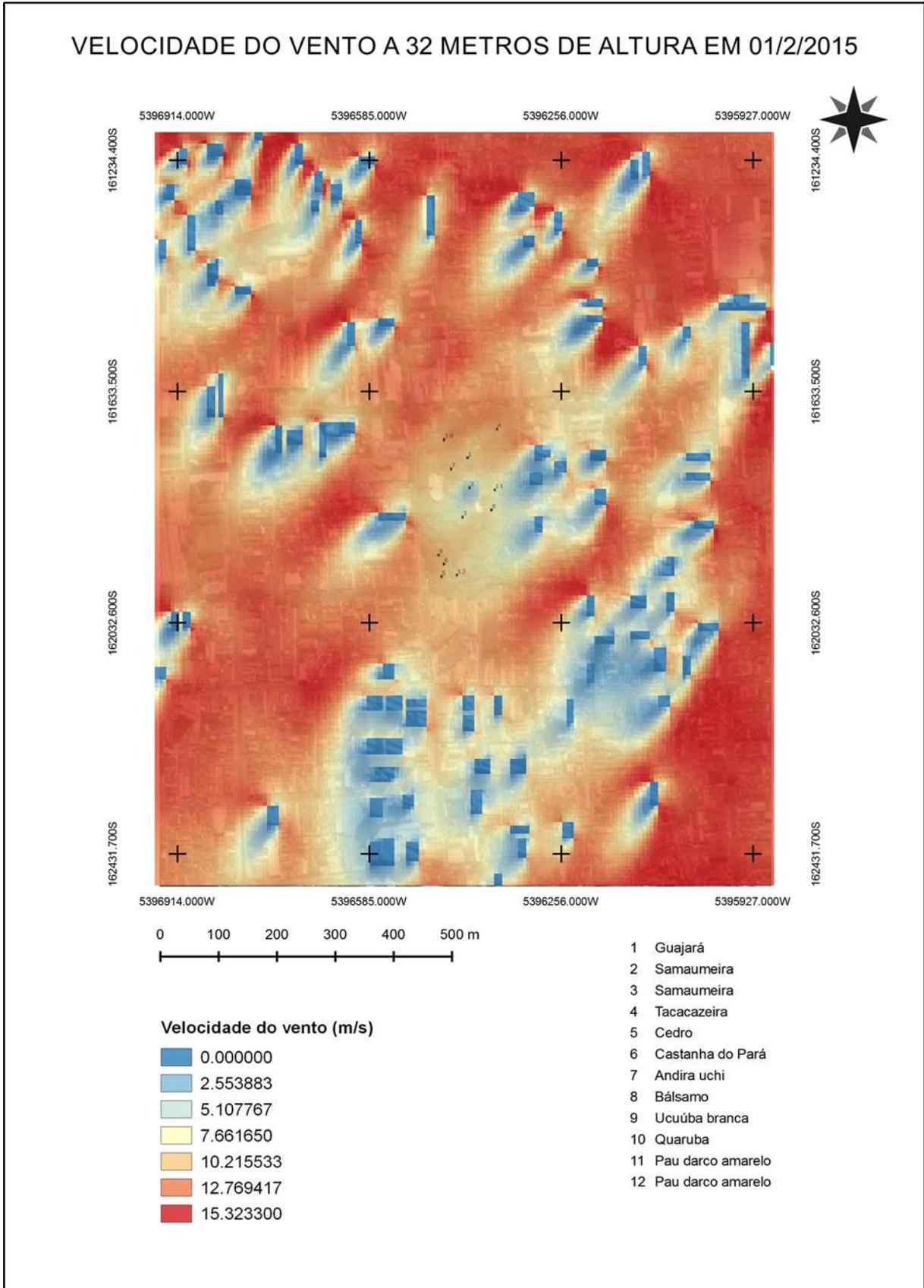
Mapa 5 – Simulação do vento a 16 metros de altura em 20/01/2015



Mapa 6 – Simulação do vento a 32 metros de altura em 20/01/2015



Mapa 7 – Simulação do vento a 16 metros de altura em 01/02/2015



Mapa 8 – Simulao do vento a 32 metros de altura em 01/02/2015

Em todos os mapas apresentados, é possível perceber claramente a rugosidade urbana interferindo na ação dos ventos e de qual direção sopram esses ventos. A região do Parque Zoobotânico, que fica bem centralizada nas imagens, aparece sempre, e principalmente nos mapas de 16 metros, como uma zona onde não imperam os ventos mais fortes, aqueles representados pela cor vermelha. Isso pode acontecer devido à rugosidade urbana atuar, de certo modo, como uma barreira para a ação dos ventos mais fortes que atingiriam o Parque. Entretanto, essa mesma rugosidade também propicia o aparecimento de zonas de turbulência no interior do Parque, sendo facilmente encontradas através da mudança de cores que representam a velocidade dos ventos. Pois bem, quando uma velocidade de vento mais baixa se encontra com uma mais alta, aí ocorre uma zona de turbulência, cuja intensidade é diretamente proporcional à velocidade dos ventos.

Os dois primeiros mapas representam os ventos mais amenos para input no software, sendo gerados a partir de uma velocidade de 2,7 m/s. É possível perceber claramente a rugosidade urbana interferindo na ação desse vento vindo de norte. No Mapa 1, é possível perceber que embora as velocidades não sejam tão elevadas, ainda assim há a presença de zonas de turbulência sobre o Parque, originadas de ventos com velocidades entre 0,47 a 1,4 m/s, interferindo em todas as árvores se considerarmos a copa como um todo.

Para os mapas da simulação a 32 metros de altura (Mapas 2, 4, 6 e 8), é preciso considerar somente as árvores 1, 2, 3, 7 e 10, que por possuírem alturas acima de 16 metros sofrem a influência direta ou interferência indireta nesta altura estipulada. Verifica-se então que no Mapa 2, as árvores 1, 7 e 10 estão mais próximas de zonas de maior aceleração dos ventos, entre 1,65 a 2,75 m/s.

Os Mapas 3 e 4 representam uma velocidade de input de 6,3 m/s, vento soprando de nordeste. Quando observamos o Mapa 3, fica evidente que as árvores identificadas como 1, 5, 6, 9, 11 e 12 estão centralmente localizadas em pontos de turbulência, com a velocidade variando entre 1 a aproximadamente 5,2 m/s. Se levarmos em conta o diâmetro da copa como um todo, todas elas, de alguma maneira, sofrem a ação dessas turbulências. Ora, a árvore 1 representa o Guajará, que foi identificado como tendo uma perda de resistência biomecânica de 66% justamente para a direção que sopra esse vento, ou seja, sudoeste.

No Mapa 4, as árvores 1, 2, 3, 7 e 10 sofrem a ação de turbulências, velocidades entre 4,9 a 6,1 m/s. De novo, o Guajará figura entre essas árvores, juntamente com

as duas Samaumeiras, que apresentam elevada perda de resistência biomecânica, principalmente a 2, mas não indicando para o lado em que sopra esse vento, tornando-as menos vulneráveis.

Os Mapas 5 e 6 representam um vento soprando de sudeste, sendo a velocidade de entrada equivalente a 9,4 m/s. No Mapa 5, as árvores que mais diretamente estão sob influência de zonas de turbulência são a 1, 5, 6, 11 e 12. O Mapa 6 não apresenta significativas regiões de turbulência para as árvores que precisam ser consideradas.

Os Mapas 7 e 8 representam a maior velocidade de entrada para a simulação dos ventos, que foi de 13,4 m/s soprando de nordeste. São muito parecidos com os Mapas 3 e 4, pois o vento vem da mesma direção, diferindo apenas pelos valores de velocidades mais elevadas. Velocidades de vento maiores representam uma força maior atuando na copa das árvores e, portanto, capazes de uma maior influência na estabilidade biomecânica dessas árvores. Quando observamos o Mapa 7, fica também evidente que as árvores identificadas como 1, 5, 6, 9, 11 e 12 estão centralmente localizadas em pontos de turbulência, com as velocidades variando entre 2,1 a aproximadamente 6,3 m/s. Se levarmos em conta o diâmetro da copa como um todo, todas elas, de alguma maneira e em algum ponto, sofrem a ação dessas turbulências. No Mapa 8, as árvores 1, 2, 3, 7 e 10 sofrem a ação de turbulências, velocidades entre 7,6 a 12,7 m/s.

Levando em consideração os resultados obtidos com as imagens tomográficas e sabendo agora das zonas de turbulência influenciando a região do Parque Zoobotânico, pode-se concluir que o Guajará é a árvore que apresenta maior risco de queda por ruptura do tronco indicando para a região sudeste. Vale ressaltar que duas simulações representam ventos soprando de nordeste (02/11/12 e 01/02/15) e, portanto, para o sudeste. É importante mencionar que nesse evento do dia 02/11/2012, houve a queda de um dos galhos do Guajará. Essa árvore é a mais antiga do Parque, com idade aproximada de 142 anos, e representa o exemplar de onde a espécie foi descrita. Daí percebe-se o valor histórico dessa árvore. Entretanto, ela não se rompeu nem mesmo no evento de maior velocidade de vento, representado pelas simulações do dia 01/02/2015, mesmo com sua tomografia indicando 66% de perda de resistência biomecânica. Isso é intrigante, e daí suscitam duas coisas. A primeira, risco é possibilidade e não certeza absoluta. Árvores que possuem risco de queda elevado podem perdurar por anos. A segunda, é preciso

muita cautela na interpretação da imagem tomográfica, que requer um conhecimento aprofundado sobre formação e anatomia da madeira. A simples leitura da imagem tomográfica e da indicação de perda de resistência biomecânica podem levar a conclusões precipitadas e errôneas acerca da condição interna e estabilidade de uma árvore. Isso é muito perceptível na imagem tomográfica do Guajará, assim como nas imagens tomográficas da Tacacazeira, do Cedro e do Bálsamo. Recomenda-se então que esforços imediatos de manejo sejam dispensados ao Guajará, como a amarração dos galhos primários por meio de cabos, e que novas tomografias sejam realizadas a cada ano nas árvores objeto deste estudo, para acompanhar a evolução de pontos de maior fragilidade biomecânica e da condição interna do lenho.

Um outro ponto que merece destaque é que mesmo que uma árvore não apresente fragilidades no tronco, como cavidades ou indícios de deterioração do lenho reduzindo sua resistência biomecânica, ela não está isenta do risco e queda. Dependendo da intensidade dos ventos e das condições do sistema radicular, pode ocorrer tombamento. Por isso é importante prezar por não danificar as raízes das árvores, uma vez que sua estabilidade pode ser fortemente comprometida. O objetivo deste estudo não era avaliar a perda de resistência biomecânica das árvores do Parque por debilidade do sistema radicular, mas a identificação das zonas de turbulência pode indicar também quais árvores estão mais suscetíveis à ação dos ventos em suas copas e, portanto, mais vulneráveis a qualquer tipo de dano.

Por fim, salienta-se que as turbulências identificadas na região o Parque Zoobotânico são consequência da modificação da rugosidade urbana. Como essa rugosidade é modificada com muita rapidez, por exemplo pela construção de grandes edifícios, as árvores sofrem ainda mais com essas turbulências pois cresceram se adaptando a outras condições. Soma-se a isso o efeito de ressonância, onde a elasticidade da madeira se junta à intensidade da direção do vento, impactando os galhos tão fortemente que daí advém uma queda.

5 CONCLUSÃO

Através dos mapas elaborados, pode-se concluir que a simulação do comportamento dos ventos efetuada pelo ENVI-met foi capaz de identificar adequadamente zonas de turbulência que interferem nas árvores. Embora tenham um caráter retroativo, pois representam situações reais já ocorridas, as simulações podem identificar padrões de turbulência sobre determinada região (quando consideramos meramente a direção dos ventos) ou então servir para detectar padrões de ventos que assolam essas regiões quando da ocasião de tempestades ou vendavais. Quando as simulações são combinadas com a técnica da tomografia de impulso, a avaliação do risco de queda de árvores se torna mais precisa e cuidadosa, favorecendo ações pontuais de manejo e assim diminuindo o impacto de eventos futuros.

REFERÊNCIAS

- AKBARI, H. Shade trees reduce building energy use and CO² emissions from power plants. **Environmental Pollution**, Oxford, v. 116, p. 119-126, Mar. 2002. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749101002640>>. Acesso em: 08 ago. 2015.
- AKBARI, H.; TAHA, H. The impact of trees and white surfaces on residential heating and cooling energy use in four Canadian cities. **Energy**, London, v. 17, p. 141-149, 1992. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360544292900636>>. Acesso em: 08 ago. 2015.
- BERTO, R. Exposure to restorative environments helps restore attentional capacity. **Journal of Environmental Psychology**, London, v. 25, p. 249-259, Sept. 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272494405000381>>. Acesso em: 24 jun. 2015.
- BRACK, C.L. Pollution mitigation and carbon sequestration by an urban forest. **Environmental Pollution**, Oxford, t v. 116, p. 195-200, Mar. 2002. Disponível em: <<http://www.elsevier.nl/inca/publications/store/4/1/8>>. Acesso em: 08 ago. 2015.
- BROWN, K.S.; FREITAS, A.V.L. Butterfly communities of urban forest fragments in Campinas, Sao Paulo, Brazil: structure, instability, environmental correlates, and conservation. **Journal of Insect Conservation**, Dordrecht, v. 6, p. 217–231, 2002. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1023/A%3A1024462523826>>. Acesso em: 08 ago. 2015.
- BRUSE, M. **ENVI-met 3.1**: online manual. 2009. Disponível em: <<http://www.envi-met.com/>>. Acesso em: 29 abr. 2015.
- BUCUR, V. **Urban forest acoustics**. Leipzig: Springer-Verlag, 2006. 181 p.
- CARREIRO, M.M. Introduction: the growth of cities and urban forestry. In: CARREIRO, M.M.; SONG, Y.C.; WU, J. (Ed.). **Ecology, planning, and management of urban forests: international perspectives**. New York: Springer Science+Business Media, 2008. chap. 1, p. 3-9.
- CHIABRANDO, R.; FABRIZIO, E.; GARNERO, G. The territorial and landscape impacts of photovoltaic systems: definition of impacts and assessment of the glare risk. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 13, p. 2441-2451, Dec. 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109001026>>. Acesso em: 08 ago. 2015.

- DONOVAN, G.H.; BUTRY, D.T. Trees in the city: valuing street trees in Portland, Oregon. **Landscape and Urban Planning**, Amsterdam, v. 94, p. 77-83, Feb. 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204609001674>>. Acesso em: 08 ago. 2015.
- DREISTADT, S.H.; DAHLSTEN, D.L.; FRANKIE, G.W. Urban Forests and Insect Ecology. **BioScience**, Cary, v. 40, p. 192-198, 1990. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/1311364>>. Acesso em: 24 jun. 2015.
- EDWARDS, T.; GALE, T. Trees in paving. In: FIELDHOUSE, K.; HITCHMOUGH, J. (Ed.). **Plant user handbook: a guide to effective specifying**. Delhi: Blackwell Science, 2004. chap. 11, p. 143-151.
- ESCOBEDO, F.J.; NOWAK, D.J. Spatial heterogeneity and air pollution removal by an urban forest. **Landscape and Urban Planning**, Amsterdam, v. 90, p. 102-110, Apr. 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204608001801>>. Acesso em: 08 ago. 2015.
- GEORGI, N.J.; ZAFIRIADIS, K. The impact of park trees on microclimate in urban areas. **Urban Ecosystems**, New York, v. 9, p. 195-209, Sept. 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11252-006-8590-9>>. Acesso em: 08 ago. 2015.
- GUSTAVSSON, R.; HERMY, M.; KONIJNENDIJK, C.; STEIDLE-SCHWAHN, A. Management of urban woodland and parks: searching for creative and sustainable concepts. In: KONIJNENDIJK, C.C.; NILSSON, K.; RANDRUP, T.B.; SCHIPPERIJN, J. (Ed.). **Urban forests and trees: a reference book**. Amsterdam: Springer-Verlag, 2005. chap. 13, p. 369-397.
- HELDEN, A.H.; STAMP, G.C.; LEATHER, S.R. Urban biodiversity: comparison of insect assemblages on native and non-native trees. **Urban Ecosystems**, New York, v. 15, p. 611-624, 2012.
- JIM, C.Y.; CHEN, W.Y. Perception and attitude of residents toward urban green spaces in Guangzhou (China). **Environmental Management**, New York, v. 38, p. 338-349, Sept. 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00267-005-0166-6>>. Acesso em: 08 ago. 2015.
- JOHNSTON, M.; HIRONS, A. Urban trees. In: GEOFFREY, R.; DIXON, G.R.; DAVID, E.; ALDOUS, D.E. **Horticulture: plants for people and places; environmental horticulture**. Amsterdam: Springer Science+Business Media, 2014. chap. 20, p. 693-711.
- KAPLAN, S. The restorative benefits of nature: toward an integrative framework. **Journal of Environmental Psychology**, London, v. 15, p. 169-182, Sept. 1995. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0272494495900012>>. Acesso em: 24 jun. 2015.

KONIJNENDIJK, C.C.; NILSSON, K.; RANDRUP, T.B.; SCHIPPERIJN, J. (Ed.). **Urban forests and trees: a reference book**. Amsterdam: Springer-Verlag, 2005. 520 p.

KUO, F.E. The role of arboriculture in a healthy social ecology. **Journal of Arboriculture**, Champaign, v. 29, p. 148-155, 2003.

LINDENMAYER, D.B.; CUNNINGHAM, R.B.; TANTON, M.T.; SMITH, A.P. The conservation of arboreal marsupials in the montane ash forests of the Central Highlands of Victoria, south-east Australia: II. The loss of trees with hollows and its implications for the conservation of leadbeater's possum *Gymnobelideus leadbeateri* McCoy (marsupialia: petauridae). **Biological Conservation**, Amsterdam, v. 54, p. 133–145, 1990.

LINTOTT, P.R.; BUNNEFELD, N.; FUENTES-MONTEMAYOR, E.; MINDERMAN, J.; BLACKMORE, L.M.; GOULSON, D.; PARK, K.J. Moth species richness, abundance and diversity in fragmented urban woodlands: implications for conservation and management strategies. **Biodiversity and Conservation**, Dordrecht, v. 23, p. 2875–2901, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10531-014-0753-z>>. Acesso em: 24 jun. 2015.

MATHENY, N.P.; CLARK, J.R. **A photographic guide to the evaluation of hazard trees in urban areas**. 2nd ed. Champaign: International Society of Arboriculture, 1994. 85 p.

MATTHECK, C.; BRELOER, H. **The body language of trees: a handbook for failure analysis**. 3rd ed. London: HMSO Publications Centre, 1994. 239 p.

McKINNEY, M.L. Urbanization, biodiversity, and conservation. **BioScience**, Cary, v. 52, p. 883-890, Oct. 2002.

_____. Urbanization as a major cause of biotic homogenization. **Biological Conservation**, Amsterdam, v. 127, p. 247-260, 2006.

McPHERSON, E.G.; NOWAK, D.; HEISLER, G.; GRIMMOND, S.; SOUCH, C.; GRANT, R.; ROWNTREE, R. Quantifying urban forest structure, function, and value: the Chicago Urban Forest Climate Project. **Urban Ecosystems**, New York, v. 1, p. 49-61, 1997. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1023/A%3A1014350822458>>. Acesso em: 08 ago. 2015.

MEIER, F.; SCHERER, D. Spatial and temporal variability of urban tree canopy temperature during summer 2010 in Berlin, Germany. **Theoretical and Applied Climatology**, Vienna, v. 110, p. 373-384, Dec. 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00704-012-0631-0>>. Acesso em: 08 ago. 2015.

MORO, M.F.; WESTERKAMP, C.; ARAÚJO, F.S. de. How much importance is given to native plants in cities' treescape?: a case study in Fortaleza, Brazil. **Urban Forestry & Urban Greening**, Munich, v. 13, p. 365-374, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1618866714000090>>. Acesso em: 08 ago. 2015.

MORTIMER, M.J.; KANE, B. Hazard tree liability in the United States: uncertain risks for owners and professionals. **Urban Forestry & Urban Greening**, Munich, v. 2, p. 159-165, 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1618866704700321>>. Acesso em: 24 jun. 2015.

NEWTON, I. The role of nest sites in limiting the numbers of hole-nesting birds: a review. **Biological Conservation**, Amsterdam, v. 70, p. 265-276, 1994.

NILSSON, K.; KONIJNENDIJK, C.C.; NIELSEN, A.B. Urban forest function, design and management. In: LOFTNESS, V.; HAASE, D. (Ed.). **Sustainable built environments**. New York: Springer Science+Business Media, 2013. p. 701-718.

NORRIS, M. **Tree risk assessments: what works – what does not – can we tell?** 2007. Disponível em: <http://unri.org/ECO%20697U%20S14/norris_tree_risk_assessments.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2015.

NOWAK, D.J.; CRANE, D.E.; STEVENS, J.C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. **Urban Forestry & Urban Greening**, Munich, v. 4, p. 115-123, Apr. 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1618866706000173>>. Acesso em: 08 ago. 2015.

RANDRUP, T.B.; KONIJNENDIJK, C.; DOBBERTIN, M.K.; PRÜLLER, R. The concept of urban forestry in Europe. In: KONIJNENDIJK, C.C.; NILSSON, K.; RANDRUP, T.B.; SCHIPPERIJN, J. (Ed.). **Urban forests and trees: a reference book**. Amsterdam: Springer-Verlag, 2005. chap. 1, p. 9-22.

RANIUS, T. Influence of stand size and quality of tree hollows on saproxylic beetles in Sweden. **Biological Conservation**, Amsterdam, v. 103, p. 85-91, 2002.

SANDER, H.; POLASKY, R.G.; HAIGHT, G. The value of urban tree cover: a hedonic property price model in Ramsey and Dakota Counties, Minnesota, USA. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 69, p. 1646-1656, June 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800910001072>>. Acesso em: 08 ago. 2015.

SOARES, A.L.; REGO, F.C.; McPHERSON, E.G.; SIMPSON, J.R.; PEPER, P.J.; XIAO, Q. Benefits and costs of street trees in Lisbon, Portugal. **Urban Forestry & Urban Greening**, Munich, v. 10, p. 69-78, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1618866710000841>>. Acesso em: 08 ago. 2015.

SJÖMAN, H.; ÖSTBERG, J.; BÜHLER, O. Diversity and distribution of the urban tree population in ten major Nordic cities. **Urban Forestry & Urban Greening**, Munich, v. 11, p. 31-39, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1618866711000720>>. Acesso em: 08 ago. 2015.

SUDAM; EMBRAPA. **Estudos climáticos do Estado do Pará, classificação climática (Köppen) e deficiência hídrica (Thornthwaite, Matter)**. Belém, 1993. 53 p.

TYRVÄINEN, L.; PAULEIT, S.; SEELAND, K.; VRIES, S. de. Benefits and uses of urban forests and trees. In: KONIJNENDIJK, C.C.; NILSSON, K.; RANDRUP, T.B.; SCHIPPERIJN, J. (Ed.). **Urban forests and trees: a reference book**. Amsterdam: Springer-Verlag, 2005. chap. 4, p. 81-114.

WEBB, J.K.; SHINE, R. Out on a limb: Conservation implications of tree-hollow use by a threatened snake species (*Hoplocephalus bungaroides*: Serpentes, Elapidae). **Biological Conservation**, Amsterdam, v. 81, p. 21-33, 1997.

YANG, J.; McBRIDE, J.; ZHOU, J.; SUN, Z. The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction. **Urban Forestry & Urban Greening**, Munich, v. 3, p. 65-78, Jan. 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1618866704000226>>. Acesso em: 08 ago. 2015.