

Mapeamento da vegetação urbana a partir de dados de sensoriamento remoto: estado da arte e perspectivas futuras

Mayumi Cursino de Moura Hirye
Diógenes Salas Alves
Hermann Johann Heinrich Kux

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
mayumi.hirye@inpe.br; dalves@dpi.inpe.br; hermann@dsr.inpe.br

Abstract. Urban vegetation plays important role in the urban ecosystem and in the hydro-climatic functioning of cities, contributes to environmental comfort and is associated with benefits such as improved psychological well-being or human health, aesthetic and real state valorization in places surrounded by vegetated areas. The present article presents a brief discussion of the main methods and results of vegetation mapping with remote sensing data reported in the literature and points out its limitations and perspectives. Our intention is to contribute to disciplines and subjects related to urban vegetation with an emphasis on the field of urban planning.

Palavras-chave: remote sensing, urban vegetation, sensoriamento remoto, vegetação urbana.

1. Introdução

Os processos intensos de urbanização ocorridos no último século em grande parte do mundo acarretaram transformações ambientais significativas, aumentando o interesse, entre os diversos elementos que compõem o ambiente urbano, pela vegetação e sua contribuição para a qualidade e conforto nas cidades.

A vegetação urbana abrange desde as espécies de vegetação rasteira, as trepadeiras e as árvores de pequeno, médio e grande porte. Abrange também toda vegetação localizada em parques e praças, unidades de conservação como as áreas de preservação permanente, jardins, cemitérios, campos de prática esportiva, hortas, calçadas e canteiros, tetos e paredes verdes, além de áreas abandonadas. Do ponto de vista do planejamento das cidades, interessam, não somente o tipo da vegetação, mas também sua localização. Do ponto de vista ecológico, interessam características biofísicas da vegetação e suas condições biológicas. Inventários de vegetação urbana frequentemente identificam, além dessas características, a espécie ou o gênero das plantas e as condições do ambiente onde ela se encontra.

A facilidade de obtenção de dados de sensoriamento remoto – menor utilização de recursos humanos, maior cobertura territorial com alta resolução espacial e temporal e possibilidade de mapear áreas sem acesso, como jardins privados – é frequentemente invocada para justificar sua utilização, em particular, nos estudos da vegetação urbana. Entretanto, é preciso considerar as incertezas associadas aos métodos empregados – erros na interpretação das imagens ou na extrapolação da relação entre os dados de campo e de satélite, entre outros (ALONZO *et al.*, 2016; SUN *et al.*, 2012).

A presente revisão tem como objetivo fazer um balanço das metodologias, técnicas e sensores utilizados para mapear a vegetação em ambientes urbanos, apresentando uma breve discussão de seus principais métodos e resultados e apontando suas limitações e perspectivas. Nossa intenção é contribuir para o corpo de reflexões que tratam da vegetação urbano com ênfase no campo do planejamento urbano.

2. Metodologia de Trabalho

Para compor o panorama de metodologias, técnicas e sensores utilizados para mapear a vegetação urbana, foi realizado um levantamento artigos em revistas indexadas, com revisão por pares, de temática vinculada ao sensoriamento remoto ou estudos urbanos, nos últimos 20 anos. Os

artigos selecionados referem-se à vegetação de distintas cidades do mundo e foram agrupados segundo o objeto principal dos trabalhos: classificação de diferentes feições de cobertura vegetal, estimativa da fração de vegetação, identificação de espécies ou gêneros e caracterização biofísica.

3. Mapeamento da vegetação urbana: estado da arte

Foram selecionados para análise 57 artigos publicados entre 1999 e 2016. Numa primeira aproximação, considerando a evolução dos sensores nas últimas décadas, pode-se classificar os trabalhos segundo características espectrais e de resolução das imagens utilizadas e características mapeadas da vegetação (Figura 1).

A vegetação como uma classe de cobertura do solo urbano é o tipo de mapeamento mais recorrente, feito com diferentes tipos de imagens, com destaque para as multiespectrais de resolução espacial muito alta (VHR – *very high resolution*), com menos de 5 m. Imagens multiespectrais de resolução espacial fina (FR – *fine resolution*), de 5m a 100m, foram particularmente utilizadas para a obtenção da fração de vegetação; nos últimos anos, foram identificados estudos com imagens hiperespectrais.

O mapeamento de características biofísicas da vegetação, assim como o de espécies ou gêneros tem se destacado nos anos mais recentes. A maioria desses mapeamentos é feito com a maior resolução espectral (HIPER), e, em particular, com dados de sensores ativos (SAR e LIDAR), que são utilizados, em alguns casos, de forma integrada. Alguns trabalhos utilizam também dados LIDAR em conjunto com imagens multiespectrais de resolução espacial muito alta (VHR).

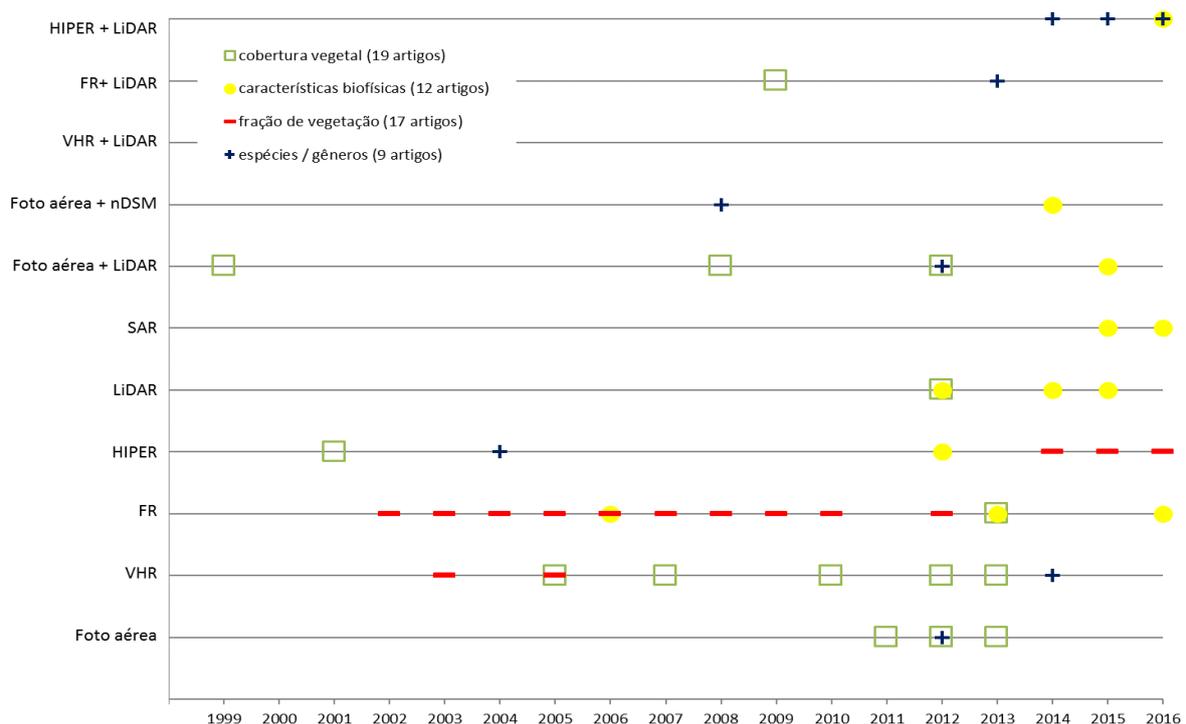


Figura 1 – Ano, tipo de imagem e objeto de mapeamento da vegetação urbana.

3.1 Mapeamento da cobertura vegetal

Os métodos de processamento de imagens comumente encontrados foram: classificação não supervisionada, supervisionada, orientada a objetos e abordagens estatísticas. Métodos de classificação sub-pixel também são utilizados e, nesses casos, as frações (de vegetação, solo etc.) obtidas são submetidas a um critério de classificação para que cada elemento da cena corresponda a uma única classe de cobertura (Tabela 1).

O método de classificação mais utilizado e também o que foi associado aos melhores resultados foi a classificação orientada a objetos (BHASKARAN *et al.*, 2010; ZHANG *et al.*, 2010). A adição de dados de sensores ativos não produziram melhorias significativas nos mapeamentos realizados. Ao mesmo tempo, os trabalhos relataram resultados bastante satisfatórios na classificação da cobertura vegetal, distinguindo feições de vegetação (cobertura arbórea ou rasteira, por exemplo) com imagens de sensores passivos de resolução espacial muito alta, mas com bandas na região do infravermelho, além do visível.

Tabela 1. Satélites, sensores e outras tecnologias de imageamento utilizadas para o mapeamento da cobertura vegetal em 19 artigos

Sensor/satélite e bandas		Artigo	
Sensor passivo	Multi-espectral	Videografia (3 VIS, 17cm / 1 IVP, 17cm)	Silva Filho <i>et al.</i> (2005).
		Foto aérea (3 VIS, 1m / 1 IVP, 1m)	Moskal <i>et al.</i> (2011) McGee <i>et al.</i> (2012) Ardila <i>et al.</i> (2012) Li e Shao (2013).
		Quickbird (3 VIS, 2,8m / 1 IVP, 2,8 m / 1 PAN, 0,6m)	Li <i>et al.</i> (2012) Hetrick <i>et al.</i> (2013).
		IKONOS (3 VIS, 2,8m / 1 IVP, 2,8 m / 1 PAN, 0,6m)	Bhaskaran <i>et al.</i> (2010) Pinho <i>et al.</i> (2012) Mathieu <i>et al.</i> (2007) Zhang <i>et al.</i> (2010).
		LANDSAT (3 VNIR, 30m / 1 NIR, 30m / 2 SWIR, 30m)	Liu e Yang (2013)
Hiper-espectral	DAIS 7915 (32 VNIR, 7m / 8 SWIR I, 7m / 32 SWIR II, 7m)	Roessner <i>et al.</i> (2001)	
Sensor ativo	LIDAR (50 pts/m ²)	Höfle <i>et al.</i> (2012)	
Combinação passivo e ativo	Foto Aérea e LIDAR		Haala e Brenner (1999) Zhou e Troy (2008) MacFaden <i>et al.</i> (2012) Lehbrass e Wang (2012).
	Quickbird e LIDAR		Tooke <i>et al.</i> (2009)

Observações: VIS é a região do espectro do visível, IVP é o infravermelho próximo e SWIR é o infravermelho de ondas curtas. PAN, refere-se às imagens pancromáticas.

A cobertura vegetal é mapeada também como fração de vegetação, que corresponde ao percentual de cobertura vegetal de cada elemento da imagem ou da cena como um todo (YAN *et al.*, 2012). Assim, a maior parte dos estudos utilizou imagens multiespectrais de resolução fina (entre 5m e 100m) (Figura 1). O método de classificação mais usual é com modelos lineares de mistura espectral, incluindo os com múltiplos *endmembers*. Nos artigos analisados, observou-se que não há consenso sobre a linearidade dos modelos de mistura, nem qual o método de obtenção das frações seria mais eficiente: Pu *et al.* (2008) concluíram que a decomposição não-linear obtida com a rede neural artificial é superior à decomposição linear, enquanto que Okujeni *et al.* (2014) observaram o comportamento errático da decomposição com a rede neural artificial, recomendando, por sua estabilidade, os regressores baseados em método kernel.

3.2 Identificação de espécies ou gêneros de vegetação

O inventário das espécies é pré-requisito para o manejo da vegetação, para a tomada de decisões de planejamento urbano e análise de custo-benefício, considerando a distribuição espacial dos serviços ecológicos em relação às atividades e à infraestrutura humana. A identificação de espécies da vegetação urbana ou grupos de espécies por sensoriamento remoto tem atraído a atenção de pesquisadores, que exploraram imagens de alta resolução espacial e/ou espectral isoladamente ou em conjunto não com dados de sensor ativo (Tabela 2).

Tabela 2 – Métodos de classificação utilizados para identificação de espécies ou gêneros da vegetação urbana segundo diferentes tecnologias de imageamento em 09 artigos selecionados

Sensor/satélite e bandas		Método de classificação	Artigo
Sensor passivo	Multi-espectral	Foto aérea (3 VIS, 0.6m / 1 IVP, 0.6m)	Árvore de decisão Zhang e Hu (2012)
		World View-2 (6 VIS, 2m / 2 IVP, 2m / 1 PAN, 0.5m)	Árvore de classificação e regressão (CART) / Análise discriminante linear (LDA) Pu <i>et al.</i> (2014)
		World View-2 e Ikonos (6 VIS, 2m / 2 IVP, 2m / 1 PAN, 0.5m) (3 VIS, 2.8m / 1 IVP, 2.8 m / 1 PAN, 0.6m)	Árvore de classificação e regressão (CART) / Análise discriminante linear (LDA) Pu e Landry (2012)
		RapidEye multi-temporal (3 VIS, 6.5m / 2 IVP, 6.5 m)	Support Vector Machine (SVM) Tigges <i>et al.</i> (2013)
Sensor passivo	Hiper-espectral	AVIRIS (3.5m)	Análise de mistura espectral (SMA) Xiao <i>et al.</i> (2004)
Combinação de sensor passivo e ativo		AVIRIS (3.7m) e LIDAR (22pts/m ²)	Análise discriminante canônica Alonzo <i>et al.</i> (2014)
Combinação de sensor passivo e ativo		AVIRIS (3.7m) e LIDAR (22pts/m ²)	Análise discriminante canônica Alonzo <i>et al.</i> (2016)
		AVIRIS (11.8m) e LIDAR (1pts/m ²)	Regressão linear Gu <i>et al.</i> (2015)
		Foto Aérea (3 VIS, 0.2m / 1 IVP, 0.2m e nDSM)	Support Vector Machine (SVM) Iovan <i>et al.</i> (2008)

Os estudos obtiveram menor acurácia na identificação da vegetação por espécies que por grupos ou gêneros. A alta resolução espacial das imagens multiespectrais não resultou em melhor acurácia na identificação de espécies ou de grupos ou gêneros, ao contrário da combinação da maior resolução espectral com dados da estrutura da vegetação obtidas de modelos digitais de superfície (Alonzo *et al.* 2014; 2016).

3.3 Caracterização de parâmetros biofísicos da vegetação

Aspectos da configuração biofísica da vegetação urbana, como a dimensões e densidade da copa e do tronco, a altura total ou fração de radiação fotossinteticamente ativa (fPAR), podem ser derivados de dados de sensoriamento remoto, especialmente dados de sensores ativos (Tabela 3).

Tabela 3 – Parâmetros biofísicos da vegetação urbana estimados em 12 artigos para diferentes tecnologias de imageamento

Sensor/satélite	Sensor passivo			Sensor ativo		Combinação passivo e ativo
	Multiespectral IKONOS (4m)	LANDSAT (30m)	Hiper AISA (2m)	LIDAR	TanDEM-X (12x12m)	Foto aérea e nDSM
Área da copa das árvores				Shrestha e Wynne (2012)*		
Altura das árvores				Shrestha e Wynne (2012)*	Schreyer <i>et al.</i> (2016)	
Diâmetro na altura do peito (DAP)				Shrestha e Wynne (2012)*		
Índice de área foliar (IAF)		Tang e Tang (2013)	Jensen <i>et al.</i> (2012)	Alonzo <i>et al.</i> (2015)**		

Sensor/satélite	Sensor passivo			Sensor ativo		Combinação passivo e ativo
	Multiespectral IKONOS (4m)	LANDSAT (30m)	Hiper AISA (2m)	LIDAR	TanDEM-X (12×12m)	Foto aérea e nDSM
Árvores em 3D (altura das árvores e área das copas)					Schmitt <i>et al.</i> (2015)	Iovan <i>et al.</i> (2014)
Densidade de área foliar (DAF)					Oshio <i>et al.</i> (2015)	
Biomassa	Shrestha e Wynne (2012)	Myeong <i>et al.</i> (2006)		Shrestha e Wynne (2012)* Alonzo <i>et al.</i> (2016)** Raciti <i>et al.</i> (2014)		
fPAR		Tang e Tang (2013)				

* LIDAR com 8pts/m² e ** LIDAR com 22pts/m².

A altura, a área da copa das árvores e o diâmetro do tronco são parâmetros físicos importantes para caracterizar a vegetação por que são altamente correlacionadas com as funções ecológicas e a biodiversidade e complexidade dos ecossistemas (SUN *et al.*, 2012; SHRESTHA e WYNNE, 2012; SCHREYER *et al.*, 2016). Shrestha e Wynne (2012) estimaram esses parâmetros a partir de dados LIDAR de pequena área de impressão, obtendo boas correlações com os dados do sensor (R^2 de 0.89 para a relação entre dados de campo de altura das árvores e dados obtidos de LIDAR, R^2 de 0.82 para o diâmetro na altura do peito e R^2 de 0.90 para o diâmetro da copa). Schreyer *et al.* (2016) desenvolveram técnica de filtragem de dados de radar obtidos pela missão TanDEM-X, com resolução espacial de 12m, para obter o modelo normalizado de dossel (*normalized Canopy Model* – nCM). Os resultados, ainda que inéditos para esse tipo de dado, apresentaram grande divergência com os dados de validação.

O índice de área foliar (IAF ou *Leaf Area Index* – LAI) relaciona a área total das folhas, considerando apenas um dos seus lados, e uma unidade de superfície no terreno. É parâmetro importante nas estimativas do funcionamento da vegetação, devido ao papel que as folhas desempenham no controle de processos biológicos e físicos do dossel (CHEN *et al.*, 1997). Processos de interceptação do dossel, evapotranspiração e fotossíntese bruta são diretamente proporcionais ao IAF (FANG *et al.*, 2012). O IAF é um parâmetro de entrada em diversos modelos ecológicos, climáticos e microclimáticos. Utiliza-se o termo LAI efetivo ou PAI (*Plant Area Index*) quando a estimativa é feita a partir da fração de não vegetação (*gap fraction*) obtida com ceptômetros ou fotografias hemisféricas. Outro índice similar é a densidade de área foliar (DAF, ou *Leaf Area Density* - LAD), que relaciona a área das folhas com uma unidade de volume.

Dados de LIDAR são utilizados para estimar com sucesso o IAF e DAF, tanto a partir de relações alométricas entre características obtidas por LIDAR e os índices de área foliar medidos em campo, quando a partir de métricas derivadas dos próprios dados LIDAR (métricas de penetração ou trajetória do pulso laser). Jensen *et al.* (2012) obtiveram índices de acurácia baixos para as estimativas feitas a partir de relações lineares e não lineares entre o IAF e índices espectrais calculados a partir de imagens hiperespectrais. Tang e Tang (2013) estimaram o IAF a partir de sua relação com a razão simples de banda obtida de imagens do sensor LANDSAT TM, com equações propostas para ambientes florestais, sem, entretanto, reportar a acurácia do método. Não há clareza do tipo de erro induzido pela utilização de relações alométricas ou equações derivadas de estudos não-urbanos (Alonzo *et al.*, 2015). A reconstrução tridimensional das árvores é ainda experimental e foi feita com dados de sensores ativos e técnicas relativamente mais complexas. Os resultados são satisfatórios, embora limitados às situações simuladas.

Como seria de se esperar, os dados de LIDAR têm melhor desempenho na estimativa da biomassa, já que existe uma relação muito forte entre as dimensões físicas da árvore estimadas por esses instrumentos e sua biomassa. Dos estudos de biomassa urbana, apenas Alonzo *et al.* (2016) utilizaram relações não-lineares para as estimativas de biomassa. Os demais estudos utilizaram relações lineares entre as características físicas e a biomassa medida em campo. Entretanto, a utilização de regressões lineares tem pressupostos que podem não ser totalmente satisfeitos para as árvores, a saber: a linearidade da relação entre as variáveis e a independência delas, em especial para os dados espectrais (SUN *et al.*, 2012). Adicionalmente, pode-se considerar que erros na classificação das espécies feita a partir dos dados de sensoriamento remoto (ALONZO *et al.*, 2016) e falta de dados alométricos específicos para espécies urbanas (McHALE *et al.*, 2009) tornam preferível a utilização de um modelo que não discrimina espécies.

O fPAR corresponde à radiação solar no intervalo de 400nm a 700nm que é absorvida pela vegetação e é utilizada para estimar a produtividade primária e a absorção de dióxido de carbono da vegetação e descrever o estado do crescimento e evolução da vegetação (FAN e TAO, 2012). Tang e Tang (2013) estimaram o fPAR por meio de sua relação linear com o índice de diferença normalizada de vegetação (NDVI), conforme proposto por Myneni e Williams (1994). Esses trabalhos, entretanto, não fizeram nenhuma consideração sobre a validade da relação para os dados utilizados.

4. Conclusões e Perspectivas futuras

O mapeamento da cobertura vegetal como uma classe ou como diferentes tipologias de cobertura é bastante explorado, com diferentes técnicas e imagens. Os diversos estudos reportaram melhores resultados com a análise orientada a objetos aplicada a imagens de alta resolução espacial.

A identificação de espécies ou gêneros por meio de sensoriamento remoto, embora menos custosa que os inventários de campo e adequadas ao mapeamento de áreas extensas ou inacessíveis, ainda apresenta dificuldades relacionadas à complexidade, densidade e diversidade da vegetação urbana (IOVAN *et al.*, 2008). As abordagens mais promissoras são as que conjugam a alta resolução espectral com dados de sensores ativos.

As características biofísicas da vegetação são parâmetros de entrada em modelos microclimáticos urbanos. Assim, a maior precisão e rapidez, além da automatização do mapeamento dessas características é altamente desejável, possibilitando a integração de dados de sensoriamento remoto aos modelos físicos de clima urbano. A falta de relações alométricas específicas para a vegetação urbana deixa como alternativa mais promissora a utilização de dados de LIDAR com alta resolução espacial.

A estimativa da biomassa, bastante explorada nos estudos florestais, começa a aparecer em estudos de áreas urbanas. Porém, é necessário relativizar a importância do sequestro de carbono pelas árvores nas cidades: segundo dados das cidades norte-americanas, o total sequestrado anualmente foi estimado em 25.6 milhões de toneladas (NOWAK *et al.*, 2013), valor bastante inferior às emissões, medidas em gigatoneladas (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2008).

Por fim, os estudos de vegetação em cidades brasileiras ainda são muito escassos e restritos ao mapeamento da cobertura vegetal ou da fração de vegetação (como em HIRYE *et al.*, 2015 ou KUCK; ALVES, 2012). No domínio conceitual da paisagem urbana ou mesmo da legislação urbanística ou ambiental, foram desenvolvidas tipologias que mereceriam ser especializadas, como por exemplo a classificação tipológica adotada pela Prefeitura de São Paulo (PMSP, 2002): árvores nativas ou exóticas de pequeno porte (até 5 m de altura) ou arbustivas; de porte médio (5 a 10 m de altura) ou de grande porte (maior que 10 m de altura).

Referências bibliográficas

- ALONZO, M.; BOOKHAGEN, B.; MCFADDEN, J. P.; SUN, A.; ROBERTS, D. A. Mapping urban forest leaf area index with airborne lidar using penetration metrics and allometry. **Rem Sensing Environ**, v. 162, p. 141–153, 2015.
- ALONZO, M.; BOOKHAGEN, B.; ROBERTS, D. A. Urban tree species mapping using hyperspectral and lidar data fusion. **Rem Sensing Environ**, v. 148, p. 70–83, maio 2014.
- ALONZO, M.; MCFADDEN, J. P.; NOWAK, D. J.; ROBERTS, D. A. Mapping urban forest structure and function using hyperspectral imagery and lidar data. **Urban forestry & Urban Greening**, v. 17, p. 135–147, 2016.
- ARDILA, J. P.; BIJKER, W.; TOLPEKIN, V. A.; STEIN, A. Multitemporal change detection of urban trees using localized region-based active contours in vhr images. **Rem Sensing Environ**, v. 124, p. 413–426, 2012.
- BHASKARAN, S.; PARAMANANDA, S.; RAMNARAYAN, M. Per-pixel and object-oriented classification methods for mapping urban features using ikonos satellite data. **Applied Geography**, v. 30, n. 4, p. 650–665, 2010.
- CHEN, J. M.; RICH, P. M.; GOWER, S. T.; NORMAN, J. M.; PLUMMER, S. Leaf area index of boreal forests: theory, techniques, and measurements. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, v. 102, n. D24, p. 429–443, 1997.
- DA SILVA FILHO, D. F.; PIVETTA, K. F. L.; DO COUTO, H. T. Z.; POLIZEL, J. L. Indicadores de floresta urbana a partir de imagens aéreas multiespectrais de alta resolução. **Scientia forestalis/forest sciences**, n. 67, p. 88–100, 2005.
- FAN, W.; TAO, X. Fraction of absorbed photosynthetically active radiation by green vegetation. In: LIANG, S.; LI, X.; WANG, J. (Org.). **Advanced remote sensing**. 1a. ed. Elsevier, 2012.
- FANG, H.; XIAO, Z.; QU, Y.; SONG, J. Leaf area index. In: LIANG, S.; LI, X.; WANG, J. (Org.). **Advanced remote sensing**. 1a. ed. Elsevier, 2012.
- GU, H.; SINGH, A.; TOWNSEND, P. A. Detection of gradients of forest composition in an urban area using imaging spectroscopy. **Rem Sensing Environ**, v. 167, p. 168–180, 2015.
- HAALA, N.; BRENNER, C. Extraction of buildings and trees in urban environments. **ISPR J P&RS**, v. 54, n. 2–3, p. 130–137, 1999.
- HETRICK, S.; CHOWDHURY, R.; BRONDIZIO, E.; MORAN, E. Spatiotemporal patterns and socioeconomic contexts of vegetative cover in Altamira city, Brazil. **Land**, v. 2, p. 774–796, 2013.
- HIRYE, M. C. M.; ALVES, D. S.; KUX, H. J. H. Mapeamento da cobertura da terra na cidade de Altamira (PA) em 2000 e 2010, com a utilização do modelo linear de mistura espectral de imagens do sensor TM. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, n.1, p. 157-168.
- HÖFLE, B.; HOLLAUS, M.; HAGENAUER, J. Urban vegetation detection using radiometrically calibrated small-footprint full-waveform airborne lidar data. **ISPR J P&RS**, v. 67, n. 1, p. 134–147, 2012.
- IOVAN, C.; BOLDO, D.; CORD, M. Detection, characterization, and modeling vegetation in urban areas from high-resolution aerial imagery. **IEEE J Select Topics in App Earth Obs Rem Sensing**, v. 1, n. 3, p. 206–213, 2008.
- IOVAN, C.; COURNEDE, P.; GUYARD, T.; BAYOL, B.; BOLDO, D.; CORD, M. Model-based analysis–synthesis for realistic tree reconstruction and growth simulation. **IEEE Trans on Geosc and Rem Sensing**, v. 52, n. 2, p. 1438–1450, 2014.
- JENSEN, R. R.; HARDIN, P. J.; HARDIN, A. J. Estimating urban leaf area index (lai) of individual trees with hyperspectral data. **Photog Eng&RS**, n. 5, p. 495–504, 2012.
- KUCK, T. N.; ALVES, D. S. Aplicação do mesmo para análise multitemporal do processo de impermeabilização do solo urbano de manaus-am. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 64, n. 5, p. 601–617, 2012.
- LEHBASS, B.; WANG, J. Urban tree cover mapping with relief-corrected aerial imagery and lidar. **Photog Eng&RS**, v. 78, n. 5, p. 473–484, 2012.
- LI, W.; RADKE, J.; LIU, D.; GONG, P. Measuring detailed urban vegetation with multisource high-resolution remote sensing imagery for environmental design and planning. **Environ Plann B**, v. 39, n. 3, p. 566–585, 1 jun. 2012.
- LI, X.; SHAO, G. Object-based urban vegetation mapping with high-resolution aerial photography as a single data source. **Interl J of RS**, v. 34, n. 3, p. 771–789, 2013.
- LIU, T.; YANG, X. Mapping vegetation in an urban area with stratified classification and multiple endmember spectral mixture analysis. **Rem Sensing Environ**, v. 133, p. 251–264, 2013.
- MACFADEN, S. W.; O’NEIL-DUNNE, J. P. M.; ROYAR, A. R.; LU, J. W. T.; RUNDLE, A. G. High-resolution tree canopy mapping for new york city using lidar and object-based image analysis. **J Appl RS**, v. 6, n. 1, p. 63567–1, 2012.
- MATHIEU, R.; FREEMAN, C.; ARYAL, J. Mapping private gardens in urban areas using object-oriented techniques and very high-resolution satellite imagery. **Landscape and Urban Planning**, v. 81, p. 179–192, 2007.
- MCGEE, J. A.; DAY, S. D.; WYNNE, R. H.; WHITE, M. B. Using geospatial tools to assess the urban tree canopy: decision support for local governments. **Journal of Forestry**, August, 2012.
- MCHALE, M. R.; BURKE, I. C.; LEFSKY, M. A.; PEPPER, P. J.; MCPHERSON, E. G. Urban forest biomass estimates: is it important to use allometric relationships developed specifically for urban trees? **Urban Ecosystems**, v. 12, n. 1, p. 95–113, 2009.
- MOSKAL, L. M.; STYERS, D. M.; HALABISKY, M. Monitoring urban tree cover using object-based image analysis and public domain remotely sensed data. **Remote Sensing**, v. 3, n. 10, p. 2243–2262, 2011.

- MYEONG, S.; NOWAK, D. J.; DUGGIN, M. J. A temporal analysis of urban forest carbon storage using remote sensing. **Rem Sensing Environ**, v. 101, n. 2, p. 277–282, 2006.
- MYNENI, R. B.; WILLIAMS, D. L. On the relationship between fapar and ndvi. **Rem Sensing Environ**, v. 49, n. 3, p. 200–211, 1994.
- NOWAK, D. J.; GREENFIELD, E. J.; HOEHN, R. E.; LAPOINT, E. Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the united states. **Environmental Pollution**, v. 178, p. 229–236, jul. 2013.
- OKUJENI, A.; VAN DER LINDEN, S.; JAKIMOW, B.; RABE, A.; VERRELST, J.; HOSTERT, P. A comparison of advanced regression algorithms for quantifying urban land cover. **Remote Sensing**, v. 6, n. 7, p. 6324–6346, 2014.
- OSHIO, H.; ASAWA, T.; HOYANO, A.; MIYASAKA, S. Estimation of the leaf area density distribution of individual trees using high-resolution and multi-return airborne lidar data. **Rem Sensing Environ**, v. 166, p. 116–125, 2015.
- PMSP – PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO. **Portaria Intersecretarial nº05/SMMA-SIS/2002**.
- PINHO, C. M. D. DE; FONSECA, L. M. G.; KORTING, T. S.; ALMEIDA, C. M. DE; KUX, H. J. H. Land-cover classification of an intra-urban environment using high-resolution images and object-based image analysis. **Interl J of RS**, v. 33, n. 19, p. 5973–5995, 10 out. 2012.
- PU, R.; GONG, P.; MICHISHITA, R.; SASAGAWA, T. Spectral mixture analysis for mapping abundance of urban surface components from the terra/aster data. **Rem Sensing Environ**, v. 112, n. 3, p. 939–954, 2008.
- PU, R.; LANDRY, S. A comparative analysis of high spatial resolution ikonos and worldview-2 imagery for mapping urban tree species. **Rem Sensing Environ**, v. 124, p. 516–533, 2012.
- PU, R.; LANDRY, S.; ZHANG, J. Evaluation of atmospheric correction methods in identifying urban tree species with worldview-2 imagery. **IEEE J Select Topics in App Earth Obs Rem Sensing**, v. 8, n. 5, p. 1–12, 2014.
- RACITI, S. M.; HUTYRA, L. R.; NEWELL, J. D. Mapping carbon storage in urban trees with multi-source remote sensing data: relationships between biomass, land use, and demographics in boston neighborhoods. **Science of the Total Environment**, v. 500–501, p. 72–83, 2014.
- ROESSNER, S.; SEGL, K.; HEIDEN, U.; KAUFMANN, H. Automated differentiation of urban surfaces based on airborne hyperspectral imagery. **IEEE Transactions on Geoscience and Rem Sensing**, v. 39, n. 7, p. 1525–1532, 1 jul. 2001.
- SCHMITT, M.; SHAHZAD, M.; ZHU, X. X. Reconstruction of individual trees from multi-aspect tomosar data. **Rem Sensing Environ**, v. 165, p. 175–185, 2015.
- SCHREYER, J.; GEIS, C.; LAKES, T. Tandem-x for large-area modeling of urban vegetation height : evidence from berlin , germany. **IEEE J Select Topics in App Earth Obs Rem Sensing**, v. 9, n. 5, p. 1–12, 2016.
- SHRESTHA, R.; WYNNE, R. H. Estimating biophysical parameters of individual trees in an urban environment using small footprint discrete-return imaging lidar. **Remote Sensing**, v. 4, n. 2, p. 484–508, 2012.
- SUN, G.; PANG, Y.; NI, W.; HUANG, W.; LI, Z.. Vegetation height and vertical structure. *In: LIANG, S.; LI, X.; WANG, J. (Org.). Advanced remote sensing*. 1a. ed. Elsevier, 2012.
- SUN, G.; SUN, W.; LIANG, S.; ZHANG, Z.; CHEN, E. Above-ground biomass. *In: LIANG, S.; LI, X.; WANG, J. (Org.). Advanced remote sensing*. 1a. ed. Elsevier, 2012.
- TANG, J.; TANG, J. Linking spatial pattern and biophysical parameters of urban vegetation by multitemporal landsat imagery. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 10, n. 5, p. 1263–1267, 2013.
- TIGGES, J.; LAKES, T.; HOSTERT, P. Urban vegetation classification: benefits of multitemporal rapideye satellite data. **Rem Sensing Environ**, v. 136, p. 66–75, 2013.
- TOOKE, T. R.; COOPS, N. C.; GOODWIN, N. R.; VOOGT, J. A. Extracting urban vegetation characteristics using spectral mixture analysis and decision tree classifications. **Rem Sensing Environ**, v. 113, n. 2, p. 398–407, 2009.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Carbon sequestration to mitigate climate change. 2008.
- XIAO, Q.; USTIN, S. L.; MCPHERSON, E. G. Using aviris data and multiple-masking techniques to map urban forest tree species. **Interl J of RS**, v. 25, n. 24, p. 5637–5654, dez. 2004.
- YAN, G.; MU, X.; LIU, Y. Fractional vegetation cover. *In: LIANG, S.; LI, X.; WANG, J. (Org.). Advanced remote sensing*. 1a. ed. Elsevier, 2012.
- ZHANG, K.; HU, B. Individual urban tree species classification using very high spatial resolution airborne multi-spectral imagery using longitudinal profile. **Remote Sensing**, n. 4, p. 1741–1757, 2012.
- ZHANG, X.; FENG, X.; JIANG, H. Object-oriented method for urban vegetation mapping using ikonos imagery. **Interl J of RS**, v. 31, n. 1, p. 177–196, 5 jan. 2010.
- ZHOU, W.; TROY, A. An object-oriented approach for analysing and characterizing urban landscape at the parcel level. **Interl J of RS**, v. 29, n. 11, p. 3119–3135, 2008.