

Mapeamento de Superfícies Impermeáveis Utilizando Ortofotos, Imagens de Satélite e Regressão Linear

Mapping Impervious Surface Areas Using Orthophotos, Satellite Imagery and Linear Regression

Marcos Henrique Martins¹, Rubia Gomes Morato², Fernando Shinji Kawakubo³

¹Universidade de São Paulo, marcos.henrique.martins@usp.br, <http://orcid.org/0000-0001-8613-2415>

²Universidade de São Paulo, rubiagm@usp.br

³Universidade de São Paulo, fsk@usp.br

Recebido (Received): 24/04/2017

Aceito (Accepted): 26/10/2017

Resumo: Um dos efeitos mais marcantes do processo de urbanização, na atualidade, é o aumento das superfícies impermeáveis. A expansão indiscriminada da impermeabilização do solo possui significativo potencial produtor de impactos negativos ao ambiente, como deterioração da qualidade e quantidade da água, mudanças na infiltração e nas características do escoamento superficial e, conseqüentemente, subsuperficial das águas, aumento da temperatura do ambiente, dentre outros. Em razão da relevância científica e social da temática, o presente estudo tem como objetivo estimar o percentual de superfícies impermeáveis na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) a partir de ortofotos digitais (Emplasa, 2010) e imagens do sensor *Operational Land Imager* (OLI) do Landsat-8. O primeiro procedimento metodológico consistiu na definição de áreas de controle, que foram utilizadas para calibrar o modelo. A partir das informações detalhadas das ortofotos, valores percentuais de impermeabilização foram calculados para um conjunto de janelas amostrais georreferenciadas a partir da localização e dimensão dos pixels das imagens OLI. Em seguida, estes valores percentuais foram correlacionados linearmente com valores da imagem Índice Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI em Inglês), haja vista a cobertura vegetal possuir correlação negativa com as áreas impermeáveis. Realizou-se uma análise detalhada dos resíduos da modelagem a partir do método de validação cruzada e os resultados obtidos indicam que a metodologia descrita é eficiente para estimar as áreas impermeáveis ($R^2 = 0.90$ e $p < 0.05$), ainda que um pequeno erro de subestimativa tenha sido observado.

Palavras-Chave: Superfícies Impermeáveis, NDVI, Regressão Linear, Validação Cruzada.

Abstract: One of the most notorious effects of urbanization is the increase in the proportion of impervious surface areas (ISAs). The indiscriminate increase in ISA gives rise to many negative impacts on the environment, such as the deterioration of water in terms of both quality and quantity, changes in surface-water infiltration and runoff characteristics, increases in the land surface temperature, etc. Owing to the scientific and social relevance of this theme, the present study aims to map the percentage of ISA in the Metropolitan Region of São Paulo (RMSP) by means of orthorectified digital photos (Emplasa, 2010) and satellite imagery taken from the Operational Land Imager (OLI) instrument onboard the Landsat-8 system. The first procedure consisted of a definition of the control areas used to calibrate the model. By using detailed information from orthophotos, the percentage of impervious land was calculated taking into account the pixel size of Landsat-8 OLI imagery. In order to do that, a set of georeferenced sample windows was used. After this, we combined the reference impervious surface values with the pixel brightness of the normalized difference vegetation index (NDVI) through a linear-regression model, since there is a negative correlation between green vegetation and impervious areas. By using the cross-validation technique, a meticulous analysis of the residues generated from the modeling was performed. The results obtained in this investigation showed that the method described is very effective in predicting continuous values of ISA ($R^2 = 0.90$ and $p < 0.05$ when related to the control set), however, a slight underestimation error is also noted.

Keywords: Impervious surfaces, NDVI, regression line, cross-validation.

1. Introdução

As superfícies impermeáveis correspondem às áreas onde não ocorre infiltração da água no solo em razão da impermeabilização provocada pela pavimentação do sistema viário, calçadas, estacionamentos, construção de habitações, fábricas, galpões, dentre outros. Apesar de constituir uma das expressões mais importantes da urbanização (ARNOLDO; GIBBONS, 1996; CANTERS *et al.*, 2006), as superfícies impermeáveis não

possuem apenas origem antropogênica: afloramentos rochosos e solos muito compactados também constituem “superfícies naturais” impermeáveis ou semipermeáveis.

Além de se constituir como um importante indicador do grau de urbanização de uma determinada unidade geográfica, as superfícies impermeáveis também exercem um papel crucial na qualidade ambiental do entorno (ARNOLD; GIBBONS, 1996). Entre os impactos mais diretos do aumento da impermeabilização do solo, especialmente nos grandes centros urbanos, localizam-se as mudanças no regime hidrológico e, conseqüentemente, a redução da infiltração da água no solo e o aumento no escoamento superficial. De acordo com Tocci (1997), a redução da infiltração impacta a recarga do lençol freático e diminui a vazão dos rios, especialmente nas épocas de seca. Já o aumento do escoamento superficial potencializa os problemas de magnitude e frequência de inundação. Isto porque o volume de água que deixa de infiltrar no solo permanece na superfície e é escoado por condutos pluviais que amentam a velocidade do fluxo de deslocamento e as vazões máximas, antecipando assim os picos no tempo (TOCCI, 1997).

Outro problema desencadeado pelo aumento de superfícies impermeáveis é a alteração no fluxo de calor latente e sensível, causando ilhas de calor (CHANGNON, 1992). Materiais como asfalto, concreto e amianto, por exemplo, absorvem grande quantidade de energia solar, que então é liberada na forma de calor. Como consequência, há uma forte relação linear positiva entre aumento de superfície impermeável e aumento da temperatura do ambiente e uma relação inversa com a densidade de vegetação (YUAN; BAUER, 2007).

A deterioração da qualidade da água é um outro exemplo que aflige a sociedade e que possui relação com o tema. Também se observa uma relação estreita envolvendo a qualidade da água e a porcentagem de cobertura impermeável presente nas bacias hidrográficas (ARNOLD; GIBBONS, 1996). Neste sentido, há de se admitir que a manutenção da qualidade e/ou integridade de uma bacia hidrográfica depende de um nível mínimo de proteção que resguarde as suas características ditas naturais. Assim sendo, estudos realizados por Schueler (1994) revelam que, em muitas localidades geográficas, a degradação do ambiente ocorre em níveis relativamente baixos de impermeabilização do solo, que podem variar de 10 a 20%. A impermeabilização, nestes casos, age no sentido de aumentar o transporte de nutrientes (nitrogênio e fósforo), de contaminantes tóxicos e de agentes patogênicos para os rios, córregos e lagos.

Destarte, o mapeamento das superfícies impermeáveis é justificado em sua relevância socioeconômica e ambiental, sendo plausível e necessário que se faça uma avaliação adequada dos procedimentos metodológicos cabíveis à concretização desta análise. Neste sentido, a literatura disponível indica que é possível mapear as superfícies impermeáveis utilizando-se técnicas de sensoriamento remoto (WENG, 2007; SAKUNO *et al.*, 2017). Uma das formas possíveis de se estimar o percentual de impermeabilização em áreas urbanas consiste na utilização de fotografias aéreas de voo baixo, cujo detalhe geométrico possibilita a fotointerpretação dessas imagens (PAINE; KISER, 2012), permitindo ao analista, em um primeiro momento, classificar os diferentes tipos de uso da terra e cobertura vegetal e, em seguida, relacionar as classes de uso da terra com a disposição dos materiais impermeáveis. Dentre as principais limitações da utilização das fotografias aéreas, é importante destacar o entrave imposto pela escala temporal de imageamento, que dificulta a realização de estudos atuais e recorrentes para muitas localidades; o alto custo das ortofotos, quando comparadas com as imagens de satélite; a subjetividade do analista; e a demora na elaboração dos mapeamentos.

As imagens geradas pelo sensor OLI do Landsat-8, por sua vez, podem fornecer informações relevantes sobre diversas áreas da Terra, com resoluções espacial, temporal, espectral e radiométrica adequadas para investigações como a proposto no escopo deste artigo, possibilitando análises precisas, de baixo custo, mais ágeis e com maior taxa de recorrência, se comparadas com as técnicas de vetorização. Dados gerados por outros sensores remotos orbitais também podem ser utilizados em estudos como os propostos no escopo deste artigo, especialmente os de maior resolução espacial, possibilitando um melhor detalhamento da superfície analisada. Entretanto, tendo em vista o baixo custo de aquisição das imagens OLI, optou-se por avaliar o emprego dessas imagens, já amplamente utilizadas em estudos com aplicações diversas, incluindo-se os relativos à impermeabilização do solo (YUAN; BAUER, 2007; YANG *et al.*, 2003; WENG, 2007).

Com relação aos métodos de estimativa que consideram a variabilidade dos pixels que compõem uma determinada imagem da superfície terrestre, vários trabalhos têm sido desenvolvidos com o objetivo de quantificar a presença de materiais impermeáveis. Weng (2002) e Lu *et al.* (2013) apresentam uma revisão bastante detalhada dos diversos métodos que têm sido empregados no mapeamento das superfícies impermeáveis em áreas urbanas. Dentre as técnicas mais utilizadas, destacam-se o uso de análise de regressão (ELVIDGE *et al.*, 2004; BAUER, LOFFELHOLZ, WILSON, 2007), redes neurais artificiais (CANTERS *et al.*, 2006), modelos de árvore de regressão CART (*Classification and regression trees*) (YANG *et al.*, 2003;

CANTERS *et al.*, 2006; VAN DE VOORDE *et al.*, 2011) e modelo linear de mistura espectral (MLME) (VAN de VOORDE, De ROECK, Canters, 2009; ZHANG *et al.*, 2009; WU, 2009; YANG *et al.*, 2010).

Destarte, diante da relevância e necessidade da obtenção de informações acerca das superfícies impermeáveis, bem como da emergência de estudos que possam ser indicativos de metodologias capazes de estimar o percentual de impermeabilização em áreas urbanas, o presente artigo tem como objetivo estimar o percentual de superfícies impermeáveis na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) (**Figura 1**) a partir de ortofotos e imagens do sensor OLI do Landsat-8.

A RMSP é composta por 39 municípios, os quais ocupam uma área de 7946,96 km². A população que reside nesta Região Metropolitana é composta por 21.124.939 habitantes, resultando numa densidade demográfica média de 2.673,09 habitantes por km². Seguramente, a RMSP é o maior polo de riqueza do território brasileiro, concentrando 18% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional, percentual que corresponde à metade do PIB do Estado de São Paulo (EMPLASA, 2016).

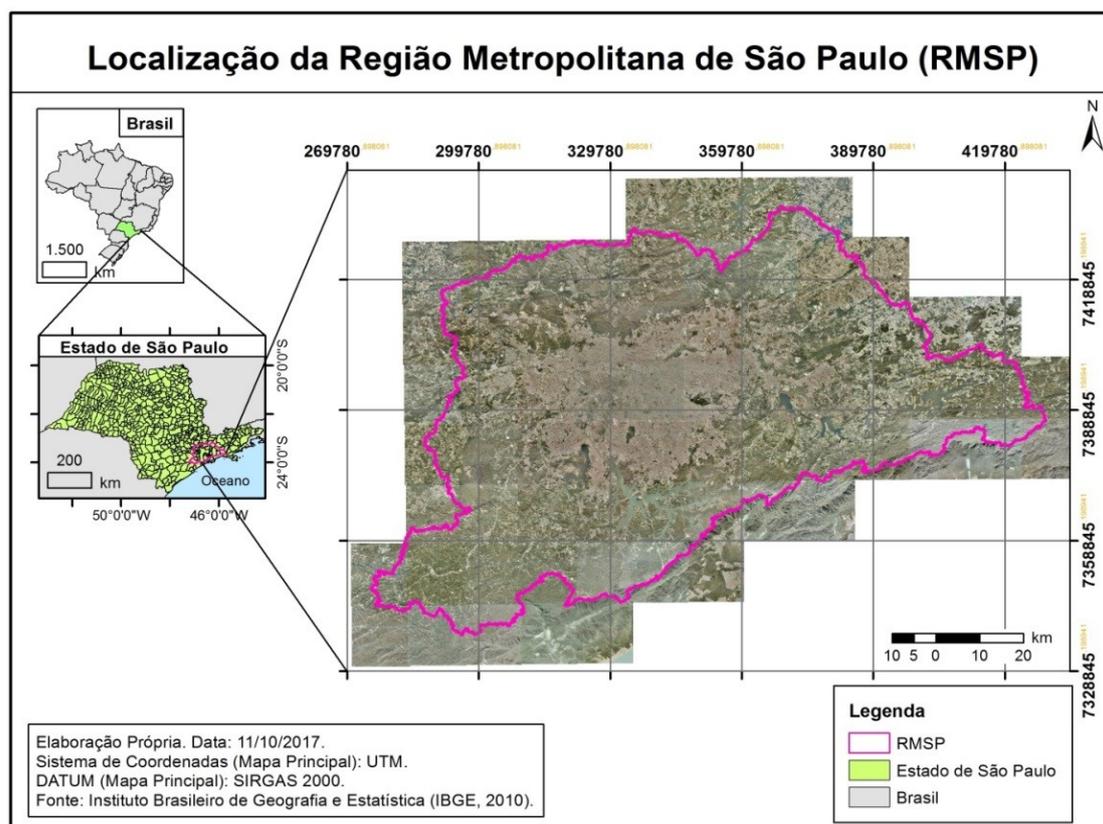


Figura 2: Localização da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

2. Materiais e Métodos

Foram utilizados os seguintes materiais para a realização da pesquisa: ortofotos digitais disponibilizadas pela Empresa de Planejamento Metropolitano (EMPLASA, 2010) com resolução *Ground Sample Distance* (GSD) de 45cm (reamostradas para 1m, no processo de ortorretificação), referente ao voo dos anos de 2010/2011; imagens ortorretificadas dos satélites Landsat-7 ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) e Landsat-8 OLI (*Operational Land Imager*) (órbita 219/76), datas de 13/06/2010 e 23/09/2015, respectivamente. Estas imagens foram adquiridas no sítio da *U.S. Geological Survey* (USGS). Ademais, utilizou-se os softwares *Excel 2010* e *ArcGIS 10.2* para processamento dos dados necessários ao desenvolvimento da pesquisa.

Primeiramente, as imagens OLI e ETM foram convertidas para valores de reflectância no topo da atmosfera, tendo em vista a necessidade de melhor caracterizar o comportamento espectral dos objetos. Operou-se também uma correção atmosférica a partir do método *Dark Object Subtraction* (DOS) para as imagens OLI, as quais foram utilizadas para o cálculo de estimativa de impermeabilização para a área de estudo. Entretanto, os resultados obtidos a partir da correção atmosférica apresentaram limitações que serão avaliadas na análise

dos resultados. Assim sendo, as imagens de satélite utilizadas não foram corrigidas para valores de reflectância em superfície.

Devido ao intervalo temporal das imagens adquiridas (ortofotos de 2010 e imagens OLI de 2015), realizou-se um procedimento metodológico para definição das áreas da RMSP cujas formas de uso e ocupação do solo não se alteraram neste período (Canters *et al.* 2006). O referido procedimento consistiu no cálculo das imagens NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*) para o Landsat-8 a partir das quais foi possível gerar uma imagem com as áreas construídas (BU) da RMSP. Na sequência, repetiu-se o mesmo procedimento para imagens geradas pelo sensor *Enhanced Thematic Mapper* (ETM) do satélite Landsat-7. As formulas utilizadas para o calculo dos índices foram:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{Vermelho} - \text{Infravermelho Próximo}}{\text{Vermelho} + \text{Infravermelho Próximo}}$$

$$\text{NDBI} = \frac{\text{Infravermelho Próximo} - \text{Infravermelho}}{\text{Infravermelho Próximo} + \text{Infravermelho}}$$

$$\text{BU} = \text{NDBI} - \text{NDVI}$$

As imagens finais (BU) obtidas foram então subtraídas (BU Landsat-8 – BU Landsat-7), indicando as áreas inalteradas, definidas pela distribuição dos pixels em relação à média (pixels distando menos de um desvio padrão da média foram considerados aptos para a realização da etapa seguinte) (Jensen, 2005).

A segunda fase do trabalho consistiu na seleção e definição de 50 janelas amostrais com dimensões de 10 por 10 pixels do sensor OLI, distribuídas aleatoriamente pelas áreas inalteradas da RMSP definidas previamente e georreferenciadas de acordo com as ortofotos (EMPLASA, 2010) e com as imagens do sensor OLI. Utilizando as informações detalhadas das ortofotos digitais (EMPLASA, 2010), operou-se a vetorização e classificação visual, em tela, das categorias de uso da terra e cobertura vegetal das referidas janelas (CERON; DINIZ, 1966, PAINE; KISER, 2012). Ao final da vetorização, tais janelas foram subdivididas em uma malha regular cujos polígonos constituintes possuíam dimensões correspondentes aos pixels das imagens do sensor OLI (polígono regular com 30m de lado, ou 900 m² de área). Assim sendo, foram digitalizadas 5000 amostras de controle, de forma que, para cada polígono constituinte da malha regular, foi possível determinar os percentuais de impermeabilização do solo.

Para que fosse possível estimar o percentual de impermeabilização do solo a partir das imagens do sensor OLI, foram selecionadas aleatoriamente 4500 amostras de referência (90% do universo amostral), discriminando-se 10% das amostras restantes (500 polígonos regulares restantes) para a validação do modelo. Em razão das áreas impermeáveis apresentarem comportamento inverso à abundância da vegetação, o índice de vegetação *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) foi utilizado como variável explicativa do modelo de regressão linear. Os valores de NDVI variam de -1 a 1, de forma que valores negativos e próximos de 0 representam áreas com ausência de vegetação, enquanto valores positivos correspondem às áreas vegetadas cuja intensidade aumenta com o incremento do índice.

Em tese, a “zona” de acerto da modelagem restringe os resultados dentro do intervalo de valores de 0% (superfícies totalmente permeáveis) a 100% (superfícies totalmente impermeáveis). Os valores que extrapolaram este intervalo podem ser considerados fisicamente inconsistentes, tendo sido reescalados, de forma que os valores negativos foram transformados em 0% e valores acima de 100%, em 100%.

Por fim, no intuito de se avaliar os erros de estimativa, procedeu-se a validação cruzada do modelo gerado utilizando-se as 500 amostras de controle aleatórias separadas previamente. Duas análises foram realizadas: ajuste por meio da reta de regressão com o objetivo de verificar a correlação existente entre os dados estimados e os de controle; a subtração do valor estimado com o de referência, sendo que para uma modelagem perfeita, considerou-se que o universo da análise deve seguir uma distribuição normal com média zero.

3. Resultados e Discussão

Os resultados da modelagem relevaram uma boa correlação entre os valores de NDVI, calculados a partir de valores de reflectância no topo da atmosfera, e as referências de impermeabilização do solo calculadas a partir das ortofotos. A reta de regressão construída com ajuste linear obteve $R^2 = 0,77$ ($p < 0,05$), conforme ilustra a **Figura 2**.

Pode-se notar, na **Figura 2**, que tanto na base quanto no topo do gráfico, observam-se pontos contíguos formando uma linha reta. Estes pontos referem-se às localidades onde foram observadas variações nos valores de NDVI, porém não foram constatadas, por meio das ortofotos, alterações significativas nos níveis de impermeabilização. As variações de NDVI na base (entre 0 e 0,8), que correspondem a 0% de impermeabilização, foram mais intensas que no topo (entre 0 e 0,4), correspondendo a 100% de impermeabilização. Essas variações dos valores de NDVI sem alterações no nível de impermeabilização se devem à grande diversidade espectral dos materiais construtivos presentes no tecido urbano. Apesar destas anomalias, os pontos distribuídos ao longo da reta de regressão revelaram que o NDVI foi capaz de explicar boa parte das variações relacionadas ao revestimento do solo.

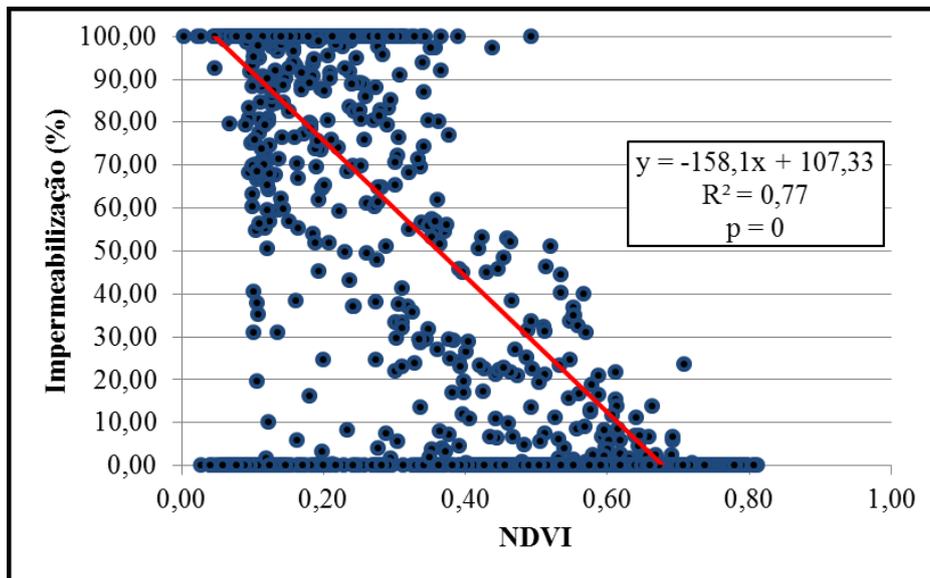


Figura 2: Reta de regressão comparativa dos valores de NDVI com os valores de impermeabilização do solo extraídos das ortofotos.

A partir da equação da reta da **Figura 2**, foi possível estimar o percentual de impermeabilização para os pixels da imagem NDVI, obtendo-se resultados condizentes com a estrutura urbana da RMSP. Analisando-se os dados estatísticos presentes na **Figura 3**, é possível afirmar que 77,4% da imagem foi modelada de acordo com a realidade plausível, ou seja, áreas impermeáveis foram tratadas como superfícies impermeáveis e áreas permeáveis como superfícies permeáveis. Os 22,6% restantes representam valores que extrapolaram o intervalo 0-100%, indicando possíveis equívocos presentes na modelagem.

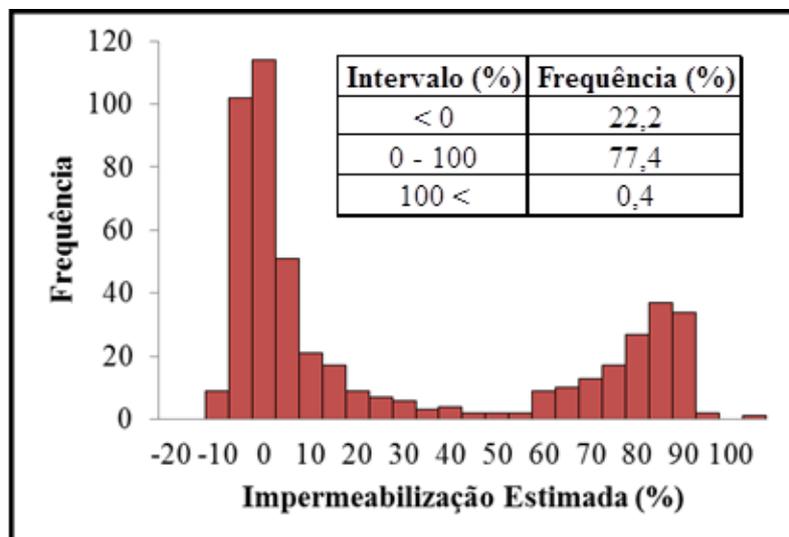


Figura 3. Distribuição dos valores estimados de impermeabilização do solo.

Após avaliarmos as formas de uso e ocupação associadas a esses erros, concluiu-se que a maior parte dos desvios é constituída de valores negativos observados em áreas rurais e com relevo mais ondulado, especialmente nas faces mais iluminadas das vertentes. Apesar do NDVI amenizar o efeito de diferença de iluminação causada pelo relevo, este problema ainda persistiu na modelagem. Não se observou valores negativos expressivos dentro da mancha urbana. Por outro lado, valores acima de 100% foram observados principalmente nos grandes corpos d'água, em razão da caracterização dessas superfícies no índice NDVI, o que resultou na extrapolação das estimativas. Para evitar interpretações equivocadas desses resultados, procedeu-se o reescalonamento dos valores conforme as descrições já apresentadas na metodologia (valores acima de 100% foram equiparados a 100% e valores negativos foram equiparados a 0%). Ademais, vale ainda ressaltar que os valores negativos de impermeabilização não distam mais de meio desvio padrão do valor nulo, conforme pode ser constatado na **Figura 9 (b)**.

A **Figura 4** ilustra o resultado final do mapeamento. Os níveis de impermeabilização do solo são distinguidos de acordo com a intensidade de níveis de cinza. Em outras palavras, quanto maior a impermeabilização, mais claro é o brilho do pixel da imagem. Conforme pode ser observado, a mancha urbana foi bem destacada das áreas rurais. Ademais, é possível notar, especialmente na franja urbana, tonalidades intermediárias que denotam mistura de materiais permeáveis e impermeáveis, o que é de se esperar, haja vista se tratar de áreas de expansão ou de transição entre o urbano e rural.

A priori, observou-se uma variação contínua nos valores de impermeabilização do solo seguindo uma distribuição bimodal com um ligeiro domínio de pixels (cerca de 65%) com valores abaixo de 50% de impermeabilização. Tal fato decorre da RMSP ser composta também por áreas rurais, represas, matas etc. Restringindo rapidamente a análise dentro da mancha urbana, o nível de impermeabilização superou a taxa de 80%.

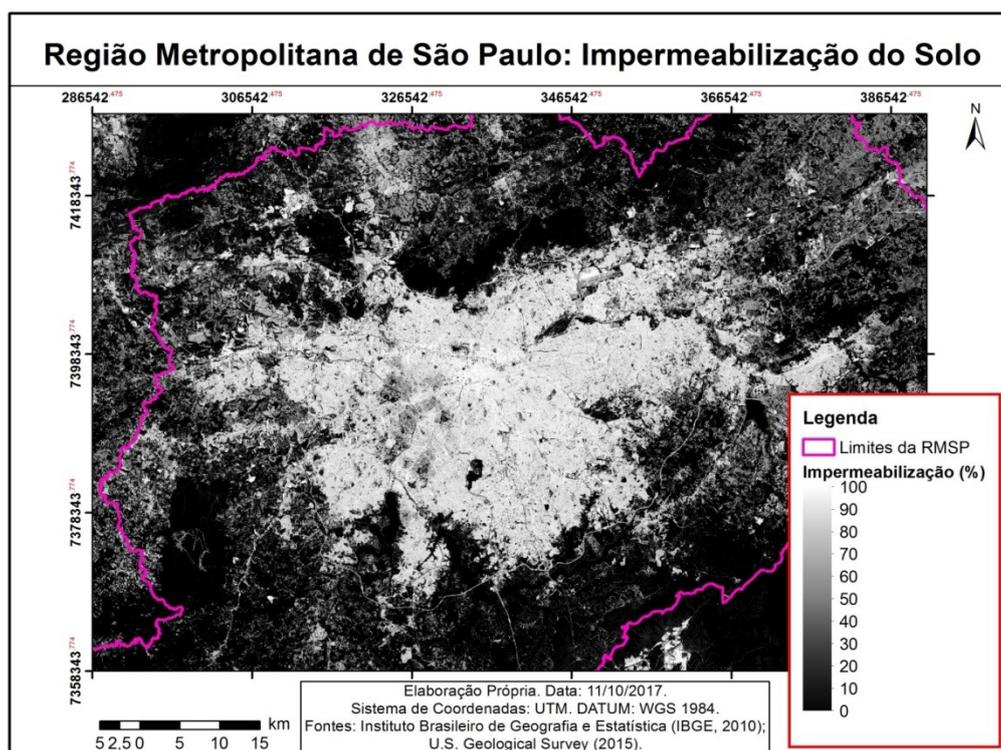


Figura 4: Percentuais de impermeabilização estimados dos valores de NDVI.

Dentro do contínuo urbano, como regra geral, observam-se altas porcentagens de impermeabilização (acima de 50%), que são interrompidas pela presença especialmente de arborizações e gramados nas ruas e parques. Estas áreas de menor impermeabilização e maior presença de vegetação correspondem aos bairros que teoricamente são mais valorizados e que possuem os melhores indicadores de qualidade de vida (Morato *et al.*, 2005). Na região oeste, dentro do contínuo, observa-se, por exemplo, uma mancha mais expressiva de tonalidade média onde estão localizados os distritos administrativos da Jardim Paulista, Morumbi, Pinheiros,

Itaim Bibi e Butantã, sendo que, neste último, fica localizado o campus principal da Universidade de São Paulo (USP) (Figura 5).

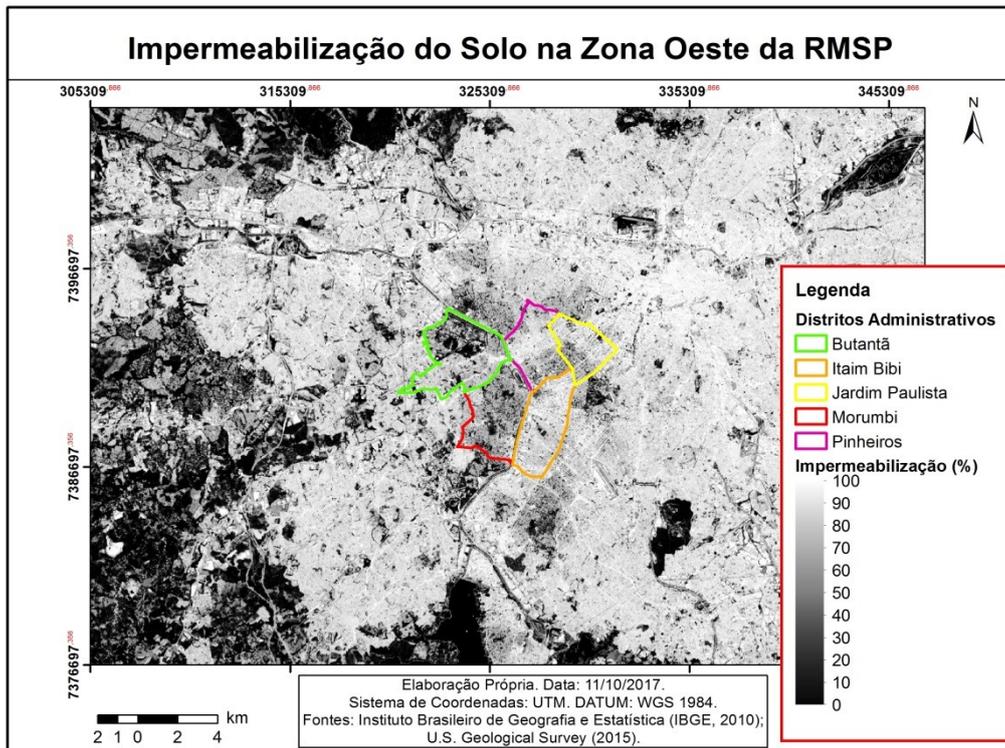


Figura 5: Percentuais de Impermeabilização em alguns distritos administrativos da RMSP.

Na Figura 6 é possível visualizar uma linha branca que se destaca formando um arco, o qual corresponde ao trecho sul do Rodoanel Mário Covas (oficialmente SP-021). Salienta-se, desta forma, a nitidez com que o sistema viário foi realçado.

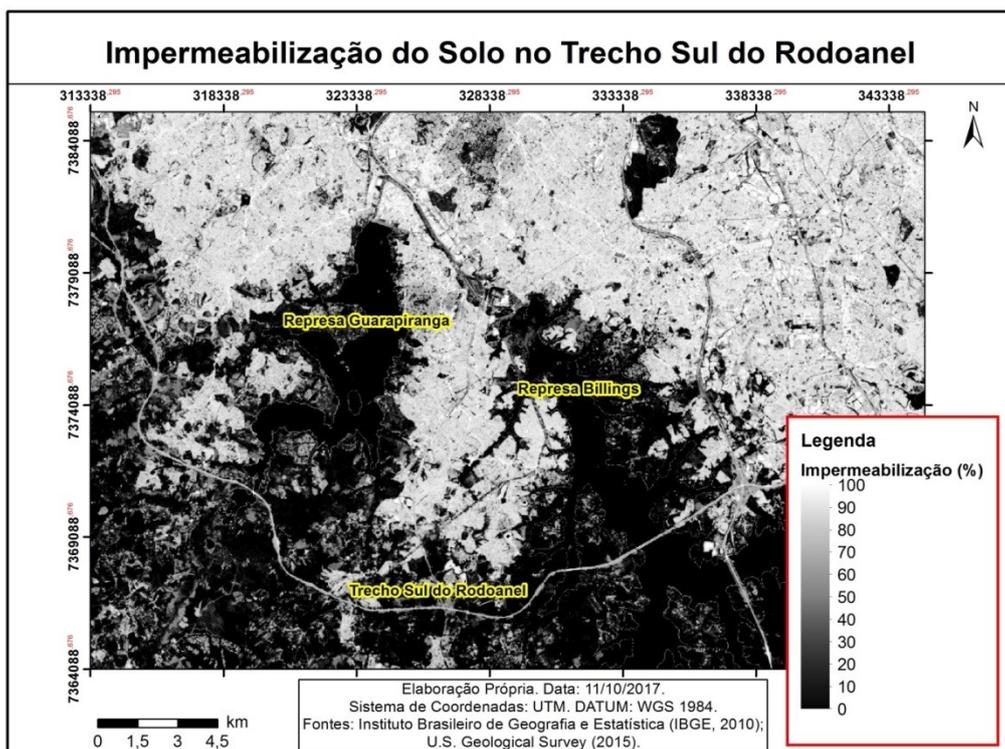


Figura 6: Impermeabilização do Solo ao redor do trecho sul do Rodoanel.

Ao se proceder a análise dos erros de modelagem, nota-se que o principal equívoco encontrado foi considerar classes permeáveis de alto albedo como superfície impermeável. Estas classes (solo exposto preparado para o cultivo, loteamentos, entornos das represas etc.) foram modeladas como apresentando altas porcentagens de impermeabilização do solo (frequentemente acima de 90%). Os casos mais evidentes deste erro são encontrados nas margens dos grandes reservatórios de água que circundam a RMSP (Alto Cotia, Guarapiranga, Billings, Paiva Castro e Taiaçupeba). Em razão do rebaixamento expressivo dos níveis de água dessas represas em decorrência da forte seca que atingiu a região no ano de 2015, observou-se em suas margens extensas faixas contínuas de solo exposto que antes eram cobertos pelas águas. As áreas de pasto seco também apresentaram valores de impermeabilização da ordem de 30 a 40%, daí a explicação para tonalidades cinza nas áreas rurais. Apesar de os erros de modelagem serem frequentemente interpretados negativamente, são essenciais para que se possa ponderar a validade do modelo, não o invalidando necessariamente. Estudos futuros sobre a temática devem procurar abordar outros índices explicativos para a elaboração do modelo estimativo que não o NDVI no intuito de se superar esta limitação imposta pelo referido índice.

Conforme já mencionado, operou-se também uma avaliação quantitativa do modelo por meio do método de validação cruzada. Os valores de impermeabilização estimados foram equiparados com um conjunto de 500 amostras de referência, eleitas aleatoriamente, conforme indicado previamente. Na técnica de validação cruzada, os valores estimados que se igualam aos valores das amostras de controle (valores do modelo = valores das amostras de referência) são considerados consistentes, enquanto as diferenças observadas nesses valores são considerados erros (resíduos), que podem ser significativos ou não. A **Figura 7** ilustra a relação e a distribuição de frequência dos valores estimados e de referência.

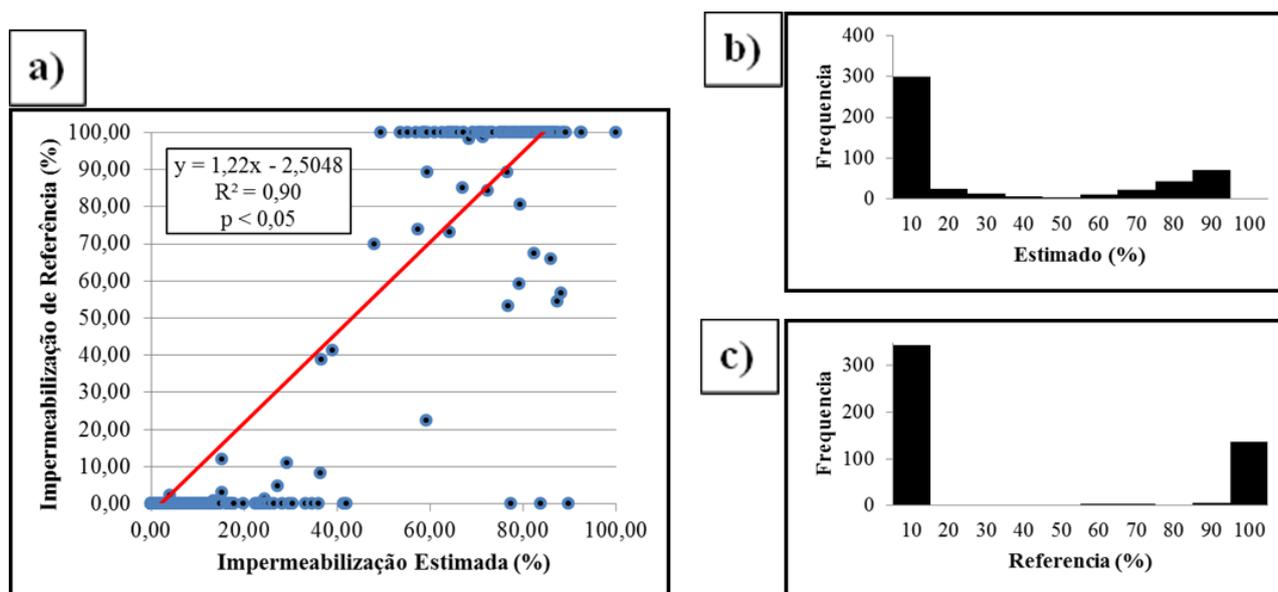


Figura 7. (a) Validação dos resultados obtidos comparando a porcentagem de superfície impermeável estimada com as amostras de referência; (b) histograma dos valores estimados; (c) histograma das amostras de referência.

Conforme pode ser observado na **Figura 7 (a)**, o valor R^2 do ajuste linear (linha tracejada) foi de 0,9 ($p < 0,05$), evidenciando, portanto, uma boa relação entre os valores estimados e os de controle. Observa-se, porém, que a nuvem de pontos não se distribui na forma de uma elipse ao longo da reta de ajuste, sugerindo, portanto, que o erro associado não segue um modelo de distribuição normal. Esta suspeita foi confirmada com o teste de normalidade Shapiro-Wilk ($p < 0,05$). A linha tracejada (reta inclinada a 45°) no gráfico representa a relação perfeita entre ambos os valores, de modo que os pontos dispersos acima dessa reta representam subestimativas do modelo, enquanto os pontos abaixo da reta são superestimativas.

As **Figuras 7 (b) e (c)** revelam outro aspecto interessante da pesquisa. É possível observar, claramente, que os valores estimados pelo método de regressão linear apresentam maior variabilidade que as amostras de controle em termos de porcentagem de impermeabilização do solo. Tal fato está provavelmente relacionado à grande diversidade de materiais impermeáveis com diferentes assinaturas espectrais encontrados na superfície analisada.

A análise dos resíduos permitiu avaliar a predominância do erro existente na modelagem. A **Figura 8** ilustra o (a) histograma e o (b) diagrama de caixa (*boxplot*) dos resíduos. É possível constatar nos gráficos apresentados uma ligeira assimetria da distribuição em direção aos valores positivos. O *boxplot* revela alguns aspectos interessantes, como, por exemplo, que a dispersão é menor no terceiro quartil do que no segundo. Ademais, os valores positivos estão mais dispersos do que os negativos, apresentando maior distância em relação à média.

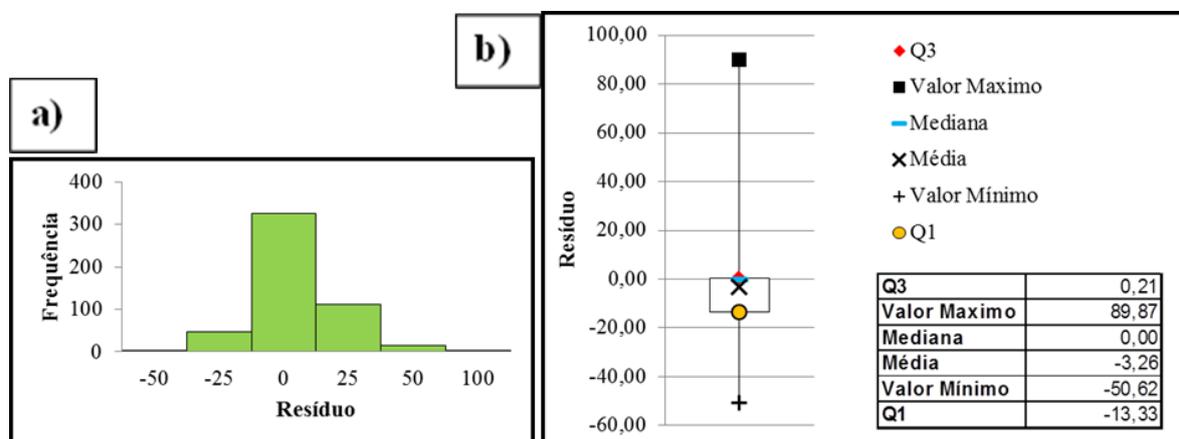


Figura 8. Distribuição do resíduo - diferença entre o valor estimado e o valor de referência.

A mediana, bem como a moda dos valores residuais foram 0, enquanto os valores da média e desvio padrão foram -3,26 e 16,1, respectivamente. O fato de a média apresentar um leve valor negativo revela que, no geral, o modelo incorporou uma predominância de subestimativas do grau de impermeabilização do solo, porém não é possível afirmar que este erro é persistente para toda a área de estudo, uma vez que o desvio padrão elevado também revela a presença de erros de superestimativa.

Ademais, observou-se também uma boa correlação entre os valores de NDVI, calculados a partir de valores de reflectância em superfície, e as referências de impermeabilização do solo calculadas a partir das ortofotos. A reta de regressão construída com ajuste linear obteve $R^2 = 0,76$ ($p < 0,05$). Entretanto, uma análise posterior dos resíduos deste modelo apresentou $R^2 = 0,88$, média igual a -5,18%, desvio padrão de 15,74 e $p = 0,000148$. Destarte, os resultados obtidos das imagens nas quais se aplicou um método de correção atmosférica foram inferiores aos observados quando não se realiza este tipo de correção. Uma explicação possível para estes resultados é a interferência que a impermeabilização pode promover nos estratos inferiores da atmosfera, não considerada neste estudo. Faz-se necessário, portanto, maiores investigações a respeito da relação entre a impermeabilização e seus efeitos atmosféricos.

Por fim, é relevante considerar que, por se tratar de uma pesquisa ainda em andamento, nas etapas seguintes será necessário identificar as principais classes de uso e ocupação do solo que contribuem com os erros de superestimativa e de subestimativa, bem como as que possuem maior aderência ao modelo. Ao realizar essa identificação, novos questionamentos e conclusões poderão ser levantados, bem como sugerir novos índices, mais adequados do que o NDVI, para modelos estimativos de superfícies impermeáveis. Ademais, outros estudos poderão indicar a necessidade de se aprimorar o conhecimento da técnica de regressão linear aplicada ao mapeamento de superfícies impermeáveis em áreas urbanas utilizando-se imagens oriundas de outros sensores remotos que não os acoplados ao Landsat-8.

4. Conclusão

Os resultados alcançados no presente estudo mostraram a eficácia do método de regressão linear para prever o grau de impermeabilização do solo tendo como variável explicativa os valores do índice de vegetação NDVI. Dentro do contínuo urbano, as áreas foram bem modeladas, apresentando porcentagens de impermeabilização do solo muitas vezes acima de 50%, interrompidas pela presença de arborização, gramados, parques, etc. As rodovias também foram bem evidenciadas. O principal erro encontrado no modelo foi considerar classes permeáveis de alto albedo como superfície impermeável. As áreas de pasto seco também contribuíram com este erro. Ao comparar a porcentagem de superfície impermeável estimada pelo modelo

com amostras de controle, observou-se que o coeficiente de determinação apresentou valor superior a 0,9 ($p < 0,05$). A análise dos resíduos também mostrou que a superfície estimada é ligeiramente inferior ao “real”, porém podem ocorrer erros tanto de superestimativa quanto subestimativa dependendo da localidade. Como consequência dos resultados encontrados nesta pesquisa, sugere-se a necessidade de estudos que procurem estabelecer outras variáveis independentes para estimativa de superfícies impermeáveis, bem como que se disponham a avaliar a metodologia aqui utilizada para produtos de outros sensores remotos além dos acoplados ao satélite Landsat-8. Ademais, faz-se necessário, também, maiores investigações a respeito da relação entre a impermeabilização e seus efeitos atmosféricos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa Unificado de Bolsas de Estudos 2016, USP e à Fapesp (Processo 2016/17698-9). Agradecimentos cordiais aos avaliadores anônimos que muito contribuíram pela qualidade do artigo.

REFERÊNCIAS

- ARNOLD, C. L.; GIBBONS, C. J. Impervious Surface Coverage: The Emergence of a Key Environmental Indicator. **Journal of the American Planning Association**, v. 62, n. 2012, p. 243–258, 1996.
- BAUER, M. E.; LOFFELHOLZ, B. C.; WILSON, B. **Estimating and mapping impervious surface area by regression analysis of Landsat imagery**. In: WENG, Q. (Orgs.). *Remote Sensing of Impervious Surfaces*. Boca Raton: CRC Press, 2007. p.2-20.
- CANTERS, F.; CHORMANSKI, J.; VOORDE, T. V.; BATELAAN, O. Effects of different methods for estimating impervious surface cover on runoff estimation at catchment level. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPATIAL ACCURACY ASSESSMENT IN NATURAL RESOURCES AND ENVIRONMENTAL SCIENCES, 7; 2006, Lisboa. **Anais...** Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, 2006, p.557-566.
- CERON, A. O.; DINIZ, J. A. F. O Uso das fotografias aéreas na identificação das formas de utilização agrícola da terra. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 2, p. 161–173, 1966.
- CHANGNON, S. A. Inadvertent weather modification in urban areas: lessons for global climate change. **Bull. Am. Meteorol. Soc.**, v. 73, p. 619–627, 1992.
- ELVIDGE, C. D.; MILESI, C.; DIETZ, J.; TUTTLE, B.; SUTTON, P. C.; NEMANI, R.; VOGELMANN, J. E. U.S. Constructed area approaches the size of Ohio. **EOS Transactions**, v. 85, n. 4, p. 233–240, 2004.
- EMPLASA (EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO S/A) *Recobrimento Aerofotogramétrico do Estado de São Paulo*. São Paulo, 2010.
- EMPLASA (EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO S/A) **Região Metropolitana de São Paulo**. São Paulo, 2016. Disponível em: <<https://www.emplasa.sp.gov.br/RMSP>>. Acesso em 20 out. 2017.
- JENSEN, J. R. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. Second edition. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2005.
- LU, D.; LI, G.; KUANG, E.; MORAN, E. Methods to extract impervious surface areas from satellite images. **International Journal of Digital Earth**, v. 7, n. 2, p. 93–112, 16 dez. 2013.
- MORATO, R. G.; KAWAKUBO, F. S.; LUCHIARI, A. Avaliação da qualidade de vida urbana por meio de técnicas de geoprocessamento. In: ENCONTRO DE GEÓGRAFOS DA AMÉRICA LATINA, 10; 2005, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Universidade de São Paulo, 2005, p. 9769-9784.
- PAINE, D.; KISER, J. D. **Aerial photography and image interpretation**. NJ:John Wiley & Sons, 2012. 656 p.
- SAKUNO, N. R. R.; KAWAKUBO, F. S.; SPALEVIC, V.; MINCATO, R. L. Mapeamento de Superfícies Impermeáveis em Áreas Urbanas Utilizando Imagens Índices Geradas Pelo Sistema Landsat-5 Thematic Mapper. **Revista do Departamento de Geografia da USP**, São Paulo, Volume Especial, Eixo 9, pp.190-198, 2017.

- SCHUELER, T. R. The Importance of Imperviousness. **Watershed Protection Techniques**, v. 1, n. 3, p. 100–111, 1994.
- TOCCI, C. E. M. **Água no meio urbano**. Porto Alegre: UFRGS, 1997. 40 p.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Earth Explorer**. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em 17 out. 2017.
- VAN DE VOORDE, T.; DE ROECK, T.; CANTERS, F. A comparison of two spectral mixture modelling approaches for impervious surface mapping in urban areas. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, p. 4785–4806, 2009.
- VAN DE VOORDE, T.; JACQUET, W.; CANTERS, F. Mapping form and function in urban areas: An approach based on urban metrics and continuous impervious surface data. **Landscape and Urban Planning**, v. 102, n. 3, p. 143–155, 2011.
- WENG, Q. Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: requirements, methods, and trends. **Remote Sensing of Environment**, v. 117, p. 34–49, 2012.
- WENG, Q. **Remote Sensing of Impervious Surfaces**. Boca Raton: CRC Press, 2007. 488p.
- WU, C. Quantifying high-resolution impervious surfaces using spectral mixture analysis. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 11, p. 2915–2932, 2009.
- YANG, F.; MATSUSHITA, B.; FUKUSHIMA, T. A pre-screened and normalized multiple endmember spectral mixture analysis for mapping impervious surface area in Lake Kasumigaura Basin, Japan. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 65, n. 5, p. 479–490, 2010.
- YANG, L.; HUANG, C.; HOMER, C. G.; WYLIE, B. K.; COAN, M. J. An approach for mapping large-area impervious surfaces: synergistic use of Landsat-7 ETM+ and high spatial resolution imagery. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v.29, n.2, pp.230-240, 2003.
- YUAN, F.; BAUER, M. E. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 106, n. 3, p. 375–386, 2007.
- ZHANG, X.; ZHONG, T.; WANG, K.; CHENG, Z. Scaling of impervious surface area and vegetation as indicators to urban land surface temperature using satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 4, p. 841–859, 2009.