

RAE-CEA-18P07

RELATÓRIO DE ANÁLISE ESTATÍSTICA SOBRE O PROJETO:

“O impacto da supressão da vegetação no microclima urbano”

Chang Chiann

Michel Soares

Vinicius Soares Martins Alves

São Paulo, julho de 2018

CENTRO DE ESTATÍSTICA APLICADA – CEA – USP
RELATÓRIO DE ANÁLISE ESTATÍSTICA

TÍTULO: Relatório de análise estatística sobre o projeto: “O impacto da supressão da vegetação no microclima urbano”

PESQUISADORA: Luciana Schwandner Ferreira

ORIENTADORA: Prof. Dra. Denise Duarte

INSTITUIÇÃO: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – USP

FINALIDADE: Doutorado

RESPONSÁVEIS PELA ANÁLISE: Prof. Dra. Chang Chiann
Michel Soares
Vinicius Soares Martins Alves

REFERÊNCIA DESTE TRABALHO:

CHIANN, C.; SOARES, M.; ALVES, V. S. M. (2018). **Relatório de análise estatística sobre o projeto: “O impacto da supressão da vegetação no microclima urbano”**. São Paulo, IME-USP, 2018. (RAE – CEA – 18P07)

FICHA TÉCNICA

REFERÊNCIAS

CARVALHO JÚNIOR, O. A.; CARVALHO, A. P. F.; MENESES, P. R.; GUIMARÃES, R. F. (2002). **Classificação e eliminação dos ruídos em imagens hiperespectrais pela análise sequencial da transformação por fração de ruído mínima**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 20, n. 1, p. 31-41.

COUTO JUNIOR, A. F.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; MARTINS, E. S. (2013). **Séries temporais de NDVI, EVI e NDWI do Sensor MODIS para caracterização fenológica do algodão**. Revista Brasileira de Cartografia, v. 65, n. 1, p. 199-210.

DIDAN, K.; HUETE, A. (2006). **MODIS vegetation index product series: collection 5 change summary**. Tucson: The University of Arizona, 17p.

DIDAN, K. (2015). **MYD13Q1 MODIS/Aqua Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006 [Data set]**. Disponível em: <<https://doi.org/10.5067/MODIS/MYD13Q1.006>>. Acesso em: 03 abr. 2018.

ELIAN, S. N. (1988). **Análise de regressão**. São Paulo, IME/USP, 1988. 232p. Publicações do Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo.

EMPLASA – Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano SA (2018). **Sobre a RMSP**. Disponível em: <<https://www.emplasa.sp.gov.br/RMSP>>. Acesso em: 21 abr. 2018.

GHENO, E. L.; FRANÇA, M. S.; MAITELLI, G. T. (2012). **Variações microclimáticas na área urbana de Sinop/MT no final da estação chuvosa**. *Revista Educação, Cultura e Sociedade*, Sinop/MT, v. 2, n. 1, p. 139-153, jan./jun. 2012.

HIJMANS, R. J. (2017). **raster: Geographic Data Analysis and Modeling**. R package version 2.6-7. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=raster>>. Acesso em 06 mai. 2018.

HUETE, A.; JUSTICE, C.; LEEUWEN, W. van. (1999). **MODIS vegetation index (MOD 13): algorithm theoretical basis document. Version 3.** Washington: National Aeronautics and Space Administration, 129p.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X; FERREIRA, L. G. (2002). **Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices.** Remote Sensing of Environment, v. 83, n. 1-2, p. 195–213.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2015). **Áreas Urbanizadas do Brasil: 2015.** Disponível em <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2100639>>. Acesso em: 23 abr. 2018.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. (2006). **Análise de Séries Temporais.** 2a edição. Editora Blücher, São Paulo.

R CORE TEAM (2018). **R: A Language and environment for statistical computing.** R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 01 mai. 2018.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. (1973). **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS.** *Proceedings of the Third ERTS Symposium*, NASA SP-351, NASA, Washington, DC, v. 1, p. 309–317.

UNITED NATIONS, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2015). **World Urbanization Prospects: The 2014 Revision.** Nova York. Disponível em: <<https://esa.un.org/unpd/wup/>>. Acesso em: 21 abr. 2018.

WAN, Z.; HOOK, S.; HULLEY, G. (2015). **MYD11A2 MODIS/Aqua Land Surface Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 1km SIN Grid V006 [Data set].** Disponível em: <<https://doi.org/10.5067/MODIS/MYD11A2.006>>. Acesso em: 03 abr. 2018.

PROGRAMAS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS

Microsoft® Word 2016

Microsoft® Excel 2016

R versões 3.4.4 e 3.5.0.

RStudio versões 1.1.442 e 1.1.453

TÉCNICAS ESTATÍSTICAS UTILIZADAS [classificação “Statistical Theory & Method Abstracts (ISI)”]

Análise Descritiva Unidimensional (03:010)

Análise Descritiva Multidimensional (03:020)

Análise de Séries Temporais (11:010)

Análise de Regressão (07:020)

Outros (07:990)

ÁREAS DE APLICAÇÃO

Outros (14:990)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1. JUSTIFICATIVA	8
1.2. OBJETIVO.....	9
2. ÁREA DE ESTUDO	9
3. DESCRIÇÃO DO ESTUDO E COLETA DE DADOS	10
3.1. IMAGENS ORBITAIS UTILIZADAS NAS ANÁLISES	10
3.2. DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS	13
3.3. ORGANIZAÇÃO DO BANCO DE DADOS	13
3.4. METODOLOGIA DE ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL	14
4. ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS	14
4.1. VALORES EXTREMOS PARA AS VARIÁVEIS LST DIA E LST NOITE.....	14
4.2. DADOS FALTANTES.....	15
4.3. EQUIPARAÇÃO DAS RESOLUÇÕES DOS CONJUNTOS DE IMAGENS	15
4.4. ÍNDICES NAS ÁREAS OCUPADAS POR CORPOS DE ÁGUA.....	16
5. ANÁLISE DESCRITIVA DAS SÉRIES TEMPORAIS.....	17
5.1. SÉRIES TEMPORAIS PARA AS VARIÁVEIS LST DIA, LST NOITE, EVI E NDVI	17
6. AVALIAÇÃO DA INCLINAÇÃO COM SIGNIFICÂNCIA PRÁTICA	19
7. CONCLUSÕES.....	23
APÊNDICE A: GRÁFICOS	25
APÊNDICE B: TABELAS	42
APÊNDICE C: FIGURAS	48

RESUMO

O crescimento exacerbado dos centros urbanos traz consigo mudanças profundas na cobertura vegetal nativa com sua substituição por materiais e equipamentos urbanos, resultando em alterações no microclima local, sobretudo nas condições térmicas. O objetivo do presente estudo é avaliar como a vegetação e a temperatura de superfície se inter-relacionam e como a supressão da cobertura vegetal impacta na temperatura de superfície da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Para isso, foram coletadas imagens de sensoriamento remoto, que fornecem as medidas das variáveis de interesse. A avaliação da relação entre a vegetação e a temperatura de superfície é útil na indicação de políticas públicas de manejo, conservação e uso sustentável das coberturas vegetais.

A análise dos dados, realizada por meio de técnicas de séries temporais e de regressão linear, permitiu concluir que nas regiões centrais houve uma leve queda na temperatura da superfície entre os anos de 2003 e 2017. Já em porções dos municípios de Cajamar e Jandira notou-se a perda de vegetação e o aumento da temperatura de superfície durante o dia. Verificou-se também a crescente perda de áreas verdes nos entornos de São Paulo e no traçado do Rodoanel, coincidindo com o aumento da temperatura nessas regiões.

1. Introdução

1.1. Justificativa

Um fenômeno que se intensifica nos últimos anos é o crescimento exacerbado dos centros urbanos. O último relatório “Perspectivas da Urbanização Mundial”, publicado em 2015 pela Organização das Nações Unidas (ONU), aponta que até 2050, as cidades abrigarão dois terços da população mundial. Esse é um cenário preocupante, já que o processo de urbanização traz consigo mudanças profundas na cobertura vegetal nativa, com sua substituição por materiais e equipamentos urbanos, tais como prédios e ruas asfaltadas. Essas transformações ocasionam desequilíbrio no meio ambiente da Terra, resultando em alterações no microclima local, sobretudo em condições térmicas como a temperatura de superfície terrestre (Ghenou *et al.*, 2012).

Na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) o processo de urbanização acontece de maneira intensa. O adensamento populacional da porção central da RMSP (Figura C.1) resulta em um movimento de urbanização que se dá do centro para as bordas. Essa expansão da RMSP para regiões distantes do seu centro implica na saturação, consumo e remoção de remanescentes florestais, como a Reserva da Biosfera do Cinturão Verde da Cidade de São Paulo e as Áreas de Proteção aos Mananciais (Figuras C.2 e C.3).

O monitoramento da temperatura de superfície terrestre e sua relação com o estado de preservação de áreas verdes é de grande importância para o planejamento urbano, pois permite avaliar o impacto provocado pelas atividades antrópicas no conforto térmico, e por consequência, na qualidade de vida da população local. Logo, estudos sobre a relação entre a temperatura de superfície e a vegetação são fundamentais para a indicação de políticas públicas de manejo, conservação e uso sustentável das coberturas vegetais.

Por tudo isso, a fim de avaliar as mudanças que ocorreram na RMSP, foram coletadas via sensoriamento remoto informações sobre a temperatura de superfície e vegetação de todo o território de interesse para o período de 2003 a 2017, totalizando 15 anos. Assim, por meio de uma avaliação científica, pretende-se aferir quais áreas passaram pelas maiores modificações em sua cobertura vegetal e como essas mudanças impactaram no clima urbano.

1.2. Objetivo

O objetivo desse projeto é, a partir de dados obtidos via sensoriamento remoto, analisar a mudança ocorrida na vegetação e na temperatura de superfície na Região Metropolitana de São Paulo no período entre 2003 e 2017 e verificar a relação entre essas mudanças.

2. Área de estudo

A área de estudo compreende a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) (Figuras C.4 e C.5).

A RMSP é composta por 39 municípios e abrange uma área de aproximadamente 7.950 km², onde cerca de 21,4 milhões de habitantes aglomeram-se num espaço urbanizado de 2.016 km² (IBGE, 2015). Esses números colocam a RMSP como a principal concentração urbana do país. Do ponto de vista econômico, a RMSP centraliza importantes complexos industriais, comerciais e financeiros, concentrando mais da metade do Produto Interno Bruto (PIB) paulista e cerca de 18% do PIB brasileiro, sendo, portanto, um polo estratégico para as economias estadual e nacional (EMPLASA, 2018).

3. Descrição do estudo e coleta de dados

3.1. Imagens orbitais utilizadas nas análises

O estudo foi conduzido tendo como referências imagens orbitais fornecidas pelo *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), sistema de observação terrestre desenvolvido pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e projetado para medir os processos físicos e biológicos diários e em escala global, com o propósito de compreender a dinâmica e os processos que ocorrem na superfície da terra e na atmosfera inferior. O primeiro sensor foi montado na plataforma Terra da NASA em 1999, fornecendo produtos MODIS desde 2000. O segundo sensor foi lançado em 2002 a bordo da plataforma Aqua da NASA (Carvalho *et al.*, 2012; Huete *et al.*, 2002). Uma característica importante do MODIS é a correção dos efeitos atmosféricos (nuvens, aerossóis, etc.) e a disponibilidade de dados georreferenciados.

Um produto do sensoriamento orbital produzido pelo MODIS é a imagem que fornece a Temperatura de Superfície Terrestre (LST, do inglês, *Land Surface Temperature*). Nesse caso, cada pixel conterá a temperatura (em escala Kelvin) da região de 1 km² que ele contempla. O sensoriamento remoto para a obtenção das temperaturas de superfície é realizado durante 8 dias e, após esse intervalo, cada pixel da imagem final é obtido pela média simples de todas as imagens coletadas durante os 8 dias, no correspondente pixel (Wan, 2015).

Para o estudo da temperatura de superfície terrestre (LST Dia e LST Noite) foram coletadas 690 imagens do produto MYD11A2 (versão 6) para cada uma das variáveis, em projeção sinusoidal. A temperatura é medida de dia, aproximadamente às 13h30 (hora solar), e de noite, por volta das 1h30. As imagens coletadas compreenderam o recorte no tempo que vai de 01 de janeiro de 2003 até 31 de dezembro de 2017. Cada uma das 690 imagens corresponde ao período de 8 dias com as temperaturas médias dos pixels calculados conforme delineado no parágrafo anterior.

Cada imagem acompanha uma segunda imagem que relaciona o pixel com um erro de medição instrumental estimado pelo MODIS, de acordo com a presença de nuvens e aerossóis. Para esse projeto, foram mantidos os pixels com erro de no máximo 2 K¹. Também há uma terceira imagem acompanhante que informa, para cada pixel, em quantos dias foi possível obter uma medição de temperatura a fim de se calcular a média de 8 dias da imagem final.

Um outro produto do monitoramento da superfície terrestre realizado pelo MODIS resulta em imagens que fornecem o Índice de Vegetação Realçado (EVI, do inglês *Enhanced Vegetation Index*) e o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI, do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*). Esses índices são gerados a partir dos valores de reflectância de bandas individuais na faixa espectral do azul, vermelho e infravermelho das imagens capturadas pelo sensor remoto.

O índice NDVI é mais sensível à presença de clorofila e outros pigmentos responsáveis pela absorção da radiação solar na banda do vermelho e é calculado por meio da seguinte formulação:

$$NDVI = \frac{(P_{nir} - P_{red})}{(P_{nir} + P_{red})} ,$$

em que P_{nir} e P_{red} são os valores de reflectância no infravermelho e na faixa do vermelho, respectivamente (Rouse *et al.*, 1973).

O índice EVI é mais sensível à variação da estrutura e arquitetura do dossel e da fisionomia da planta e é calculado por meio da seguinte equação:

$$EVI = G \cdot \frac{(P_{nir} - P_{red})}{(L + P_{nir} + C_1 P_{red} + C_2 P_{blue})} ,$$

¹ Detalhes sobre a garantia de qualidade dos produtos MODIS LST estão disponíveis para consulta em: <https://lpdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/product_documentation/mod11_user_guide.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2018.

em que ρ_{nir} , ρ_{red} e ρ_{blue} são os valores de reflectância no infravermelho, na faixa do vermelho e na faixa do azul, respectivamente; G é o fator de ganho; C_1 é o coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para a banda do vermelho; C_2 é o coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para a banda do azul e L é o fator de correção para a interferência do solo. Para o MODIS, os valores dos coeficientes do índice EVI são $C_1 = 6$; $C_2 = 7,5$; $L = 1$ e $G = 2,5$ (Huete *et al.*, 1999).

Nos produtos MODIS, cada pixel das imagens de EVI e NDVI contém o índice de vegetação da região de 250 m² que ele contempla. O sensoriamento remoto é feito durante 16 dias e, após esse intervalo, as imagens parciais são processadas por um algoritmo que realiza um filtro, selecionando os “melhores” pixels de cada imagem. Os pixels de melhor qualidade são os que irão compor a imagem final (Huet *et al.*, 1999; Didan e Huet, 2006; Didan, 2015).

Para o estudo dos índices de vegetação NDVI e EVI foram coletadas 345 imagens do produto MYD13Q1 (versão 6) para cada um dos índices em projeção sinusoidal, no período de 01 de janeiro de 2003 à 31 de dezembro de 2017. Cada uma das 345 imagens corresponde ao período de 16 dias com os valores de índice de vegetação dos pixels calculados conforme delineado no parágrafo anterior.

Nesse projeto, as unidades observacionais são os pixels presentes em cada uma das imagens coletadas. São eles que fornecem as medidas das variáveis estudadas. Após o recorte da área correspondente à RMSP, obtemos 9.274 pixels em cada imagem que fornece as temperaturas de superfície e 148.396 pixels em cada imagem de índices de vegetação. Cada imagem representa um ponto no tempo considerado nessa análise.

Adicionalmente, foram fornecidos mapas que dividem a RMSP de acordo com o município, distrito e Unidade de Informação Territorializada (UIT). Essa última divisão foi desenvolvida pela Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano (EMPLASA), levando em conta critérios socioeconômicos, geográficos e de ocupação do solo.

3.2. Descrição das variáveis

As variáveis consideradas no estudo são descritas a seguir.

- **LST Dia** (em °C): Média da temperatura de superfície terrestre para o período de 8 dias com valores medidos em horário próximo às 13h30. Consideramos a escala Celsius (°C).
- **LST Noite** (em °C): Média da temperatura de superfície terrestre para o período de 8 dias com valores medidos em horário próximo às 1h30. Consideramos a escala Celsius (°C).
- **NDVI** (em unidades de NDVI): Índice de Vegetação da Diferença Normalizada para o período de 16 dias, obtido nos melhores pixels das 16 imagens diárias e medido em escala que varia de -0,2 a 1, com valores maiores indicando maior presença de cobertura vegetal e com valores negativos ocorrendo somente em corpos de água.
- **EVI** (em unidades de EVI): Índice de Vegetação Realçado para o período de 16 dias, obtido nos melhores pixels das 16 imagens diárias e medido em escala que varia de -0,2 a 1, com valores maiores indicando maior presença de cobertura vegetal e com valores negativos ocorrendo somente em corpos de água.

As temperaturas de superfície terrestre são fornecidas na escala Kelvin e foram convertidas para a escala de graus Celsius para as análises realizadas nesse projeto.

3.3. Organização do banco de dados

As imagens usadas nas análises foram organizadas em quatro pastas: uma para cada conjunto de imagens correspondente às quatro variáveis descritas na seção

anterior, totalizando 345 imagens para cada índice de vegetação e 690 imagens para cada variável de temperatura.

3.4. Metodologia de análise espaço-temporal

A metodologia adotada para o estudo das inter-relações entre as variáveis de temperatura de superfície e os índices de vegetação baseia-se na análise espaço-temporal das séries de imagens. A ideia é obter a variável de interesse a partir da união das imagens relativas às diferentes datas em uma sequência de imagens, de modo que nos eixos “x” e “y” são fornecidas as coordenadas geográficas e no eixo “z” o tempo. (Figura C.6).

As imagens fornecidas pelos produtos MODIS são formadas por uma matriz de pixels. Cada pixel possui os dados geográficos espaciais – além de metadados – referentes à região espacial que ele contempla. No programa estatístico R o pacote *raster* é utilizado para lidar com esse tipo de imagem, fornecendo rotinas para a criação, leitura e manipulação de dados geográficos espaciais.

4. Análise exploratória dos dados

Inicialmente foi realizada uma análise exploratória dos dados, visando a familiarização com o conjunto de dados e a identificação de possíveis problemas oriundos à natureza de obtenção das imagens de sensoriamento remoto.

4.1. Valores extremos para as variáveis LST Dia e LST Noite

Durante a análise exploratória foram encontrados problemas no serviço fornecedor das imagens a serem utilizadas no estudo. Ocorriam, por todas as imagens,

alguns pontos com valores não plausíveis de temperatura de superfície para a RMSP, como valores abaixo de zero, ou temperaturas muito altas com valores baixos nos pixels de entorno. O problema foi relacionado pela pesquisadora responsável pelos dados com a mudança de projeção oferecida pelo serviço da NASA. A opção de consenso foi de buscar os dados em uma segunda fonte e usar a projeção original oferecida.

4.2. Dados faltantes

O primeiro problema identificado na análise exploratória foi a presença de dados faltantes nos conjuntos de imagens que fornecem as temperaturas de superfície e nos conjuntos de imagens que fornecem os índices de vegetação. Como dito, os dados provenientes de sensores orbitais estão sujeitos a interferências externas, resultando em alguns pixels faltantes nas imagens fornecidas (Gráficos A.1 a A.3).

É possível observar maior ocorrência de dados faltantes nos períodos mais quentes dos anos. Esse fato decorre da formação de nuvens carregadas nos dias em que a temperatura está mais alta.

Em razão desses dados faltantes foi realizado o ajuste da inclinação da reta correspondente à reta de regressão linear simples, com objetivo de captar apenas a tendência da série temporal. Esse estudo, conforme descrito na Seção 6, permitiu avaliar a significância prática da tendência observada na série temporal avaliada.

4.3. Equiparação das resoluções dos conjuntos de imagens

Outra modificação nas variáveis LST Dia e LST Noite que se fez necessária foi relacionada as suas resoluções. Nas imagens que contém o índice de vegetação cada pixel representa uma área de 250 m², enquanto que nas imagens das temperaturas de superfície, cada pixel representa uma área de 1 km². As imagens das temperaturas de

superfície passaram por interpolação bilinear, fazendo com que cada um dos pixels fosse dividido em outros 16. Esse procedimento tornou os conjuntos de imagens equiparáveis e com mesma resolução espacial de 250 m². Todo esse procedimento foi realizado no programa estatístico R, com auxílio da função *resample* presente no pacote *raster*², na sua versão 2.6-7 (Hijmans, 2017).

Após essa operação, um novo recorte da área da RMSP foi produzido nas imagens interpoladas, que também passaram a ter 143.992 pixels.

4.4. Índices nas áreas ocupadas por corpos de água

Devido às características físicas da água, como sua capacidade térmica, podemos verificar que o comportamento de LST Dia e LST Noite em corpos de água é diferente do observado em superfícies secas. Durante o dia, lagos, como as represas Billings e Guarapiranga, estão mais frios que as regiões do entorno, e durante a noite essa situação se inverte. Esses fatores podem impactar no cálculo de médias de áreas selecionadas e na observação de tendências de séries.

Similarmente, para os índices de vegetação, devido às características de reflectância da água perante o sensor MODIS, os valores calculados para corpos de água tendem a ser negativos, mesmo em áreas cercadas de mata. Os índices calculados também são menos estáveis que os obtidos para superfícies secas.

Por tudo isso, fez-se necessário um recorte das áreas ocupadas por corpos de água. O recorte foi realizado usando uma máscara de pixels, que exclui da matriz de pixels de cada imagem aqueles dispostos sobre os corpos de água. Esse recorte possui certa imprecisão uma vez que o desenho da área ocupada por rios e lagos é de alta complexidade e o volume ocupado pela água nessas áreas varia de acordo com as condições climáticas.

² Detalhes sobre o pacote *raster* e suas sub-rotinas estão disponíveis para consulta em: < <https://cran.r-project.org/web/packages/raster/vignettes/Raster.pdf> >. Acesso em: 24 abr. 2018.

5. Análise descritiva das séries temporais

Para a análise descritiva das séries temporais foram escolhidas dez áreas dentre as 545 UITs da RMSP. Essas dez áreas escolhidas representam os variados perfis de demografia e ocupação do solo da RMSP: Jardim Peri, Parque Estadual Fontes do Ipiranga, Capoeirinha / Putim Ponte Alta, Ribeirão das Pombas, Polvilho, Trianon, Sé, Vila Curuçá, Vila Andrade e Alto de Pinheiros. Uma descrição de cada área escolhida pode ser observada na Tabela B.1.

Para cada uma das regiões, foram calculados os valores médios de temperatura e índice de vegetação nos pixels que estão dentro do recorte da área da região. Dessa forma, foram obtidas séries temporais com as temperaturas/índices de vegetação médios de cada uma das dez áreas.

5.1. Séries temporais para as variáveis LST Dia, LST Noite, EVI e NDVI

Para cada uma das dez áreas selecionadas, foram obtidos os gráficos das séries temporais dos valores médios das duas variáveis LST Dia e LST Noite e das duas variáveis EVI e NDVI. Observando os Gráficos A.4 a A.43, vemos, como esperado, que as maiores temperaturas ocorrem nas faixas de dias correspondentes ao verão e as menores temperaturas ocorrem nas faixas de dias correspondentes ao inverno. Os gráficos das variáveis EVI e NDVI também apresentam os maiores valores nos períodos mais quentes do ano e menores valores nos períodos mais frios. Esse comportamento para os índices de vegetação está relacionado ao fato de que nas estações mais quentes há o acúmulo de biomassa vegetal, refletindo diretamente nos valores mais altos observados nestas variáveis.

Para a variável LST Dia observa-se uma pequena tendência crescente para a região de Ribeirão das Pombas (Gráfico A.24) e uma pequena tendência decrescente

para as regiões Sé e Trianon (Gráficos A.28 e A.32). Não se observa tendência para as demais regiões nos gráficos da série de LST Dia.

Para a variável LST Noite não se observa tendência em nenhuma das dez séries avaliadas.

Nos gráficos de séries para a variável EVI observa-se uma leve tendência crescente para as regiões Alto de Pinheiros e Capoeirinha / Putim Ponte Alta (Gráficos A.6 e A.10), e uma pequena tendência decrescente para as regiões de Polvilho e Ribeirão das Pombas (Gráficos A.22 e A.26). Nas outras regiões, não se observa tendência nos gráficos da série de EVI.

Nos gráficos da série de NDVI, pode-se observar uma tendência crescente para a região de Alto de Pinheiros (Gráfico A.7) e uma tendência decrescente para as regiões de Polvilho e Ribeirão das Pombas (Gráficos A.23 e A.27). Não se observa tendência para as demais regiões nos gráficos da série de NDVI.

Em todos os gráficos é possível observar buracos relacionados às observações faltantes. Para esses instantes de tempo, não havia nenhum pixel disponível para o cálculo de uma média. Esses instantes ocorrem principalmente nos períodos mais quentes do ano. Nas regiões Alto de Pinheiros, Sé e Trianon, mais próximas do centro da RMSP, o problema é mais acentuado.

Em alguns dos gráficos de séries apresentados nota-se a presença de alguns *outliers* (pontos aberrantes ou destoantes), que podem representar dias com temperatura de superfície atípica, a maior produção de clorofila e outros pigmentos responsáveis pela absorção da radiação solar na banda do vermelho, bem como a presença de nuvens nas áreas de interesse, prejudicando o cálculo de uma média que represente adequadamente a característica da área. Devido à escala do estudo e ao fato de que o grande número de observações consideradas no estudo reduz a influência desses pontos atípicos, optou-se pela não remoção desses *outliers*.

6. Avaliação da inclinação com significância prática

Para estudar as alterações ocorridas na temperatura e na vegetação ao longo do tempo foi realizado o ajuste de retas de regressão com o objetivo de capturar a tendência das séries temporais em estudo, permitindo, assim, avaliar a significância prática da inclinação obtida. Para isso, foram definidos valores considerados altos o suficiente para que as alterações observadas na temperatura e na vegetação ao longo do tempo possuam significância prática. Esses valores foram fornecidos pela pesquisadora, sendo consideradas significativas as temperaturas com mudança de 1°C e índices de vegetação com diferença de 0,05 unidades no período que corresponde aos anos de 2003 a 2017. Essa análise é realizada para cada um dos 143.992 pixels da área considerada e também para as 545 UITs.

Considerando Y a variável resposta em estudo (LST Dia, LST Noite, EVI ou NDVI), a série Y pode ser decomposta em três componentes: tendência (T), sazonalidade (S) e ruído (e), obtendo a seguinte forma:

$$Y_t = T_t + S_t + e_t ,$$

com $t = 1, 2, \dots, n$; sendo $n = 690$ para as variáveis de temperatura e $n = 345$ para os índices de vegetação (Morettin e Toloi, 2006).

Com o objetivo de avaliar apenas a variação da temperatura e da vegetação ao longo das n observações obtidas neste trabalho, considera-se a tendência como sendo linear, ou seja,

$$T_t = \alpha + \beta t .$$

Assim, a série Y_t pode ser modelada da seguinte forma:

$$\begin{aligned} Y_t &= T_t + S_t + e_t \\ &= \alpha + \beta t + \varepsilon_t , \end{aligned}$$

em que $\varepsilon_t = S_t + e_t$ é o erro do modelo.

Assumindo erros independentes e homocedásticos, estimamos as retas Y_t com a função:

$$\hat{Y}_t = \hat{\alpha} + \hat{\beta}t ,$$

em que,

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \quad \text{e} \quad \hat{\alpha} = \bar{Y} - \hat{\beta}\bar{t} ,$$

sendo $\bar{Y}$ a média de Y e $\bar{t}$ a média de t , $t = 1, 2, \dots, n$.

O erro padrão estimado de $\hat{\beta}$ é dado por

$$s_{\hat{\beta}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}} .$$

Usando esse resultado, construiu-se o intervalo de 95% de confiança para a avaliação da significância prática da inclinação β :

$$[\hat{\beta} - t_c * s_{\hat{\beta}} \quad ; \quad \hat{\beta} + t_c * s_{\hat{\beta}}]$$

em que $P(-t_c < t < t_c) = 0,95$, $t \sim t_{n-2}$ (Elian, 1988).

Uma vez obtido o intervalo de confiança para β , multiplicamos seus limites inferior e superior por n , $n = 690$ para temperatura e $n = 345$ para vegetação, e obtemos assim um intervalo de confiança para a variação ocorrida no período de 2003 a 2017. Se esse intervalo está inteiramente contido no conjunto dos reais $(-\infty, -1] \cup [1, \infty)$ para temperatura ou $(-\infty, -0,05] \cup [0,05, \infty)$ para vegetação, concluímos que a inclinação possui significância prática. Ou seja, se

$(\hat{\beta} - t_c * s_{\hat{\beta}}) * 690 > 1$ para temperatura, houve aumento significativo da temperatura entre 2003 e 2017. Se $(\hat{\beta} - t_c * s_{\hat{\beta}}) * 690 < -1$, houve redução significativa da temperatura entre 2003 e 2017, considerando o valor de 1°C fixado como critério de significância prática e confiança γ . Se $(\hat{\beta} - t_c * s_{\hat{\beta}}) * 345 > 0,05$, houve aumento significativo do índice de vegetação entre 2003 e 2017. Se $(\hat{\beta} - t_c * s_{\hat{\beta}}) * 345 < -0,05$, houve redução significativa do índice de vegetação entre 2003 e 2017.

Como exemplo, tomamos o pixel “178627”, para o qual a análise descrita nos parágrafos acima foi realizada. Um perfil da perda progressiva da vegetação desse pixel pode ser visto na Figura C.7. As séries temporais para as variáveis de temperatura são apresentadas no Gráfico A.44. No Gráfico A.45 observamos a queda nos índices de vegetação, que é mais marcante no final de 2008 e na metade de 2015. As retas ajustadas para as variáveis LST Dia e EVI são apresentadas nos Gráficos A.46 e A.47, respectivamente. A inclinação para a variável LST Dia, considerando o espaço entre os anos de 2003 e 2017, foi de 0,00311, com intervalo de 95% de confiança dado por (0,00158 ; 0,00464). Multiplicando o intervalo por 690, temos o intervalo (1,087 ; 3,201), que indica a significância prática do aumento da temperatura de superfície durante o dia, já que o intervalo de confiança está inteiramente contido no conjunto dos valores de temperatura que apresentam significância prática. Para o índice EVI, a inclinação resultou em -0,000546, com intervalo de confiança dado por (-0,000649; -0,000441). Multiplicando esse intervalo por 345, temos o intervalo (-0,224 ; -0,152). Também nesse caso, vemos que o intervalo de confiança está inteiramente contido no conjunto que apresenta significância prática para índice de vegetação. Portanto, houve perda de vegetação entre os anos de 2003 e 2017.

Nas Figuras C.8 a C.15, são apresentados os mapas indicando os pixels em que ocorreram alteração significativa de acordo com os critérios apresentados.

Na Figura C.8 estão apresentados os pixels do mapa da RMSP para a variável LST Dia que apresentam aumento da temperatura com significância prática. Vê-se que áreas do município de Cajamar, áreas da zona leste de São Paulo e porções de alguns municípios do extremo leste, como Itaquaquecetuba e Mogi das Cruzes, apresentam

aumento da temperatura. Na Figura C.9 estão representadas as inclinações obtidas nesses pixels.

Na Figura C.10 vemos os pixels do mapa para a variável LST Noite que apresentam aumento da temperatura com significância prática. Na Figura C.11 vemos as inclinações obtidas nesses pixels.

Nas Figuras C.12 e C.14 são apresentados os pixels do mapa para as variáveis EVI e NDVI, respectivamente. Nessas figuras é possível observar os pixels para os quais houve ganho ou perda da vegetação. É interessante observar a perda de vegetação sofrida no entorno do município de São Paulo, com a degradação do Cinturão Verde (Figura C.2). Nas Figuras C.13 e C.15 podem ser vistas as inclinações obtidas nos pixels com alteração de vegetação.

Para as análises nas UITs definidas pela EMPLASA, foi dado enfoque nas dez unidades escolhidas. Nas Tabelas B.2 e B.5 temos os intervalos de 95% de confiança para cada uma das quatro variáveis nessas dez áreas. Considerados os valores de 1°C e 0,05 unidades de vegetação para alterações significativas no período entre 2003 e 2017 avaliados, detectamos alteração no NDVI para as regiões de Polvilho e Ribeirão das Pombas.

Nas Figuras C.16 a C.19 são apresentados os mapas com a avaliação da significância prática das variações de temperatura e vegetação para as 545 UITs durante 2003 a 2017. Os intervalos de confiança das áreas que apresentaram alteração são apresentados nas tabelas adjacentes. Nas Figuras C.17 e C.18, observa-se que, para todas as 545 UITs, não houve alteração significativa para LST Noite e EVI.

Nas Figuras C.20 a C.23 temos os mapas cruzando as conclusões sobre a significância prática das inclinações de LST Dia e LST Noite com as de NDVI e EVI. Assim, podemos avaliar em quais pixels houve aumento de temperatura e queda de vegetação.

Para identificar o ano no qual ocorreu a primeira alteração com significância prática foram ajustadas as inclinações correspondentes às retas de regressão linear para diferentes intervalos de anos, sempre considerando o ano de 2003 como ano de

partida. Esses ajustes foram realizados para cada uma das quatro variáveis, tanto para cada pixel do mapa, quanto por regiões. O objetivo era identificar em qual ano ocorreu a primeira alteração com significância prática na variável sendo estudada. Dessa maneira, foram obtidas as inclinações considerando as observações da variável para o período entre 2003 e 2008; inclinação considerando o período entre 2003 e 2009 e assim sucessivamente até que a inclinação para as observações entre 2003 e 2017 fosse obtida.

Nas Figuras C.24 a C.29 são apresentados os mapas com os resultados obtidos para a análise descrita no parágrafo anterior para cada pixel analisado. Nas Figuras C.30 a C.32 vemos o resultado dessa análise para as 545 UITs.

7. Conclusões

Para todas as dez séries obtidas das áreas selecionadas, foi possível observar a presença de componente sazonal nas quatro variáveis de interesse. As temperaturas mais altas ocorrem no verão, assim como são mais altos os índices de vegetação nesse período. A situação se inverte no inverno, quando as temperaturas são mais amenas e os índices de vegetação apresentam menores valores.

Um comportamento de destaque foi observado na região de Ribeirão das Pombas, no município de Jandira, onde notou-se a queda nos dois índices de vegetação avaliados, indicando a perda de vegetação nesse local. Também se verificou o aumento da temperatura de superfície durante o dia. Na região de Polvilho, no município de Cajamar, as conclusões são as mesmas.

A variável LST Noite não apresentou tendência em nenhuma das séries avaliadas.

Nos mapas com os cruzamentos entre a temperatura de superfície e os índices de vegetação é possível notar a aparente relação existente entre as áreas onde houve aumento da temperatura e perda de vegetação e as áreas onde houve aumento da temperatura, sem alterações na vegetação, que aparecem sempre juntas.

Nota-se, nos mapas dos índices de vegetação, a crescente perda de áreas verdes nos entornos de São Paulo, refletindo a movimentação urbana para suas bordas.

Nos mapas com os anos de perda da vegetação notamos o traçado de um anel circundando a RMSP. Esse é o trajeto do Rodoanel e mostra o impacto negativo que a construção desse complexo viário trouxe na vegetação.

Por fim, a análise da RMSP estratificada por pixels ou por regiões permitiu concluir que o aumento da temperatura de superfície acontece sobretudo em áreas da porção leste de São Paulo e em alguns municípios a leste de São Paulo, como Itaquaquecetuba e Mogi das Cruzes. Essa elevação da temperatura também pode ser observada com clareza nos municípios de Cajamar e Jandira, a oeste de São Paulo. Nessas áreas, concomitantemente, houve perda de cobertura vegetal.

APÊNDICE A: GRÁFICOS

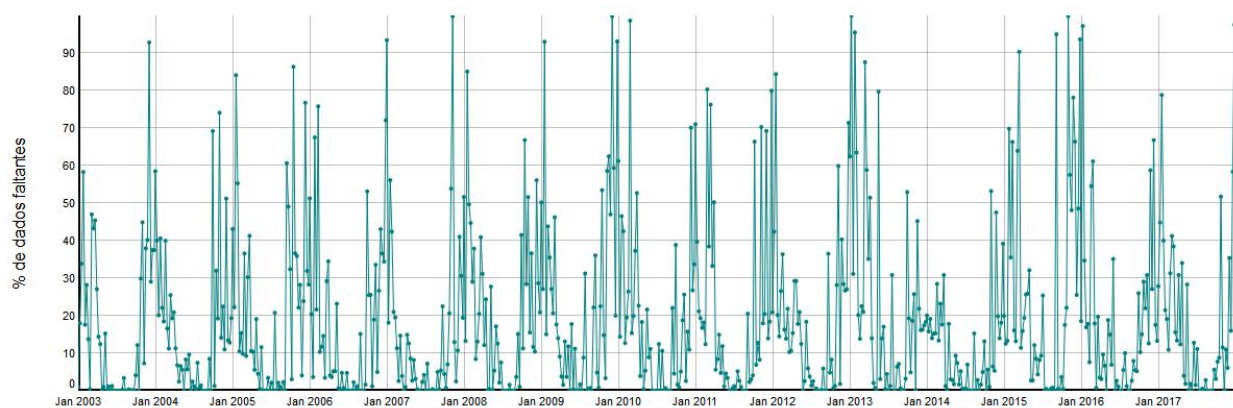


Gráfico A.1: Porcentagem de dados faltantes observados na variável LST Dia no período de 01 jan. 2003 a 31 dez. 2017.

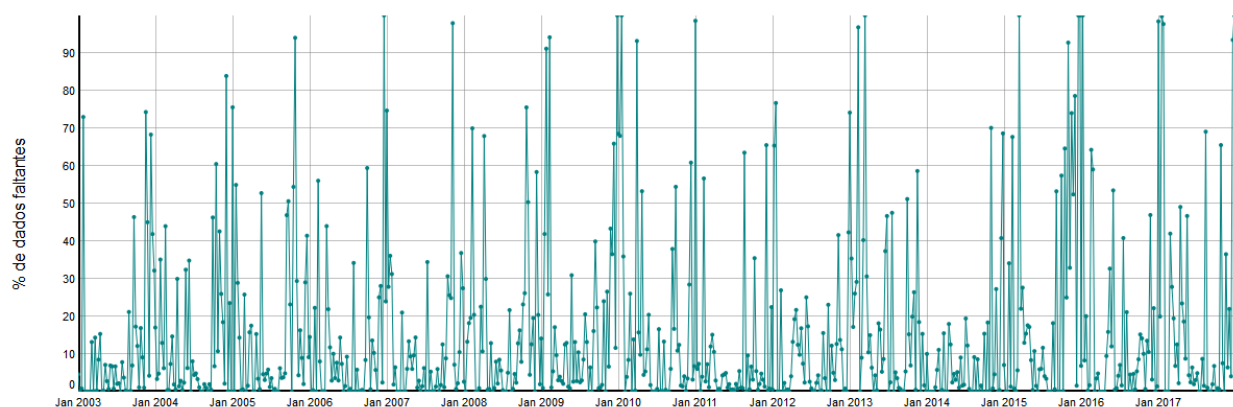


Gráfico A.2: Porcentagem de dados faltantes observados na variável LST Noite no período de 01 jan. 2003 a 31 dez. 2017.

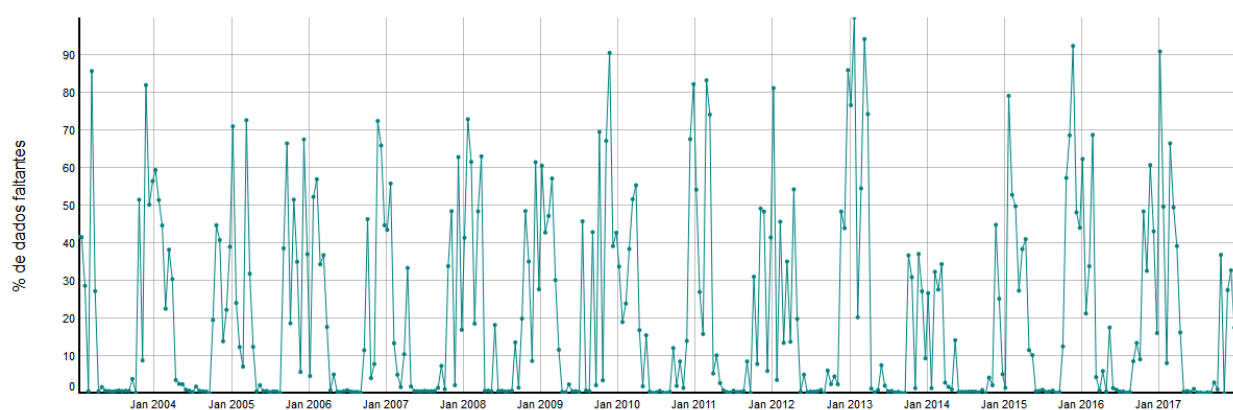


Gráfico A.3: Porcentagem de dados faltantes observados nas variáveis NDVI e EVI no período de 01 jan. 2003 a 31 dez. 2017.

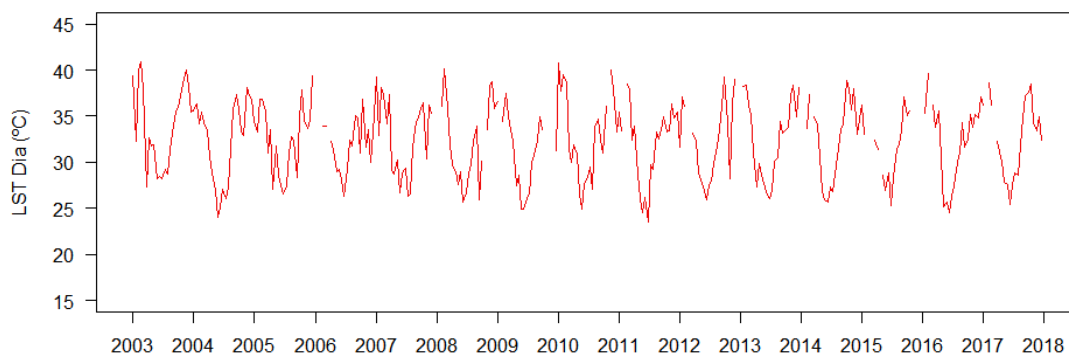


Gráfico A.4: Série temporal para a variável LST Dia - Alto de Pinheiros.

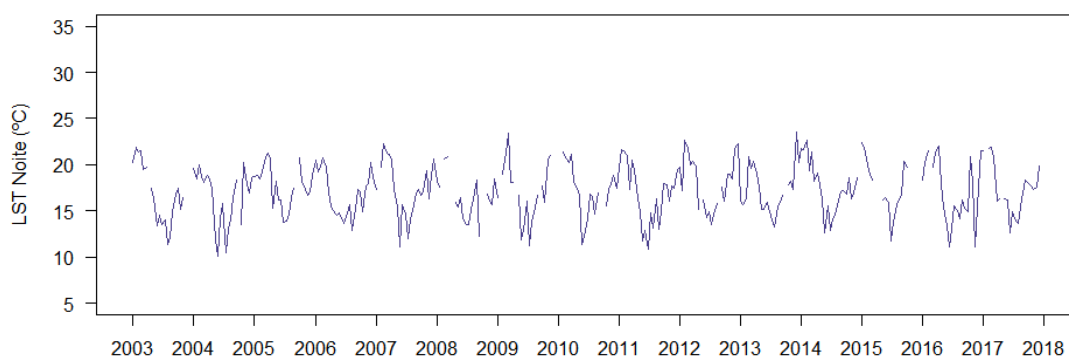


Gráfico A.5: Série temporal para a variável LST Noite - Alto de Pinheiros.

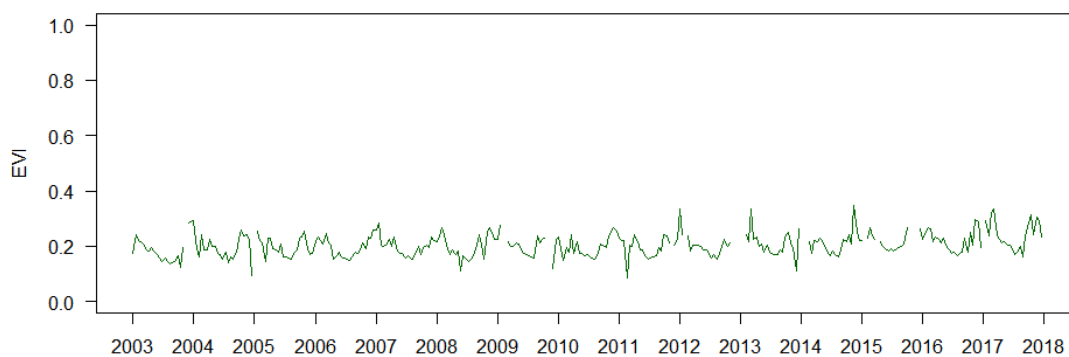


Gráfico A.6: Série temporal para a variável EVI - Alto de Pinheiros.

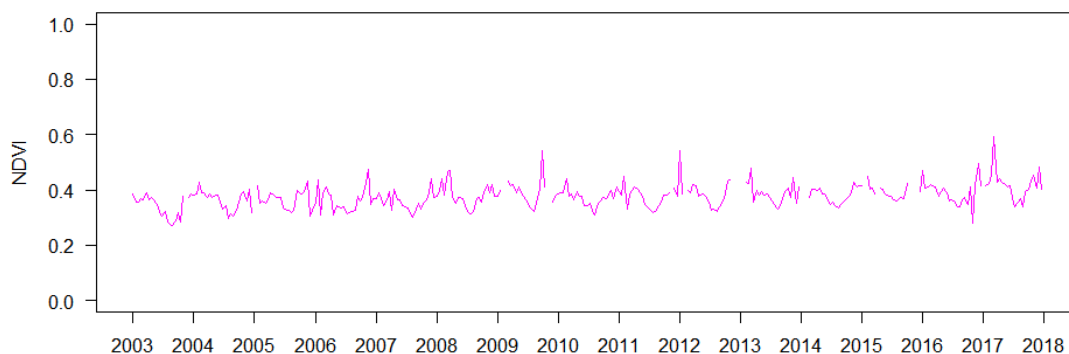


Gráfico A.7: Série temporal para a variável NDVI - Alto de Pinheiros.

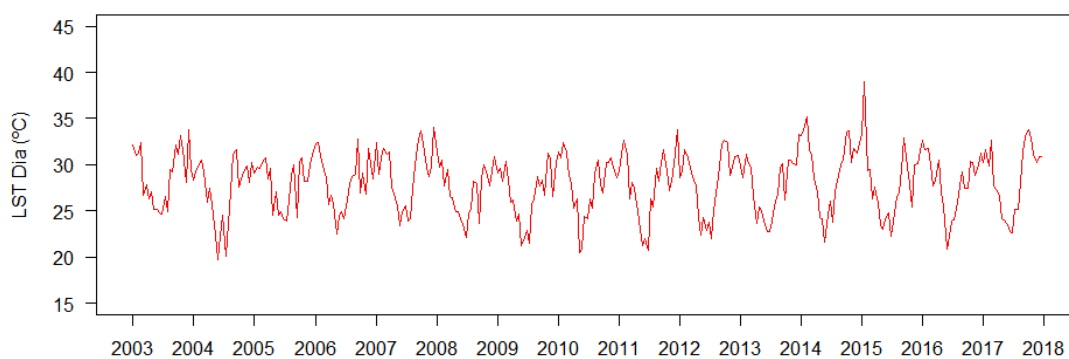


Gráfico A.8: Série temporal para a variável LST Dia - Capoeirinha / Putim Ponte Alta.

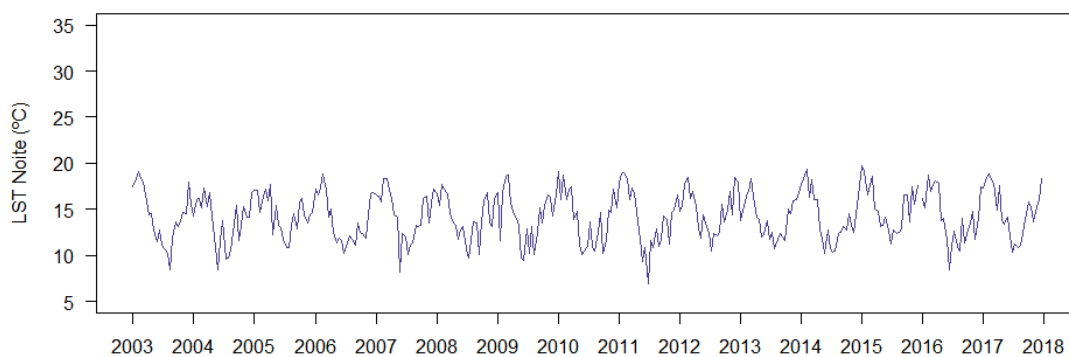


Gráfico A.9: Série temporal para a variável LST Noite - Capoeirinha / Putim Ponte Alta.

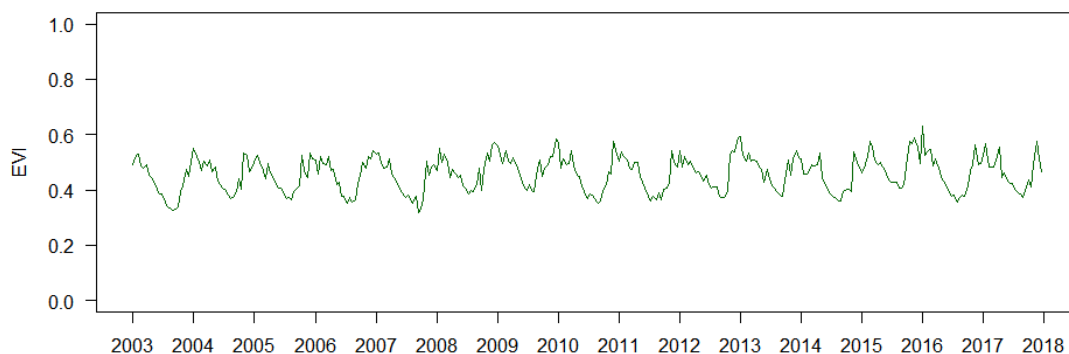


Gráfico A.10: Série temporal para a variável EVI - Capoeirinha / Putim Ponte Alta.

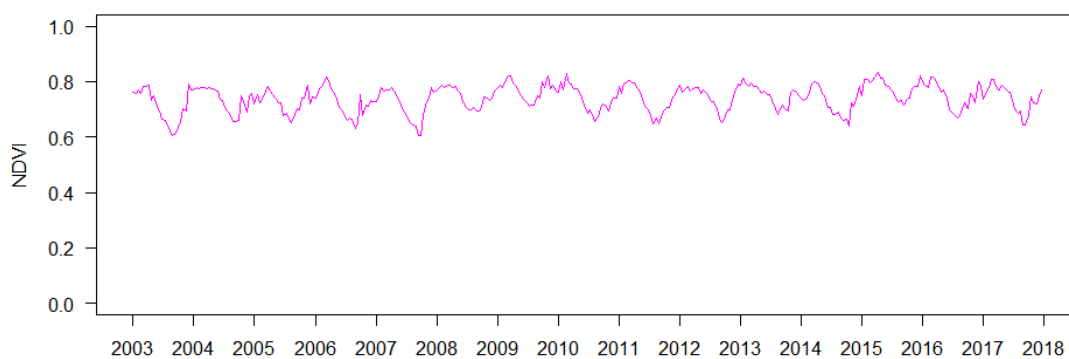


Gráfico A.11: Série temporal para a variável NDVI - Capoeirinha / Putim Ponte Alta.

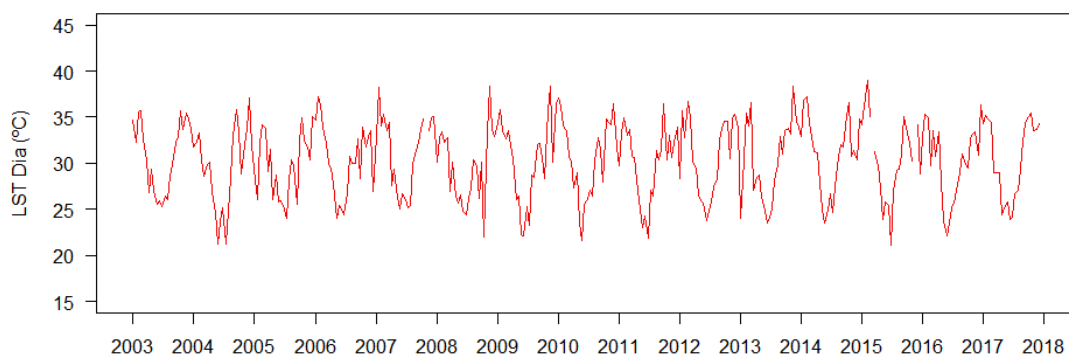


Gráfico A.12: Série temporal para a variável LST Dia - Jardim Peri.

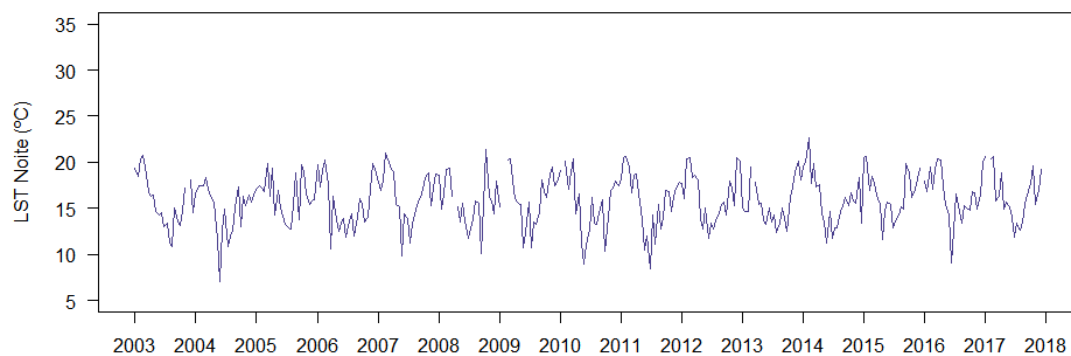


Gráfico A.13: Série temporal para a variável LST Noite - Jardim Peri.

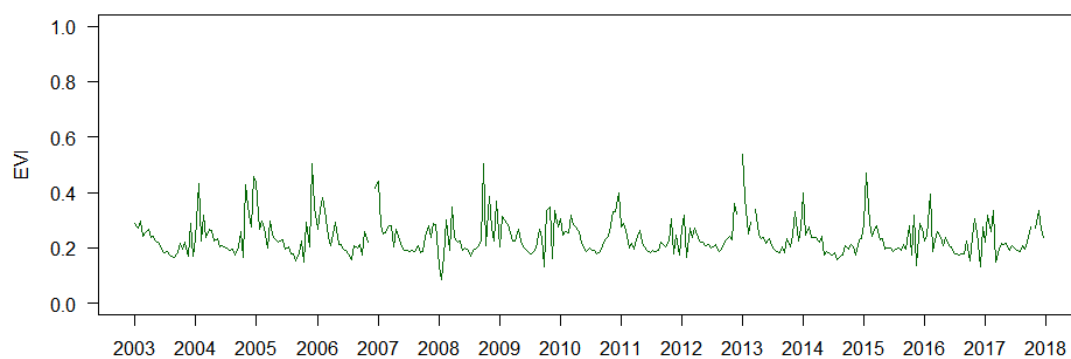


Gráfico A.14: Série temporal para a variável EVI - Jardim Peri.



Gráfico A.15: Série temporal para a variável NDVI - Jardim Peri.

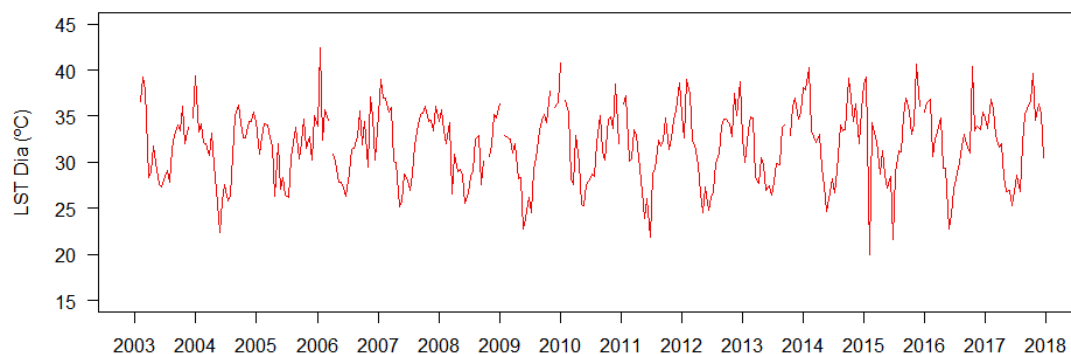


Gráfico A.16: Série temporal para a variável LST Dia - Parque Estadual Fontes do Ipiranga.

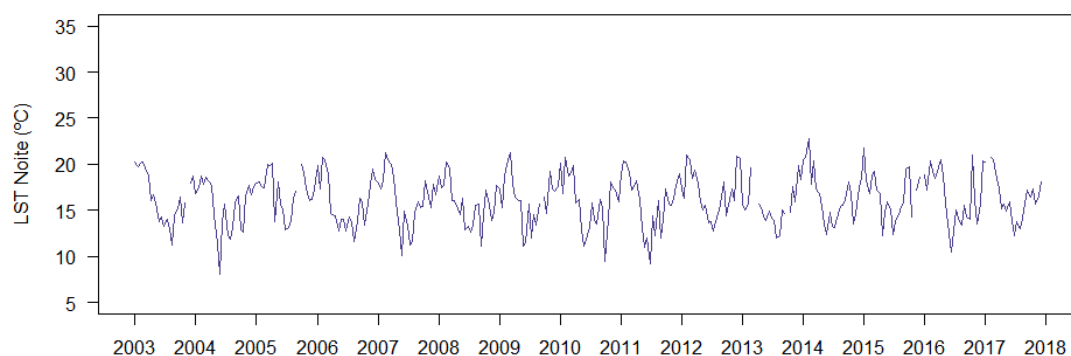


Gráfico A.17: Série temporal para a variável LST Noite - Parque Estadual Fontes do Ipiranga.

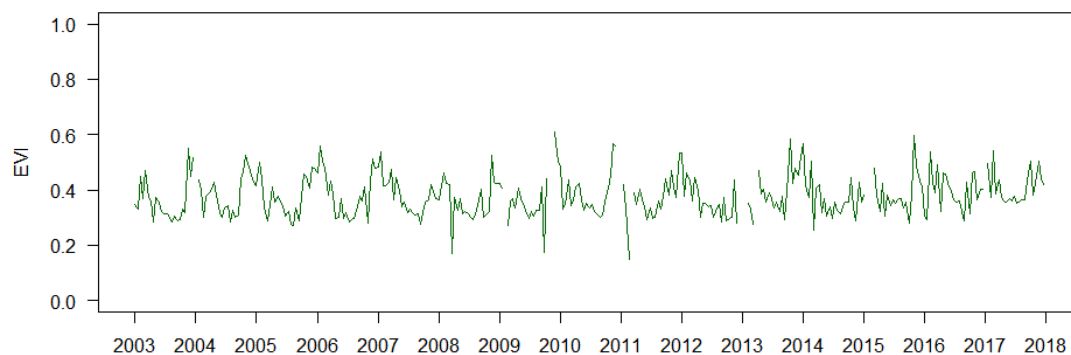


Gráfico A.18: Série temporal para a variável EVI - Parque Estadual Fontes do Ipiranga.



Gráfico A.19: Série temporal para a variável NDVI - Parque Estadual Fontes do Ipiranga.

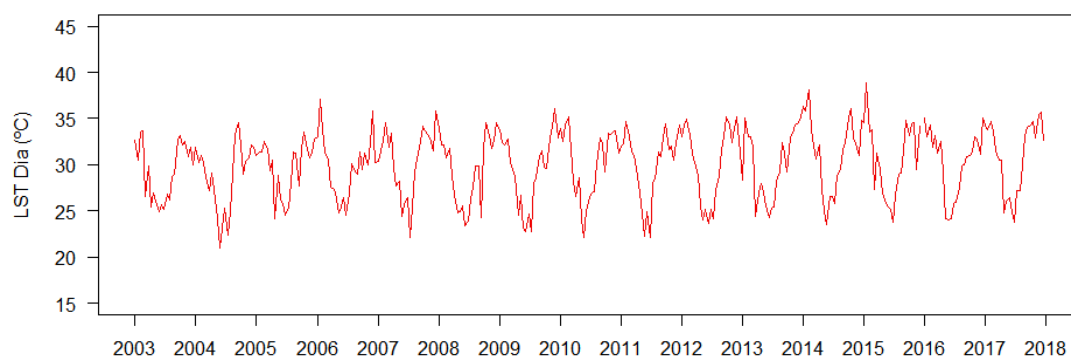


Gráfico A.20: Série temporal para a variável LST Dia - Polvilho.

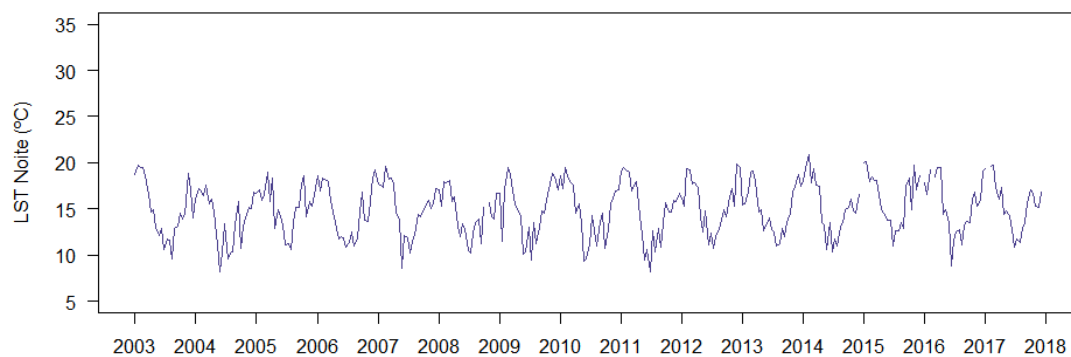


Gráfico A.21: Série temporal para a variável LST Noite - Polvilho.

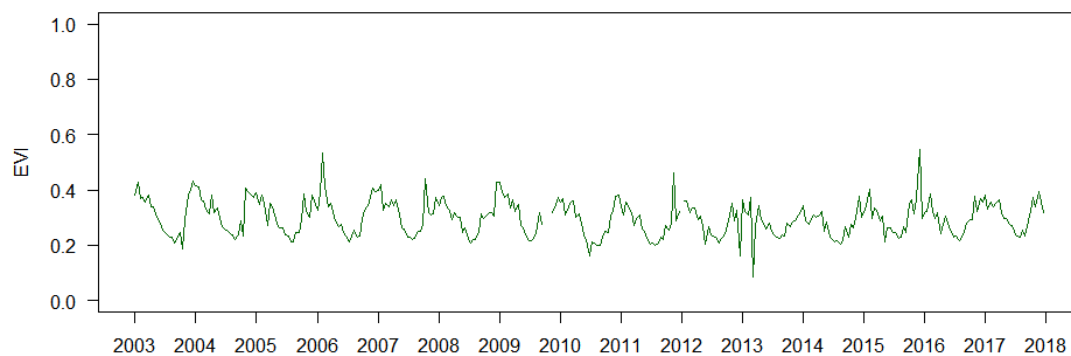


Gráfico A.22: Série temporal para a variável EVI - Polvilho.

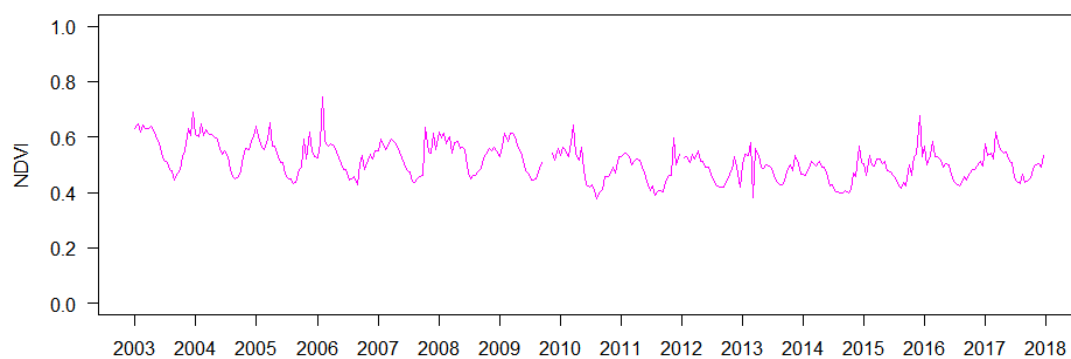


Gráfico A.23: Série temporal para a variável NDVI - Polvilho.

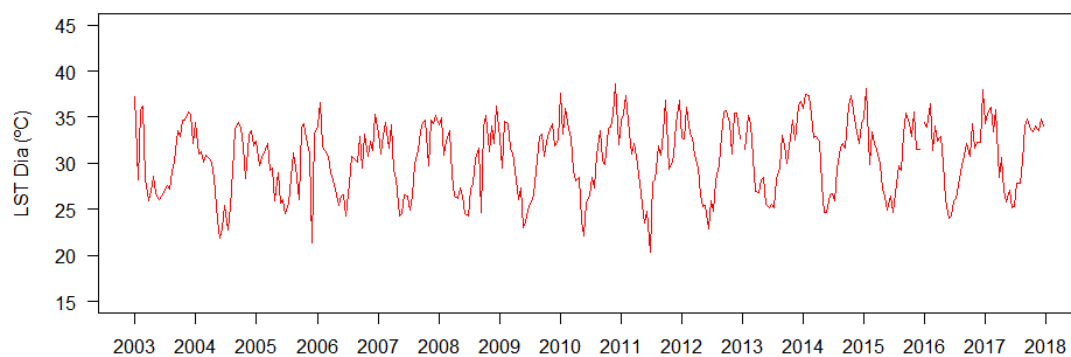


Gráfico A.24: Série temporal para a variável LST Dia - Ribeirão das Pombas.

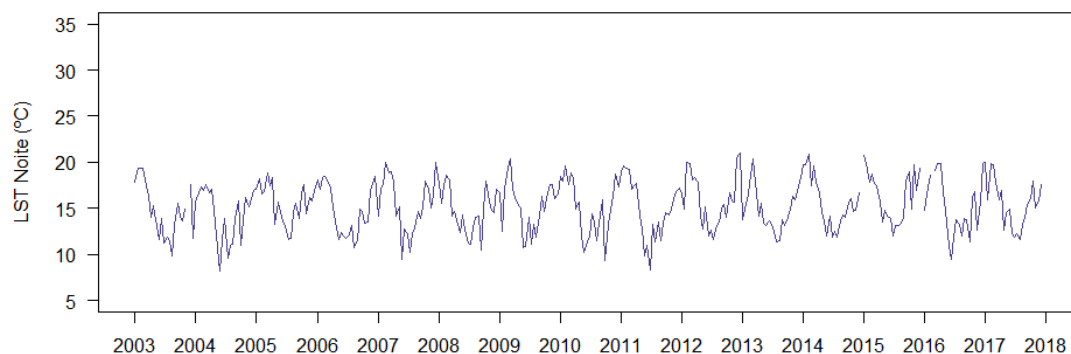


Gráfico A.25: Série temporal para a variável LST Noite - Ribeirão das Pombas.

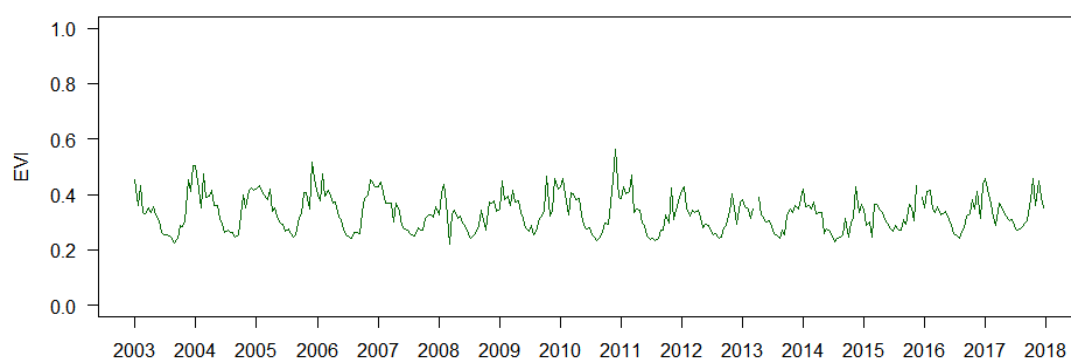


Gráfico A.26: Série temporal para a variável EVI - Ribeirão das Pombas.

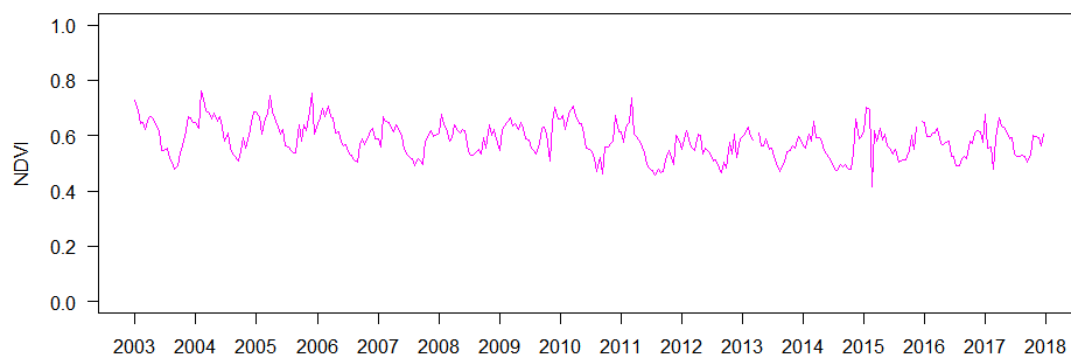


Gráfico A.27: Série temporal para a variável NDVI - Ribeirão das Pombas.

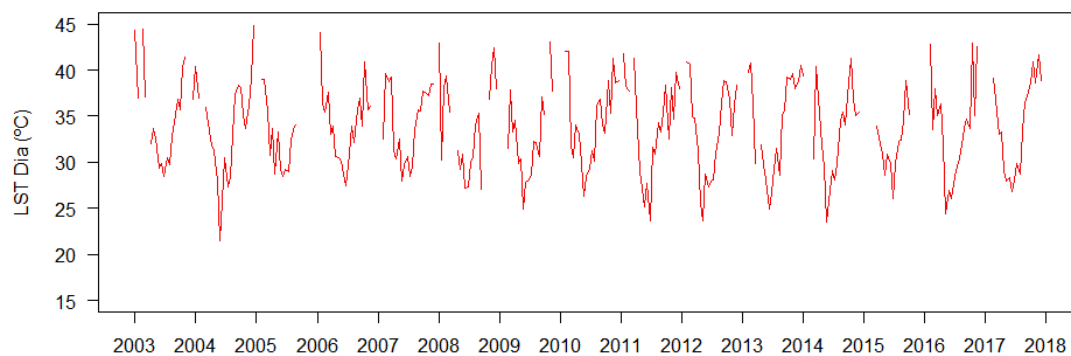


Gráfico A.28: Série temporal para a variável LST Dia - Sé.

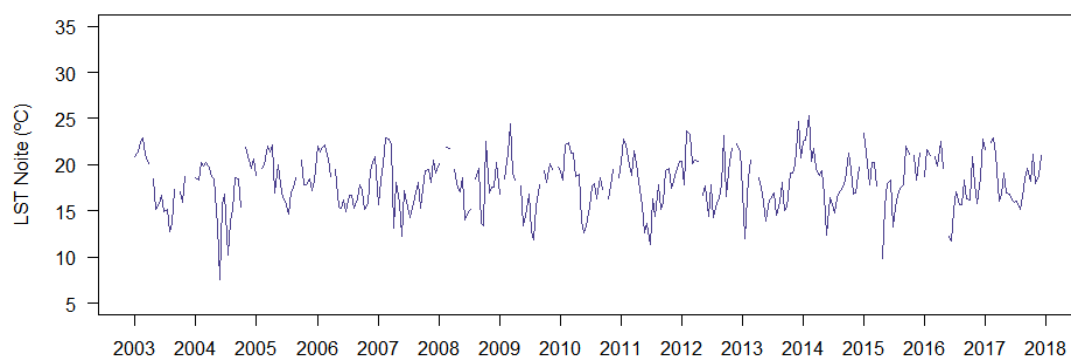


Gráfico A.29: Série temporal para a variável LST Noite - Sé.

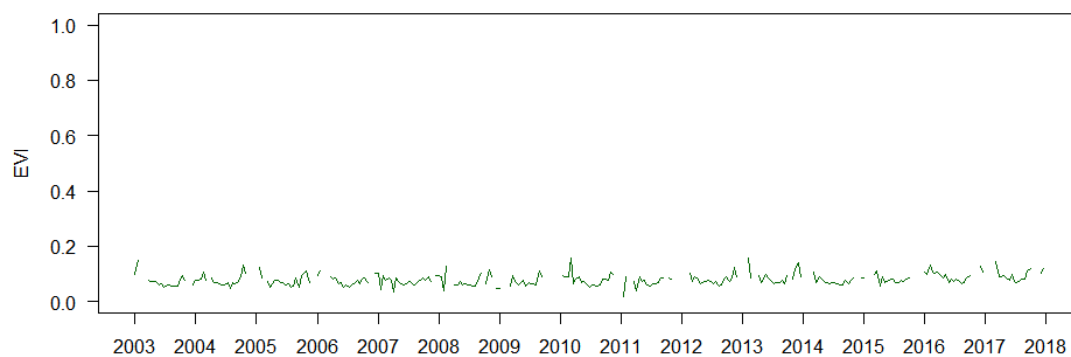


Gráfico A.30: Série temporal para a variável EVI - Sé.

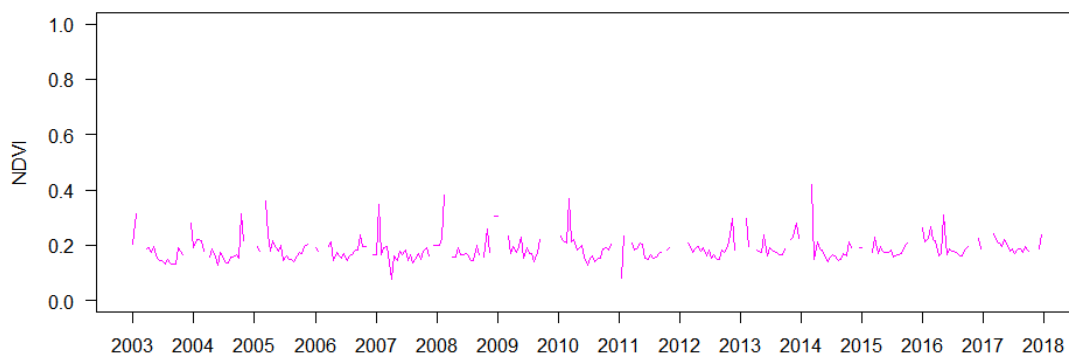


Gráfico A.31: Série temporal para a variável NDVI – Sé.

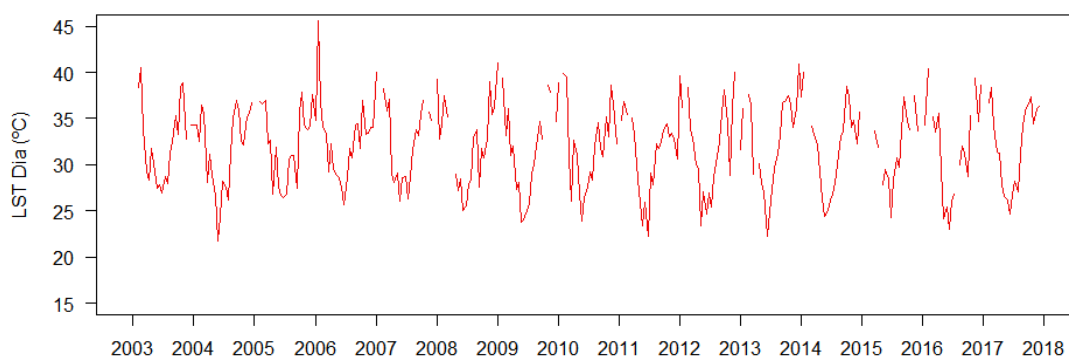


Gráfico A.32: Série temporal para a variável LST Dia - Trianon.

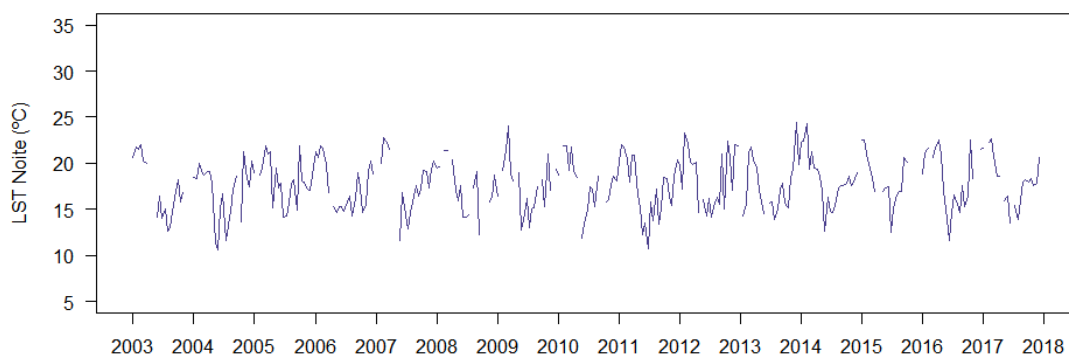


Gráfico A.33: Série temporal para a variável LST Noite - Trianon.

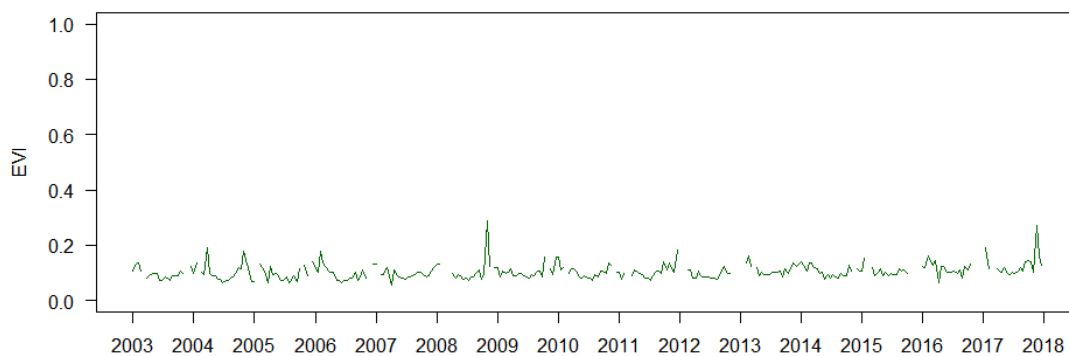


Gráfico A.34: Série temporal para a variável EVI - Trianon.

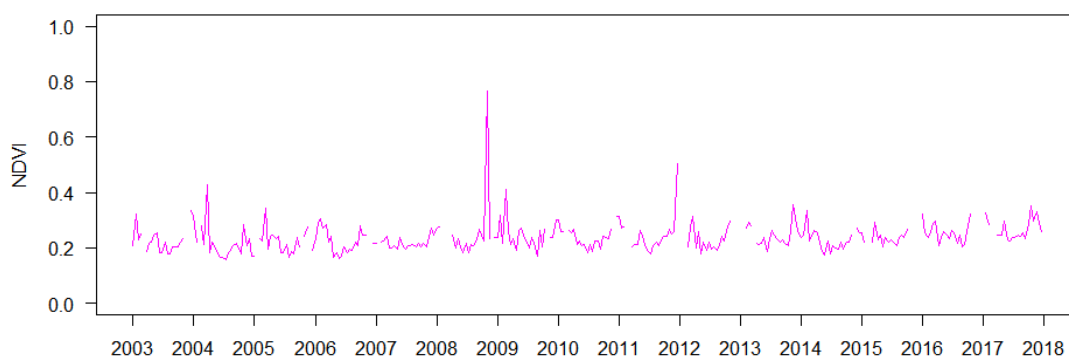


Gráfico A.35: Série temporal para a variável NDVI - Trianon.

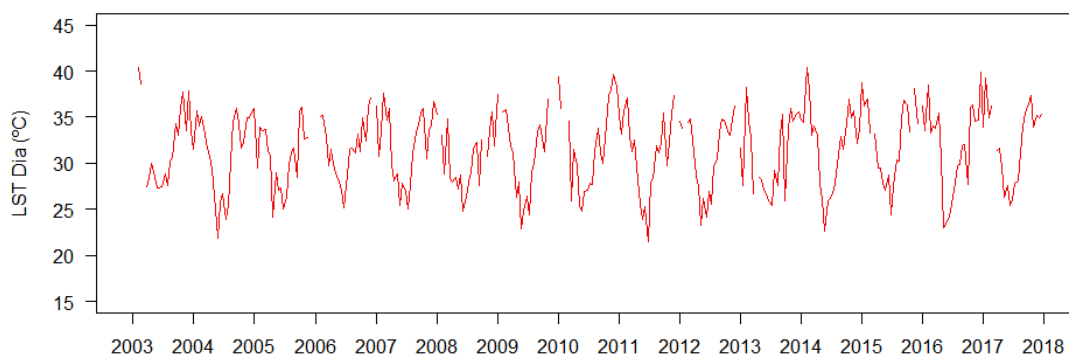


Gráfico A.36: Série temporal para a variável LST Dia - Vila Andrade.

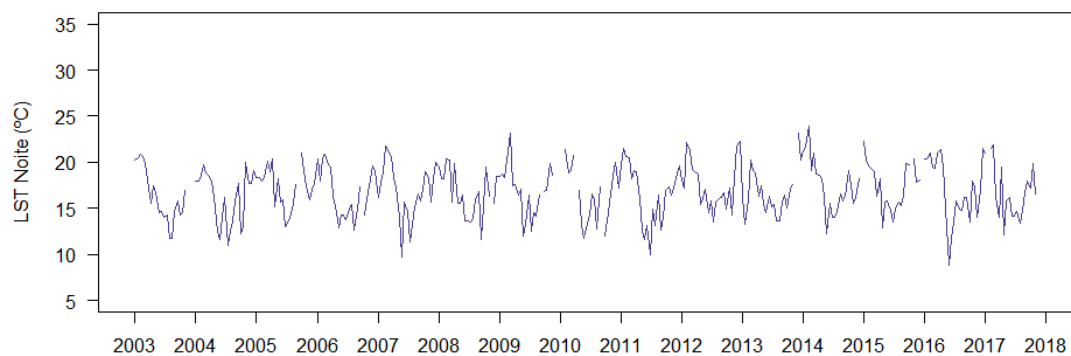


Gráfico A.37: Série temporal para a variável LST Noite - Vila Andrade.

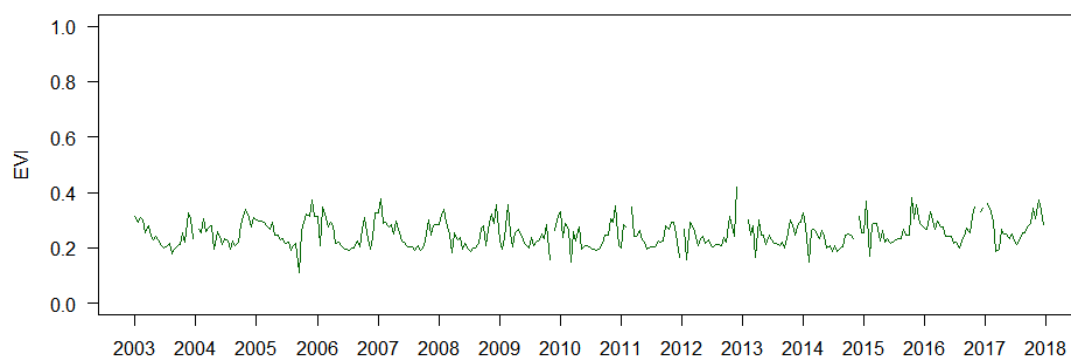


Gráfico A.38: Série temporal para a variável EVI - Vila Andrade.



Gráfico A.39: Série temporal para a variável NDVI - Vila Andrade.

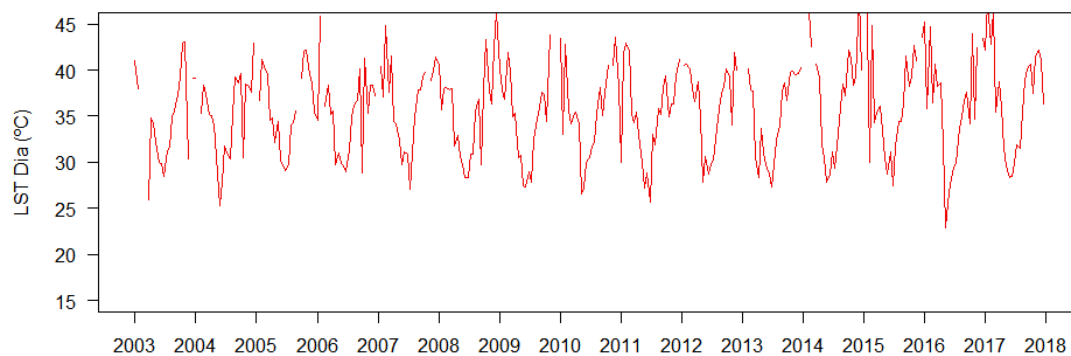


Gráfico A.40: Série temporal para a variável LST Dia - Vila Curuçá.

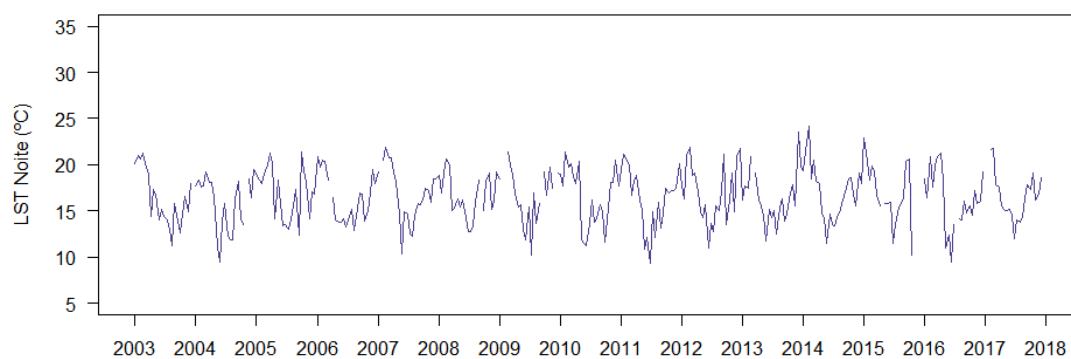


Gráfico A.41: Série temporal para a variável LST Noite - Vila Curuçá.

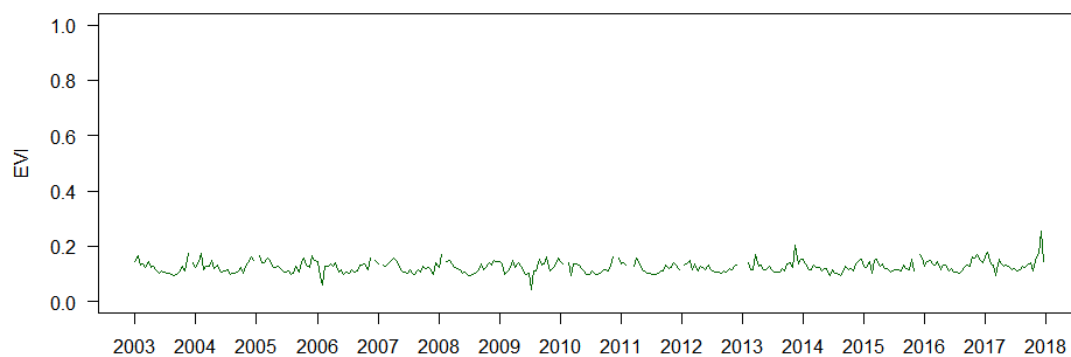


Gráfico A.42: Série temporal para a variável EVI - Vila Curuçá.

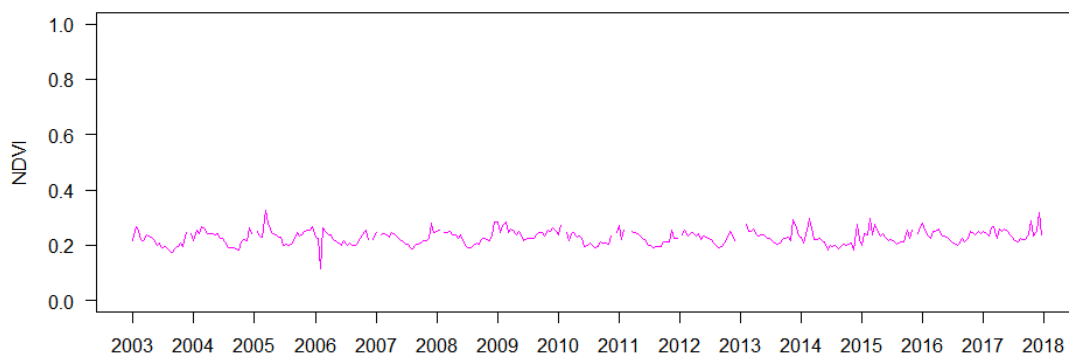


Gráfico A.43: Série temporal para a variável NDVI - Vila Curuçá.

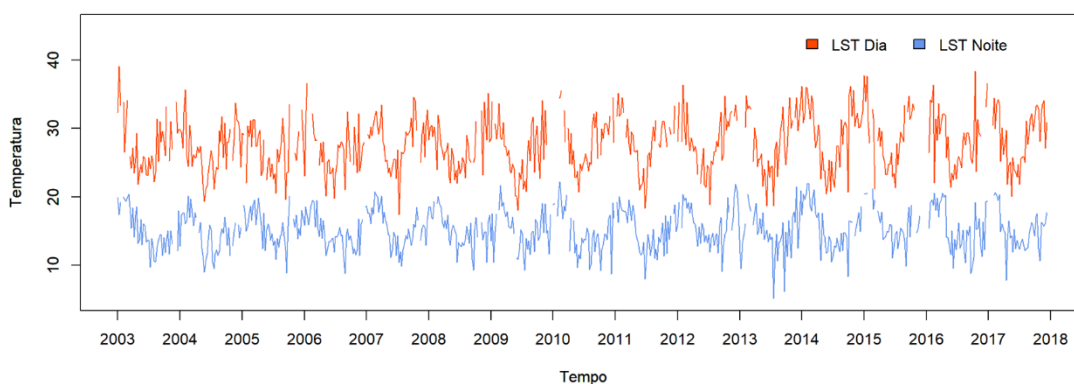


Gráfico A.44: Séries temporais para as variáveis LST Dia e LST Noite para o pixel "178627".

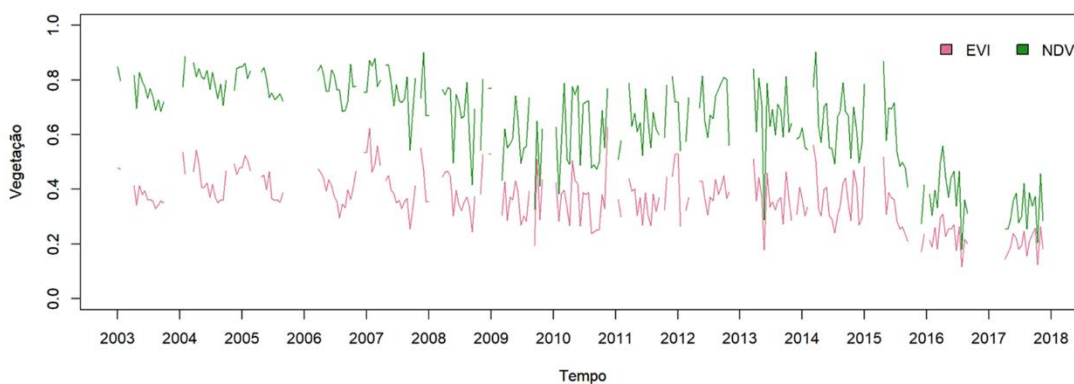


Gráfico A.45: Séries temporais para as variáveis EVI e NDVI para o pixel "178627".

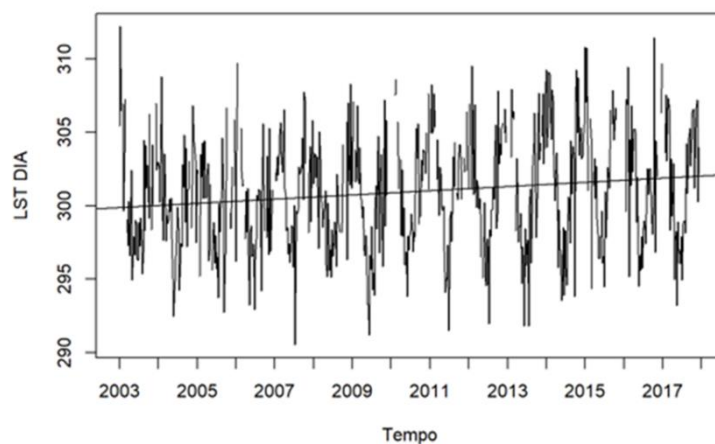


Gráfico A.46: Série temporal para a variável LST Dia e ajuste da inclinação para o pixel "178627".

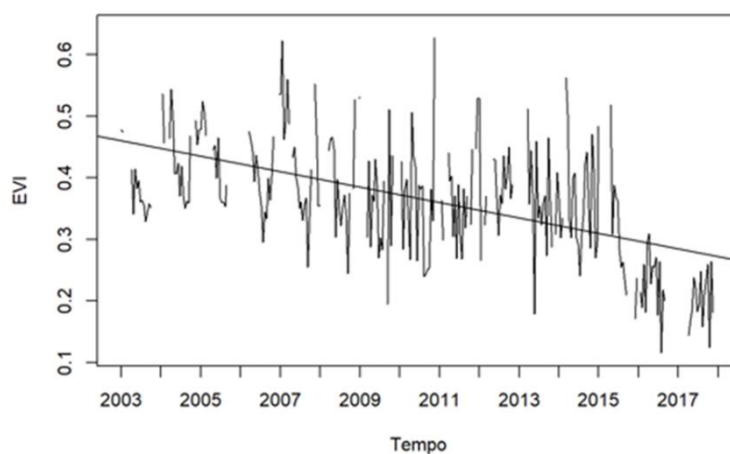


Gráfico A.47: Série temporal para a variável EVI e ajuste da inclinação para o pixel "178627".

APÊNDICE B: TABELAS

Tabela B.1: Descrição das áreas escolhidas pela pesquisadora.

	Região	Município	Área (m²)	Padrão Social	Descrição
1	Jardim Peri	São Paulo	4.445.682,30	Área com Predominância de Favelas ou Habitações Precárias.	Padrão socioespacial caracterizado pela presença significativa de áreas ocupadas por assentamento habitacional precário com carência ou ausência de infraestrutura urbana.
2	Parque Estadual Fontes do Ipiranga	São Paulo	4.464.662,40	Área de Interesse Ambiental.	Áreas protegidas legalmente, cuja função é a de contribuir para a preservação dos recursos naturais, incluindo mananciais hídricos, cobertura vegetal, fauna, relevo, solo e subsolo.
3	Capoeirinha / Putim Ponte Alta	Guararema	182.659.145,60	Área de Uso Predominantemente Rural.	Áreas predominantemente ocupadas por atividades de exploração econômica efetiva, relacionadas ao Setor Primário da economia, abrangendo desde o cultivo para subsistência até a produção em escala comercial.
4	Ribeirão das Pombas	Jandira	7.538.509,20	Área Predominantemente Residencial de Média/Alta e Alta Rendas.	Áreas residenciais horizontais (casas e sobrados) ou verticais (apartamentos), bem consolidadas e de excelente padrão construtivo e dotadas de completa infraestrutura urbana.
5	Polvilho	Cajamar	12.071.135,60	Área Predominantemente Residencial de Média Renda.	Correspondem a áreas residenciais horizontais (casas e sobrados) ou verticais (apartamentos), contíguas ou não, a áreas de urbanização mais centrais e antigas da cidade, associadas a segmentos de média renda.
6	Trianon	São Paulo	1.591.710,10	Centralidade ou Subcentro.	Áreas que se distinguem pela presença significativa de equipamentos de infraestrutura urbana, equipamentos públicos e pela concentração de atividades e estabelecimentos comerciais e de serviços.
7	Sé	São Paulo	569.924,80	Centralidade ou Subcentro.	Áreas que se distinguem pela presença significativa de equipamentos de infraestrutura urbana, equipamentos públicos e pela concentração de atividades e estabelecimentos comerciais e de serviços.
8	Vila Curuçá	São Paulo	5.028.552,40	Área Predominantemente Residencial de Baixa e Média/Baixa Rendas.	Áreas de ocupação residencial com predominância de padrões construtivos de baixa renda, do tipo autoconstrução, mutirão, programas habitacionais e conjuntos habitacionais.
9	Vila Andrade	São Paulo	6.301.968,80	Área Predominantemente Residencial de Média/Alta e Alta Rendas.	Áreas residenciais horizontais (casas e sobrados) ou verticais (apartamentos), bem consolidadas e de excelente padrão construtivo e dotadas de completa infraestrutura urbana.
10	Alto de Pinheiros	São Paulo	2.534.611,20	Área Predominantemente Residencial de Média/Alta e Alta Rendas.	Áreas residenciais horizontais (casas e sobrados) ou verticais (apartamentos), bem consolidadas e de excelente padrão construtivo e dotadas de completa infraestrutura urbana.

Tabela B.2: Estimativas das inclinações e intervalos de confiança obtidos nos ajustes das inclinações (correspondentes às retas de regressão linear simples) para a variável LST Dia, nas dez regiões estudadas, no período de 01 jan. 2003 a 31 dez. 2017.

Região	Inclinação	Intervalo de confiança para a inclinação (95%)	Intervalo de confiança multiplicado por n = 690
Jardim Peri	0,0011	(-0,0006 ; 0,0029)	(-0,43 ; 1,98)
Parque Estadual Fontes do Ipiranga	0,0011	(-0,0006 ; 0,0028)	(-0,44 ; 1,90)
Capoeirinha / Putim Ponte Alta (Guararema)	0,0005	(-0,0008 ; 0,0018)	(-0,57 ; 1,25)
Ribeirão das Pombas (Jandira)	0,0026	(0,0010 ; 0,0042)	(0,69 ; 2,91)
Polvilho (Cajamar)	0,0029	(0,0014 ; 0,0043)	(0,95 ; 3,00)
Trianon	-0,0003	(-0,0023 ; 0,0017)	(-1,58 ; 1,19)
Sé	-0,0003	(-0,0025 ; 0,0019)	(-1,70 ; 1,34)
Vila Curuçá	0,0015	(-0,0007 ; 0,0037)	(-0,48 ; 2,54)
Vila Andrade	0,0004	(-0,0014 ; 0,0022)	(-0,98 ; 1,49)
Alto de Pinheiros	-0,0005	(-0,0024 ; 0,0014)	(-1,64 ; 0,97)

Tabela B.3: Estimativas das inclinações e intervalos de confiança obtidos nos ajustes das inclinações (correspondentes às retas de regressão linear simples) para a variável LST Noite, nas dez regiões estudadas, no período de 01 jan. 2003 a 31 dez. 2017.

Região	Inclinação	Intervalo de confiança para a inclinação (95%)	Intervalo de confiança multiplicado por n = 690
Jardim Peri	0,0005	(-0,0007 ; 0,0017)	(-0,47 ; 1,17)
Parque Estadual Fontes do Ipiranga	0,0003	(-0,0009 ; 0,0015)	(-0,64 ; 1,03)
Capoeirinha / Putim Ponte Alta (Guararema)	0,0002	(-0,0008 ; 0,0013)	(-0,57 ; 0,90)
Ribeirão das Pombas (Jandira)	0,0006	(-0,0006 ; 0,0018)	(-0,38 ; 1,26)
Polvilho (Cajamar)	0,0010	(-0,0002 ; 0,0022)	(-0,12 ; 1,51)
Trianon	0,0008	(-0,0006 ; 0,0022)	(-0,40 ; 1,52)
Sé	0,0005	(-0,0009 ; 0,0019)	(-0,65 ; 1,31)
Vila Curuçá	0,0007	(-0,0007 ; 0,0020)	(-0,47 ; 1,37)
Vila Andrade	0,0009	(-0,0004 ; 0,0022)	(-0,26 ; 1,48)
Alto de Pinheiros	0,0007	(-0,0006 ; 0,0020)	(-0,44 ; 1,41)

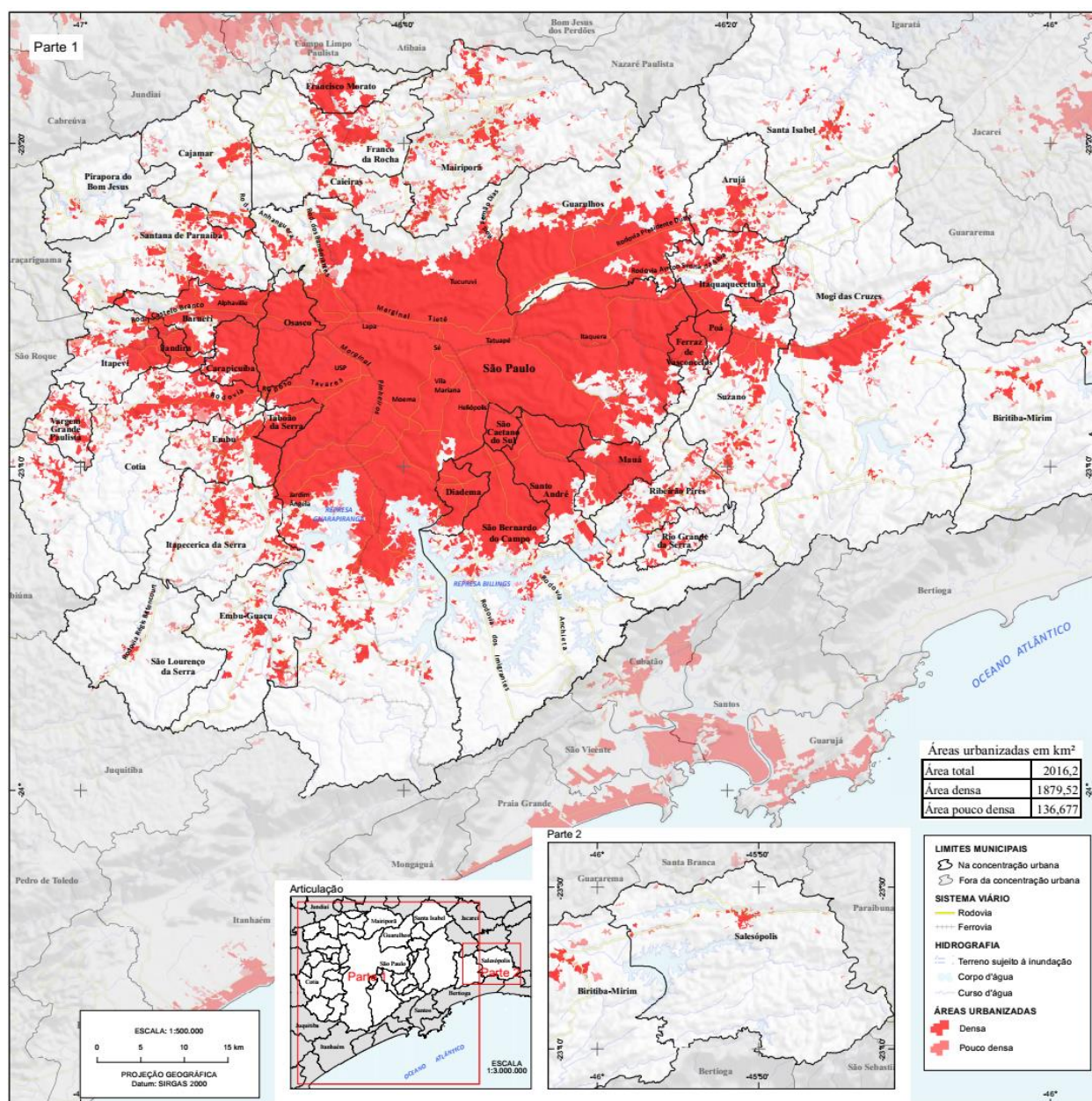
Tabela B.4: Estimativas das inclinações e intervalos de confiança obtidos nos ajustes das inclinações (correspondentes às retas de regressão linear simples) para a variável EVI, nas dez regiões estudadas, no período de 01 jan. 2003 a 31 dez. 2017.

Região	Inclinação	Intervalo de confiança para a inclinação (95%)	Intervalo de confiança multiplicado por n = 345
Jardim Peri	-0,00005	(-0,00011 ; 0,00002)	(-0,0395 ; 0,0081)
Parque Estadual Fontes do Ipiranga	0,00007	(-0,00001 ; 0,00015)	(-0,0028 ; 0,0510)
Capoeirinha / Putim Ponte Alta (Guararema)	0,00007	(0,00001 ; 0,00014)	(0,0026 ; 0,0479)
Ribeirão das Pombas (Jandira)	-0,00006	(-0,00013 ; 0,00001)	(-0,0452 ; 0,0019)
Polvilho (Cajamar)	-0,00008	(-0,00015 ; -0,00002)	(-0,0520 ; -0,0061)
Trianon	0,00007	(0,00004 ; 0,00010)	(0,0141 ; 0,0348)
Sé	0,00004	(0,00002 ; 0,00007)	(0,0061 ; 0,0230)
Vila Curuçá	0,00002	(0,00000 ; 0,00005)	(0,0008 ; 0,0164)
Vila Andrade	0,00003	(-0,00002 ; 0,00009)	(-0,0059 ; 0,0295)
Alto de Pinheiros	0,00012	(0,00007 ; 0,00016)	(0,0250 ; 0,0546)

Tabela B.5: Estimativas das inclinações e intervalos de confiança obtidos nos ajustes das inclinações (correspondentes às retas de regressão linear simples) para a variável NDVI, nas dez regiões estudadas, no período de 01 jan. 2003 a 31 dez. 2017.

Região	Inclinação	Intervalo de confiança para a inclinação (95%)	Intervalo de confiança multiplicado por n = 345
Jardim Peri	-0,00015	(-0,00024 ; -0,00006)	(-0,0816 ; -0,0218)
Parque Estadual Fontes do Ipiranga	0,00002	(-0,00005 ; 0,00009)	(-0,0161 ; 0,0320)
Capoeirinha / Putim Ponte Alta (Guararema)	0,00008	(0,00003 ; 0,00013)	(0,0109 ; 0,0457)
Ribeirão das Pombas (Jandira)	-0,00021	(-0,00027 ; -0,00015)	(-0,0933 ; -0,0501)
Polvilho (Cajamar)	-0,00027	(-0,00033 ; -0,00021)	(-0,1138 ; -0,0714)
Trianon	0,00011	(0,00005 ; 0,00016)	(0,0160 ; 0,0566)
Sé	0,00004	(-0,00001 ; 0,00009)	(-0,0043 ; 0,0314)
Vila Curuçá	0,00003	(0,00001 ; 0,00006)	(0,0026 ; 0,0213)
Vila Andrade	0,00004	(-0,00002 ; 0,00009)	(-0,0063 ; 0,0314)
Alto de Pinheiros	0,00015	(0,00011 ; 0,00019)	(0,0365 ; 0,0660)

APÊNDICE C: FIGURAS



Fonte: IBGE, DGC/Coordenação de Geografia; IBGE, DGC/Coordenação de Cartografia.
 Nota: (1) Consideram-se Concentrações Urbanas os arranjos populacionais e os municípios isolados com mais de 100.000 habitantes. Os municípios isolados são aqueles que não fazem parte de arranjos populacionais.
 (2) Nem todos os municípios das concentrações urbanas estão representados em sua totalidade, para fins de representação.

Figura C.1: Áreas Urbanizadas da Concentração Urbana da Região Metropolitana de São Paulo³.

³ **Fonte:** IBGE. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias-novoportal/organizacao-do-territorio/tipologias-do-territorio/15789-areas-urbanizadas.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 07 abr. 2018.



Figura C.2: Delimitação da Reserva da Biosfera do Cinturão Verde, que contempla a Região Metropolitana de São Paulo⁴.

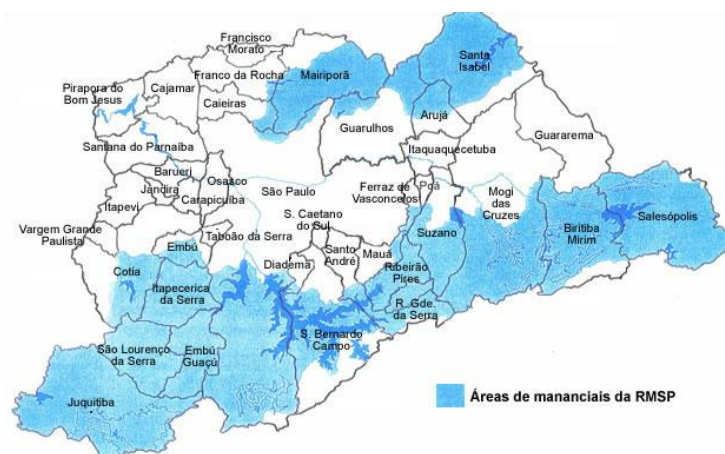


Figura C.3: Áreas de Proteção aos Mananciais da Região Metropolitana de São Paulo⁵.

⁴ **Fonte:** Autor desconhecido. Disponível em: <http://www.ecoturismoaventura.com.br/images/cinturao_verde_2.jpg>. Acesso em: 27 abr. 2018.

⁵ **Fonte:** Departamento Estadual de Proteção dos Recursos Naturais (DEPRN) e Departamento de Uso do Solo Metropolitano (DUSM). Disponível em: <<http://www.fundacaofia.com.br/gdusm/apm.htm>>. Acesso em: 27 abr. 2018.



Figura C.4: Localização da Região Metropolitana de São Paulo⁶.

⁶ **Fonte:** Pedro Cardoso de Carvalho e Freitas. Disponível em: <
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/53/SaoPaulo_RM_SaoPaulo.svg>. Acesso em: 20 abr. 2018.

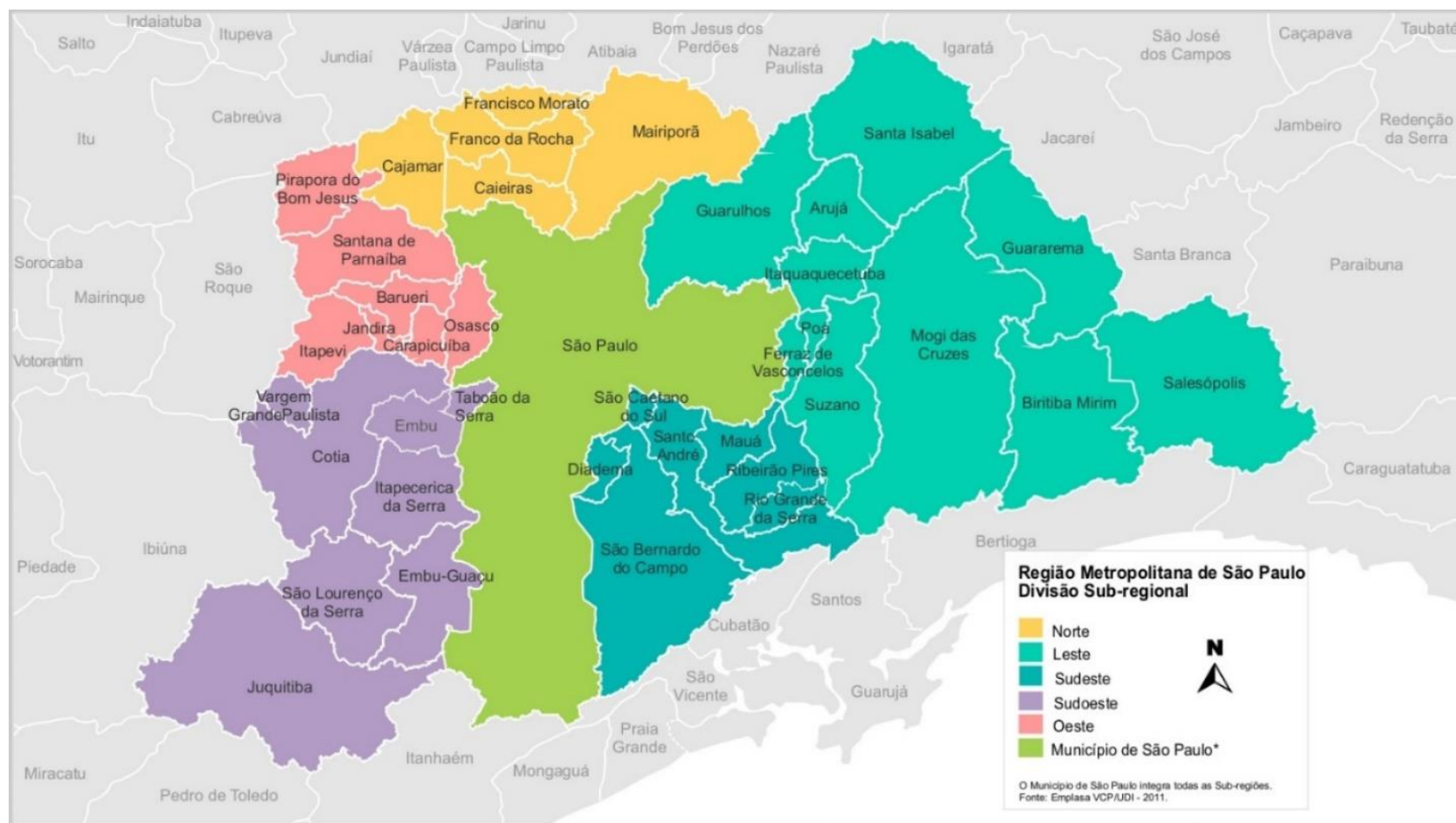


Figura C.5: Região Metropolitana de São Paulo, com divisões sub-regionais⁷.

⁷ **Fonte:** EMPLASA. Disponível em: <<https://www.emplasa.sp.gov.br/RMSP>>. Acesso em: 21 abr. 2018.

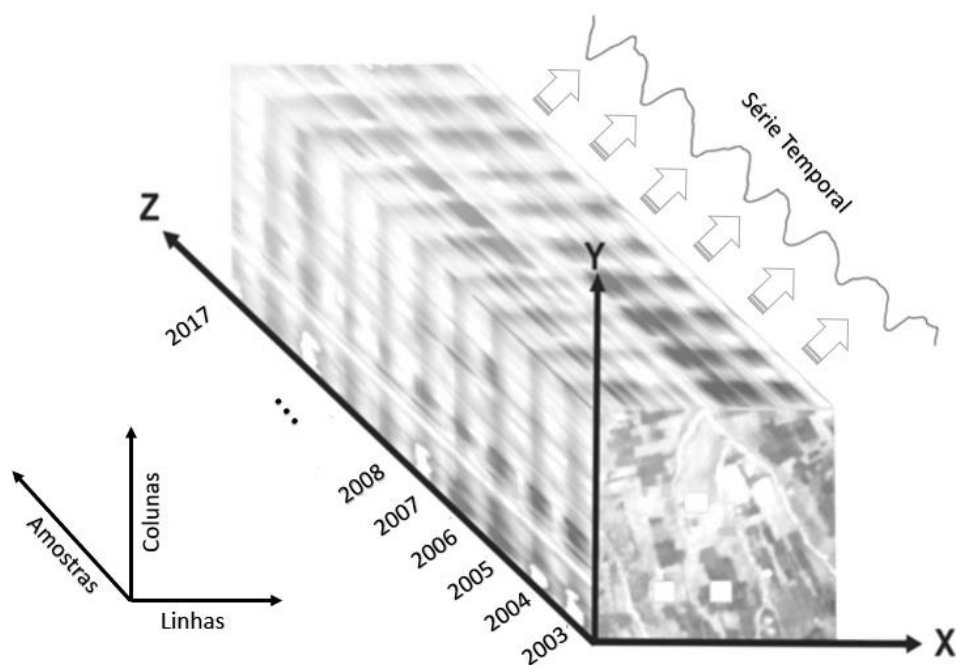


Figura C.6: Concepção de série temporal MODIS gerada a partir das imagens dispostas em sequência crescente⁸.

⁸ **Fonte:** Adaptado de Carvalho Júnior *et al.* (2002) e Couto Junior *et al.* (2013).



Figura C.7: Perda progressiva da vegetação observada no pixel “178627”.

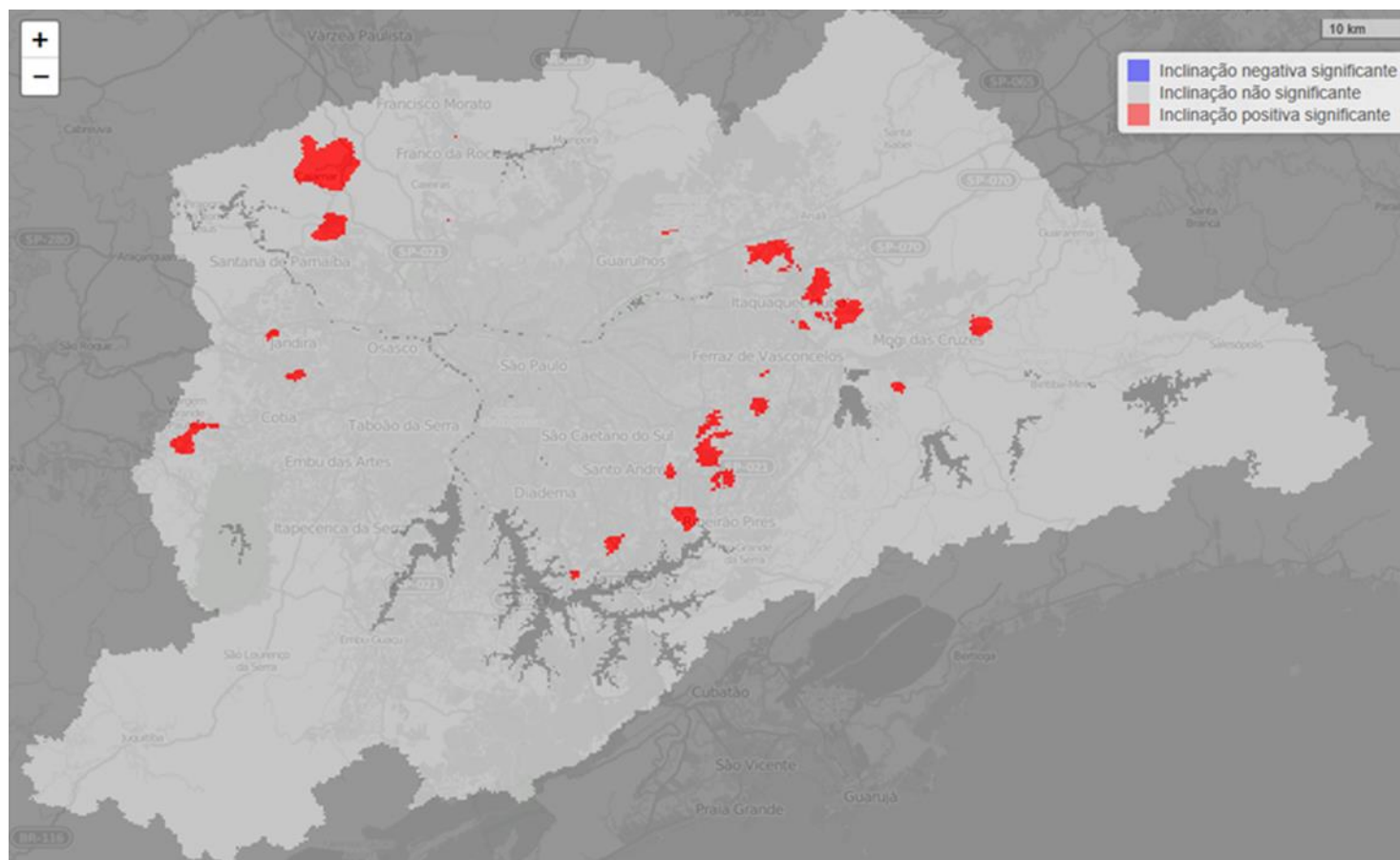


Figura C.8: Mapa da Região Metropolitana de São Paulo para o ajuste da reta (correspondente a reta de regressão linear simples), realizado na variável LST Dia, para avaliação da significância prática das alterações na temperatura. Os pixels em vermelho indicam aumento da temperatura de superfície, no período de 01 jan. 2003 a 31 dez. 2017, com significância prática.

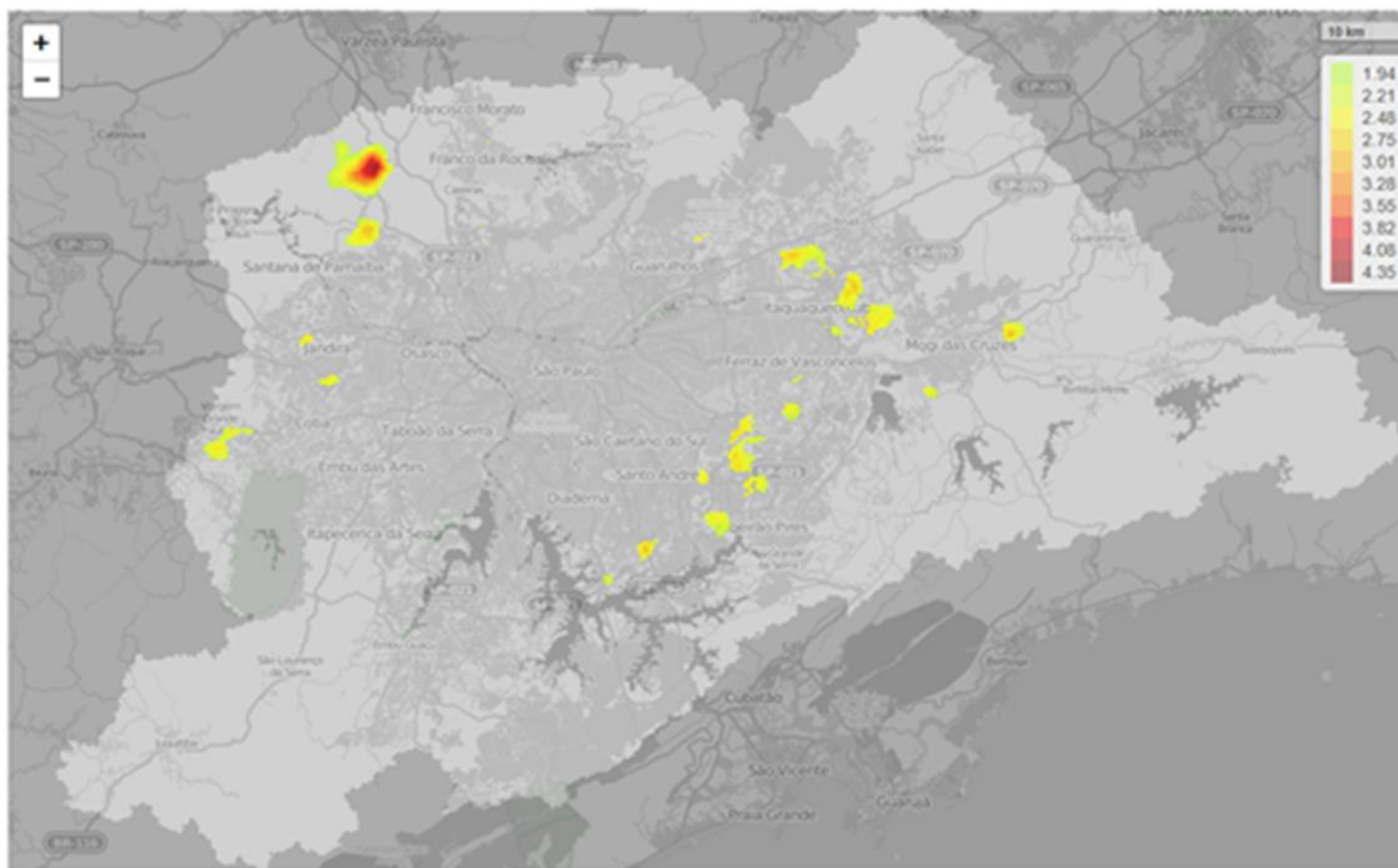


Figura C.9: Mapa da Região Metropolitana de São Paulo para o ajuste da reta (correspondente a reta de regressão linear simples), realizado na variável LST Dia, para avaliação da significância prática das alterações na temperatura. Na legenda está indicada uma escala para as inclinações obtidas, considerando o período de 01 jan. 2003 a 31 dez. 2017.

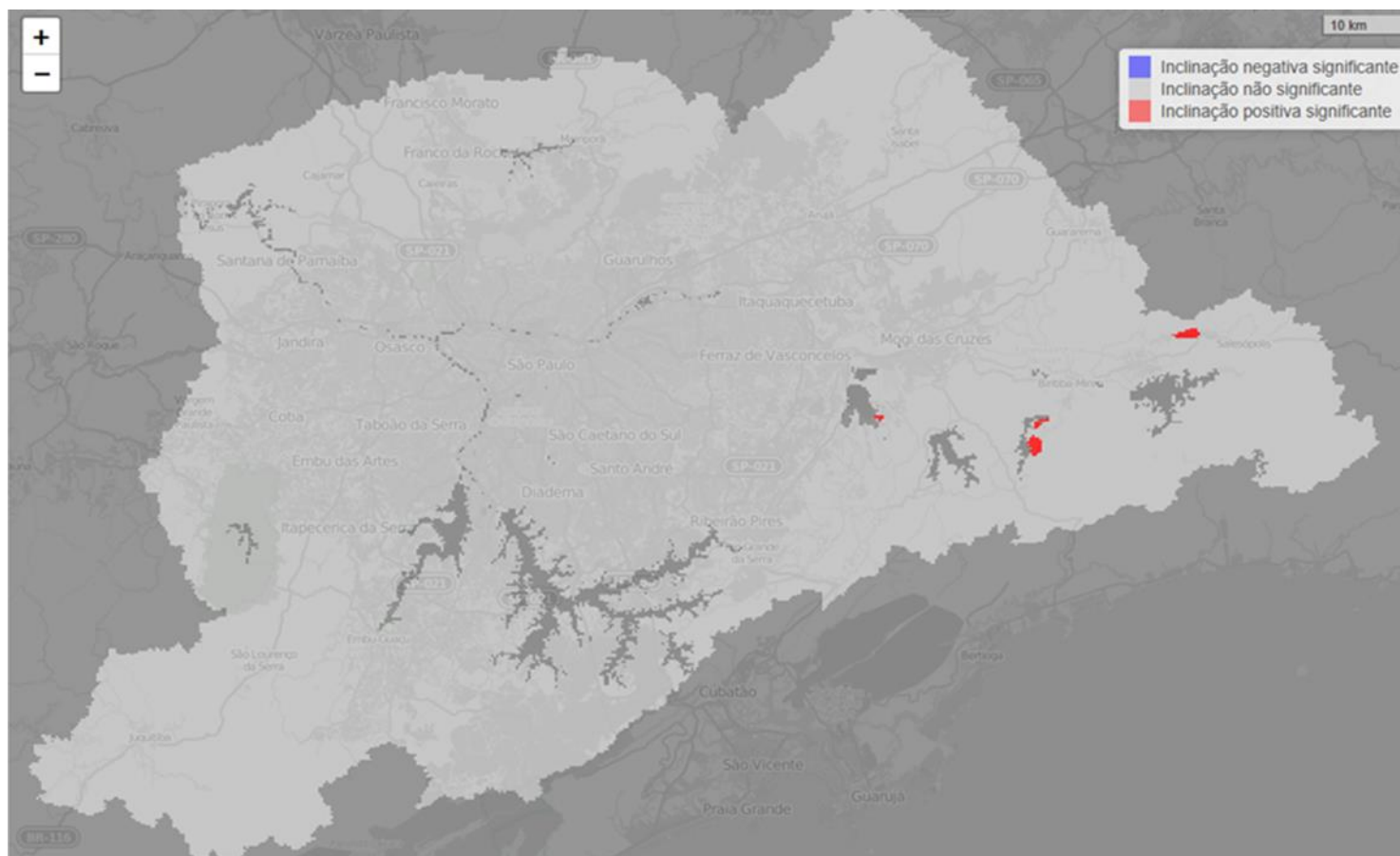


Figura C.10: Mapa da Região Metropolitana de São Paulo para o ajuste da reta (correspondente a reta de regressão linear simples), realizado na variável LST Noite, para avaliação da significância prática das alterações na temperatura. Os pixels em vermelho indicam aumento da temperatura de superfície, no período de 01 jan. 2003 a 31 dez. 2017, com significância prática.

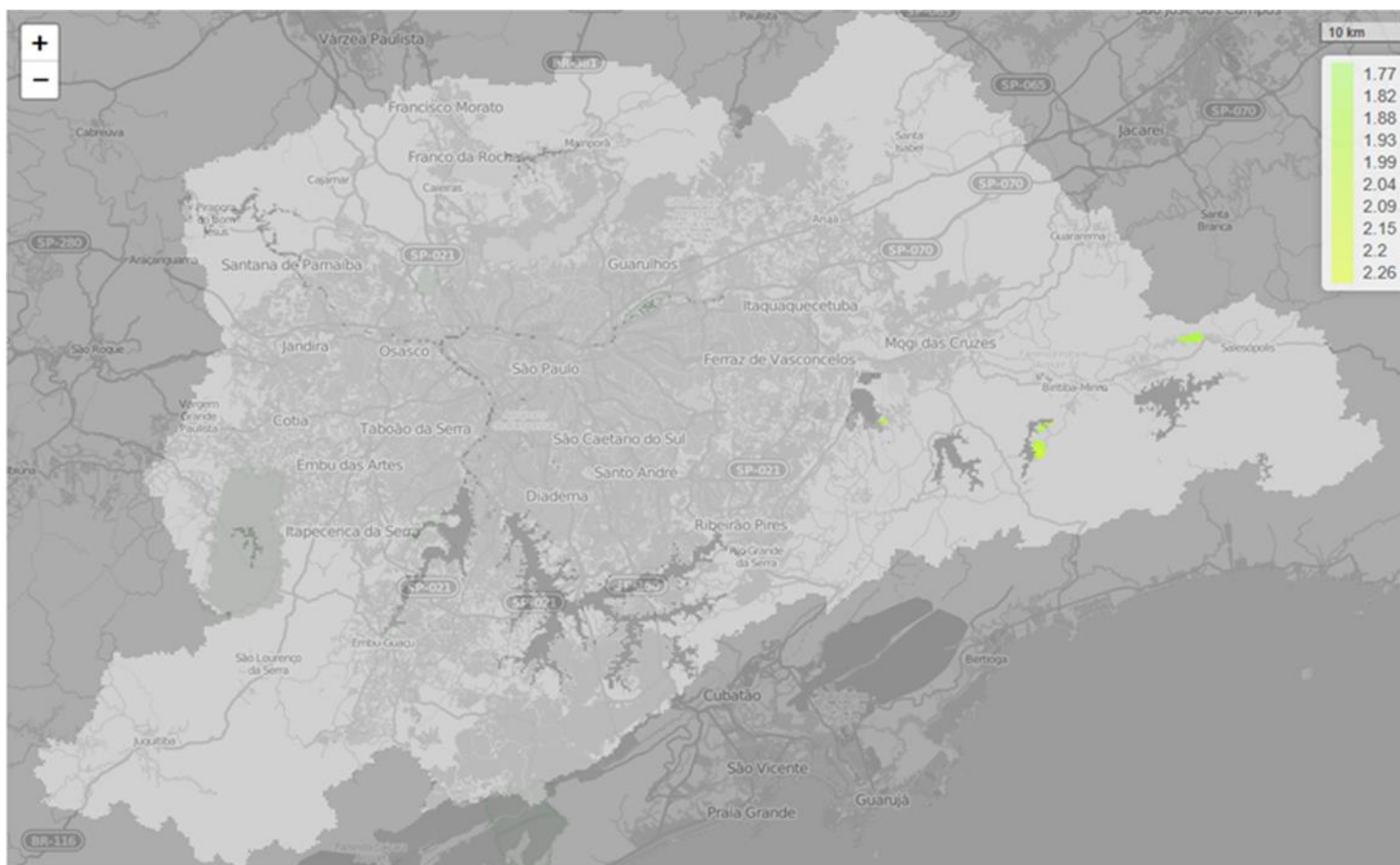


Figura C.11: Mapa da Região Metropolitana de São Paulo para o ajuste da reta (correspondente a reta de regressão linear simples), realizado na variável LST Noite, para avaliação da significância prática das alterações na temperatura. Na legenda está indicada uma escala para as inclinações obtidas, considerando o período de 01 jan. 2003 a 31 dez. 2017.

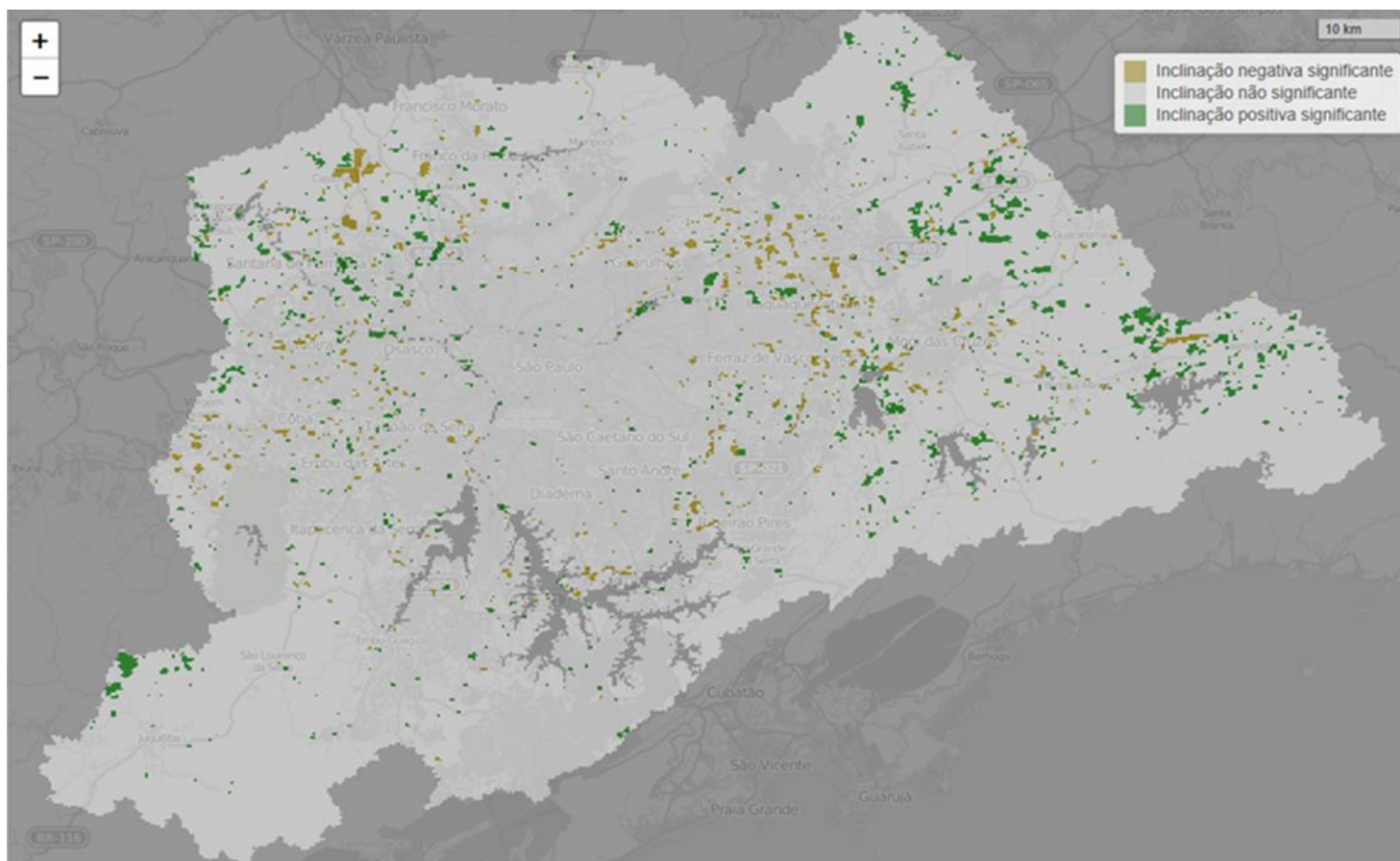


Figura C.12: Mapa da Região Metropolitana de São Paulo para o ajuste da reta (correspondente a reta de regressão linear simples), realizado na variável EVI, para avaliação da significância prática das alterações na vegetação. Os pixels em marrom indicam perda da vegetação e os pixels em verde indicam aumento da vegetação, no período de 01 jan. 2003 a 31 dez. 2017, com significância prática.

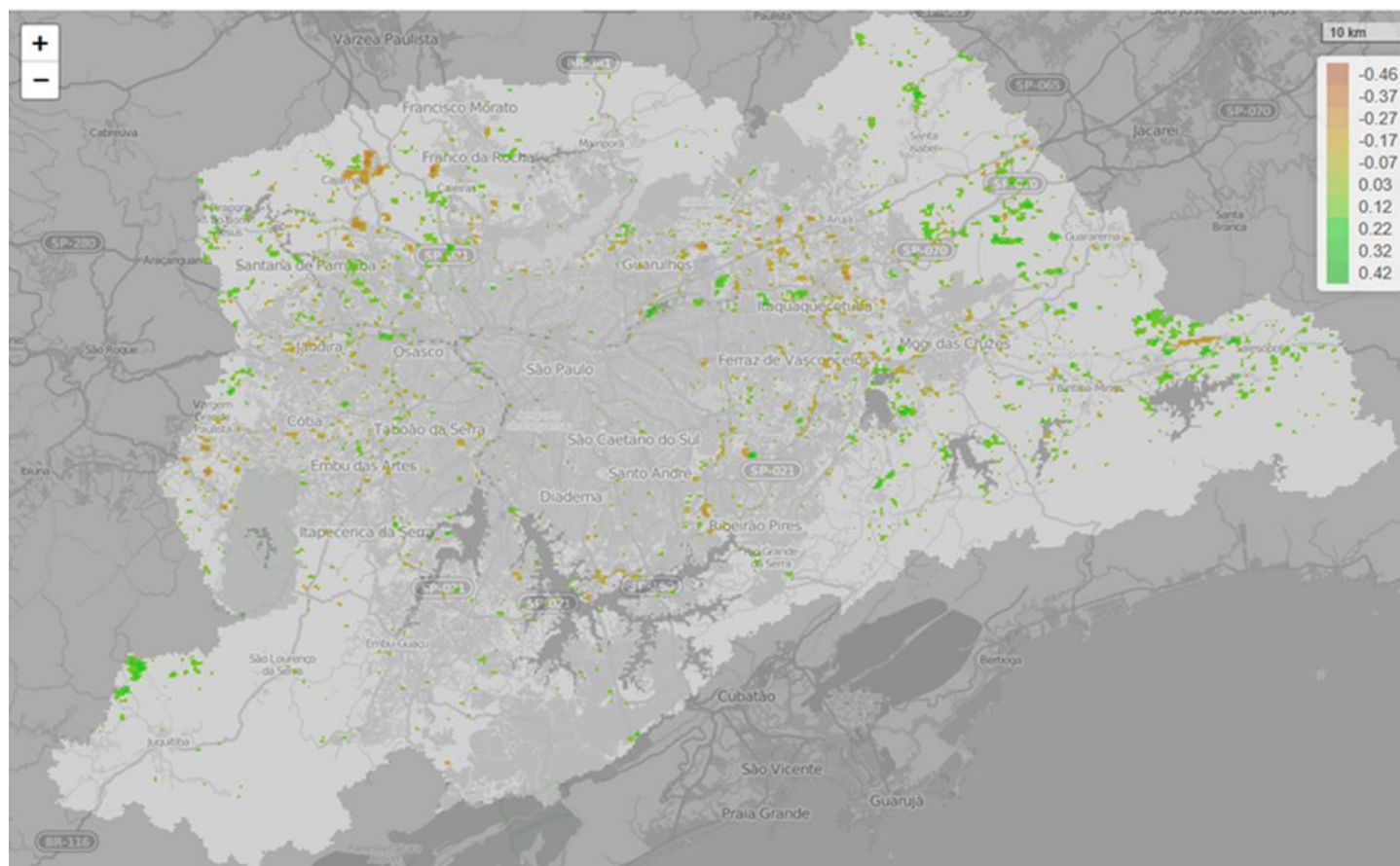


Figura C.13: Mapa da Região Metropolitana de São Paulo para o ajuste da reta (correspondente a reta de regressão linear simples), realizado na variável EVI, para avaliação da significância prática das alterações na vegetação. Na legenda está indicada uma escala para as inclinações obtidas, considerando o período de 01 jan. 2003 a 31 dez. 2017.

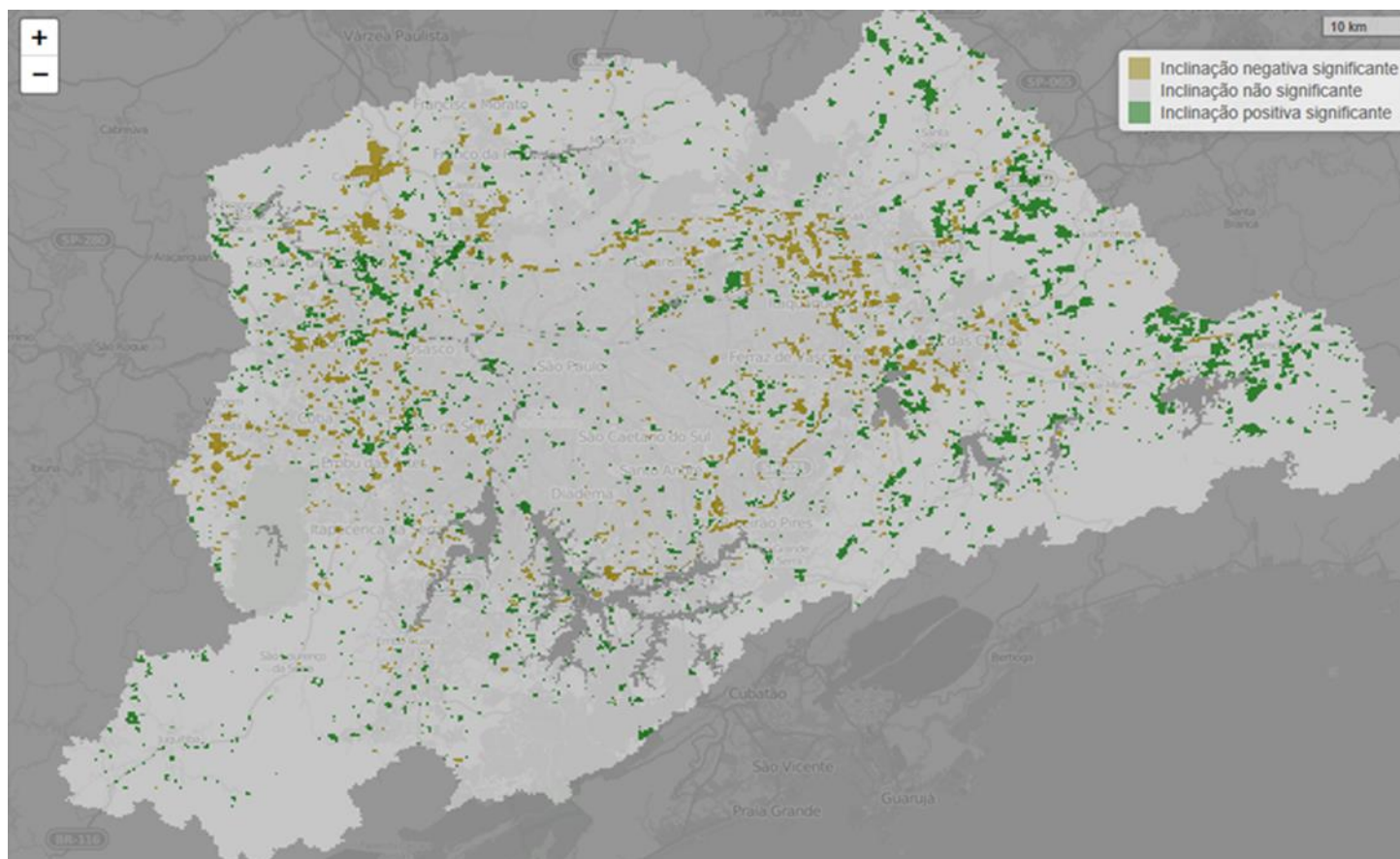


Figura C.14: Mapa da Região Metropolitana de São Paulo para o ajuste da reta (correspondente a reta de regressão linear simples), realizado na variável NDVI, para avaliação da significância prática das alterações na vegetação. Os pixels em marrom indicam perda da vegetação e os pixels em verde indicam aumento da vegetação, no período de 01 jan. 2003 a 31 dez. 2017, com significância prática.

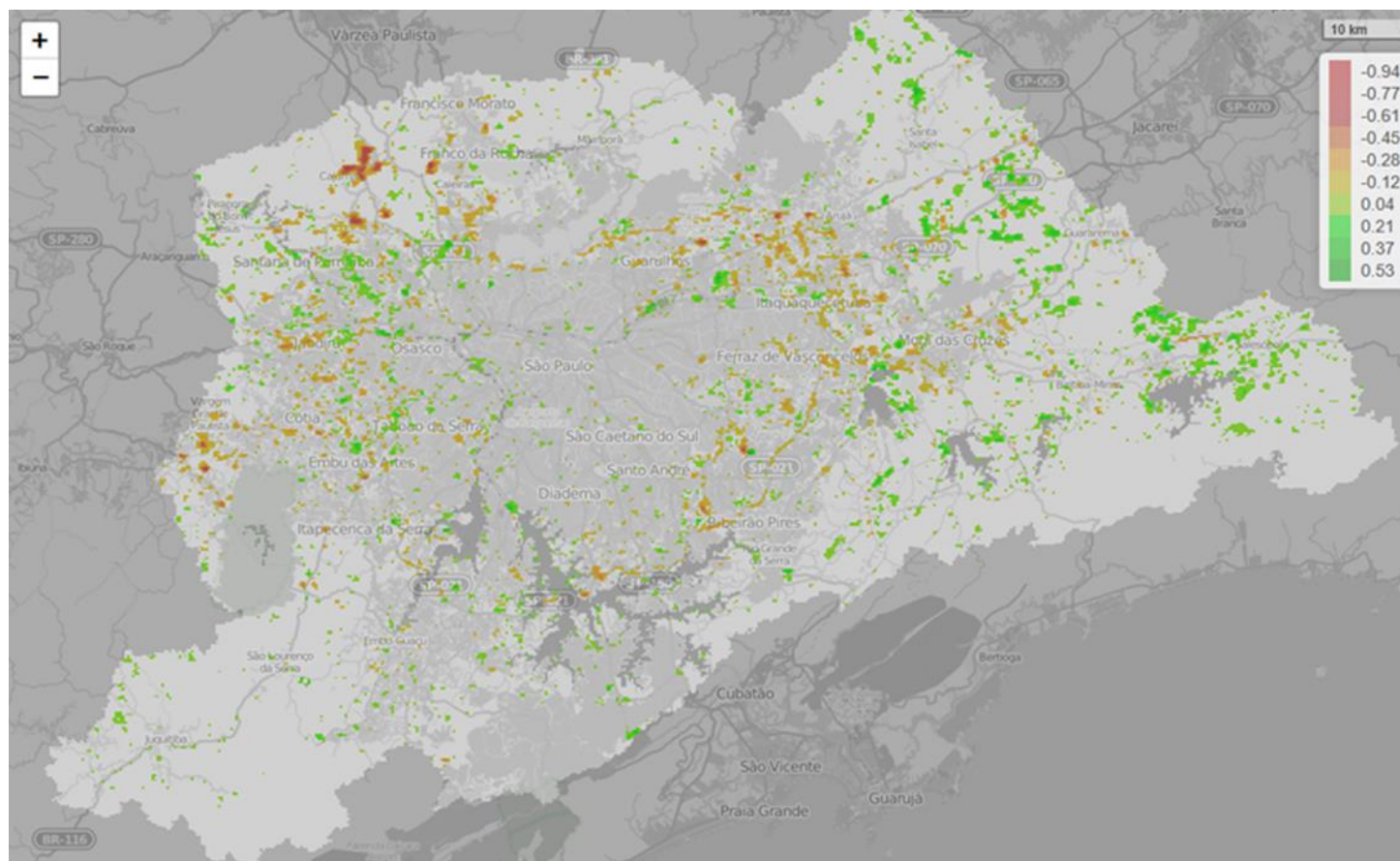


Figura C.15: Mapa da Região Metropolitana de São Paulo para o ajuste da reta (correspondente a reta de regressão linear simples), realizado na variável NDVI, para avaliação da significância prática das alterações na vegetação. Na legenda está indicada uma escala para as inclinações obtidas, considerando o período de 01 jan. 2003 a 31 dez. 2017.

Região	Intervalo de confiança para a inclinação multiplicado por n = 690
Cajamar	(1,10 ; 2,96)
Campo Limpo	(1,04 ; 3,22)
Jardim Nova Itaquí	(1,11 ; 3,63)
Parque São Rafael	(1,07 ; 3,40)
Ribeirão Itaquí (Jandira)	(1,26 ; 3,73)
Terceira Divisão	(1,00 ; 3,03)
Zaáira	(1,02 ; 3,37)

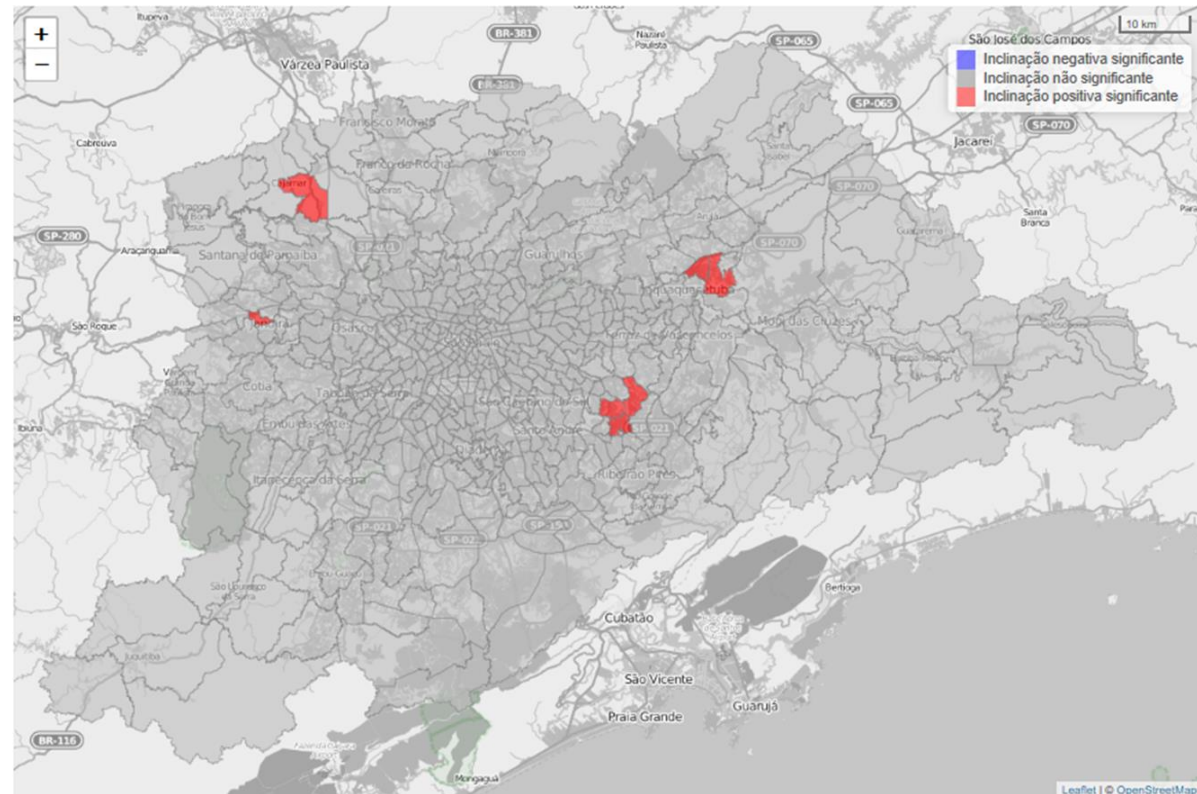


Figura C.16: Mapa da Região Metropolitana de São Paulo para o ajuste da reta (correspondente a reta de regressão linear simples), realizado na variável LST Dia, para avaliação da significância prática das alterações na temperatura. As regiões em vermelho indicam aumento da temperatura de superfície, no período de 01 jan. 2003 a 31 dez. 2017, com significância prática.

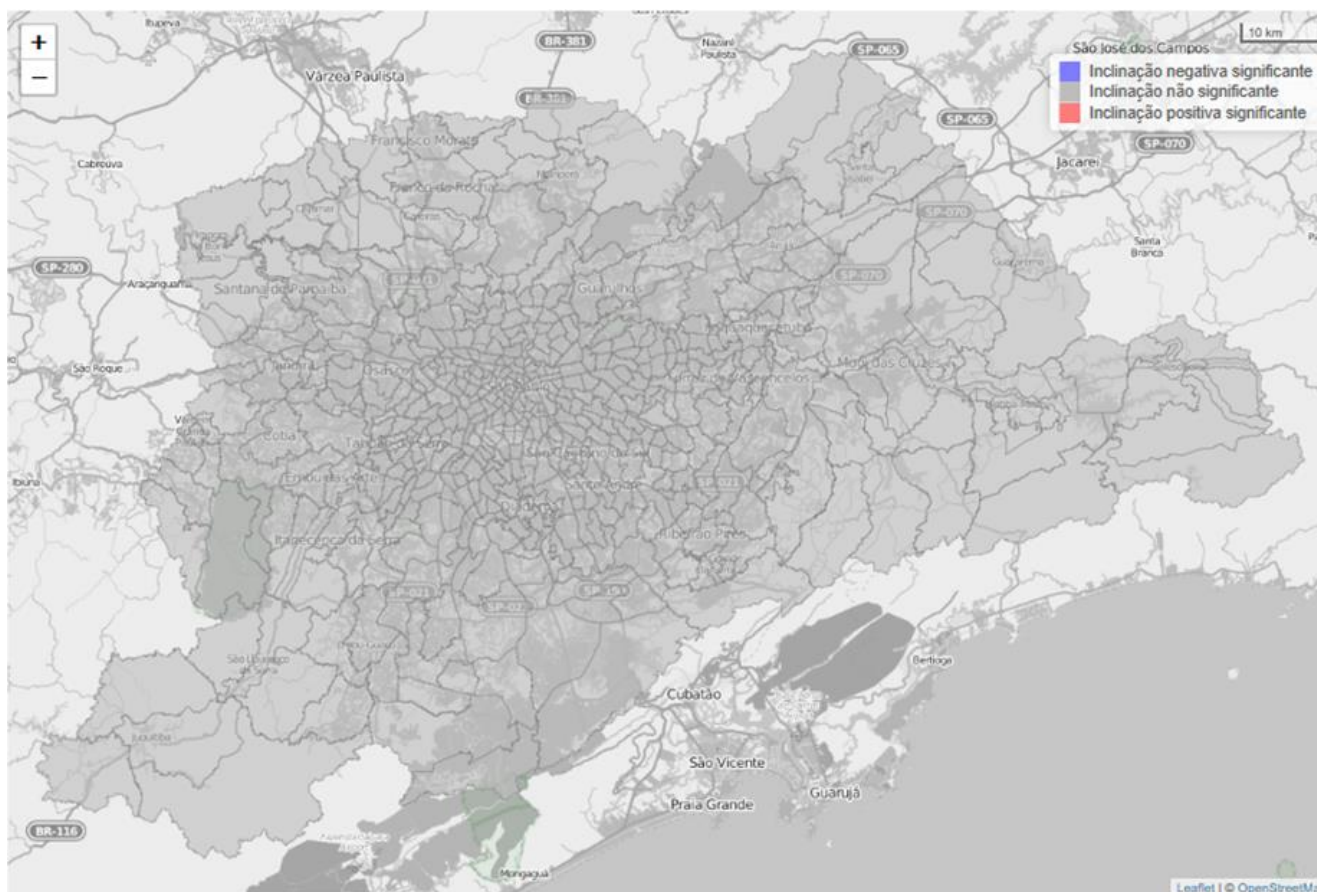


Figura C.17: Mapa da Região Metropolitana de São Paulo para o ajuste da reta (correspondente a reta de regressão linear simples), realizado na variável LST Noite, para avaliação da significância prática das alterações na temperatura, no período de 01 jan. 2003 a 31 dez. 2017.

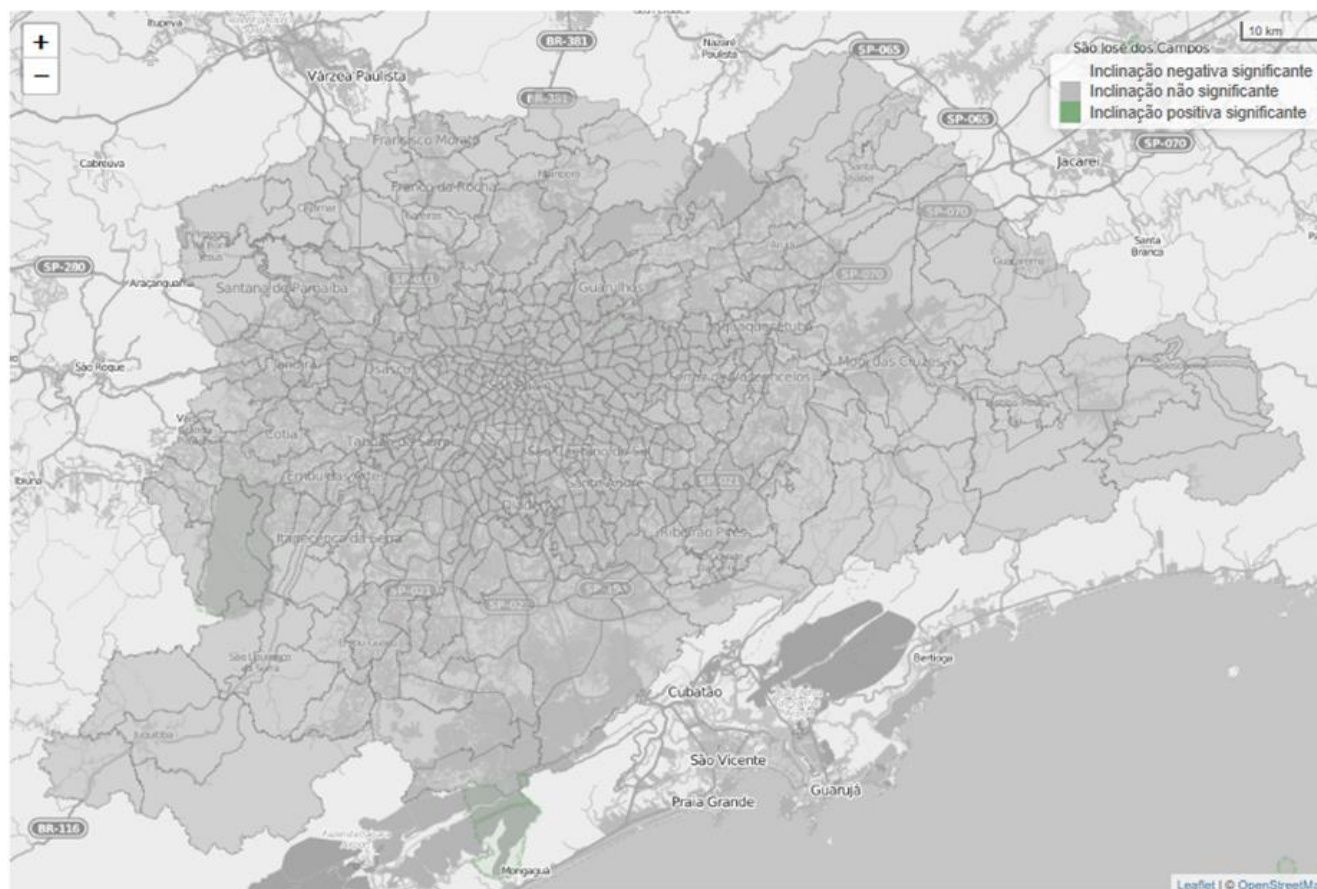


Figura C.18: Mapa da Região Metropolitana de São Paulo para o ajuste da reta (correspondente a reta de regressão linear simples), realizado na variável EVI, para avaliação da significância prática das alterações na vegetação, no período de 01 jan. 2003 a 31 dez. 2017.

Região	Intervalo de confiança para a inclinação multiplicado por $n = 345$
Boaçava	(0,064 ; 0,105)
Cajamar	(-0,093 ; -0,050)
Chácara Itaim	(0,062 ; 0,103)
Jardim Belval	(-0,093 ; -0,053)
Polvilho	(-0,114 ; -0,071)
Ribeirão das Pombas	(-0,093 ; -0,050)
Ribeirão Itaquí (Jandira)	(-0,108 ; -0,065)
Vila Sabará	(0,067 ; 0,106)

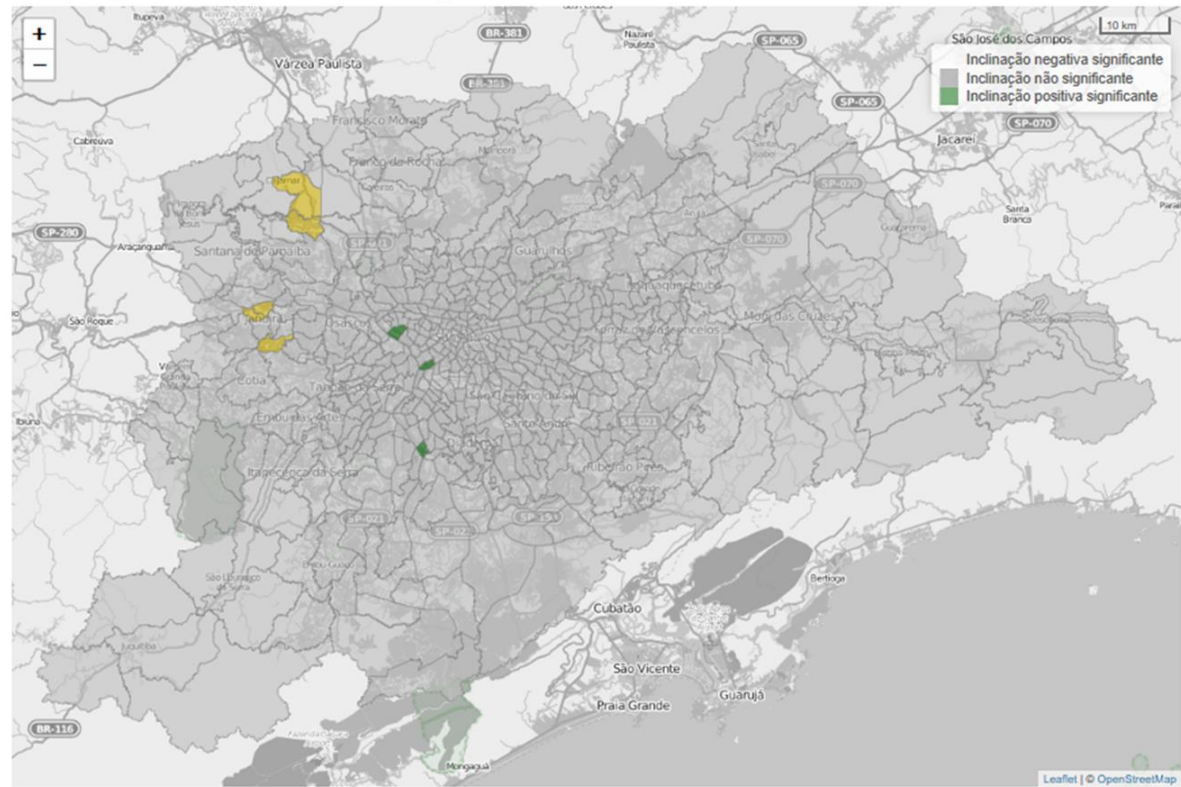


Figura C.19: Mapa da Região Metropolitana de São Paulo para o ajuste da reta (correspondente a reta de regressão linear simples), realizado na variável NDVI, para avaliação da significância prática das alterações na vegetação. As regiões em marrom indicam perda de vegetação e as regiões em verde indicam aumento da vegetação, no período de 01 jan. 2003 a 31 dez. 2017, com significância prática.

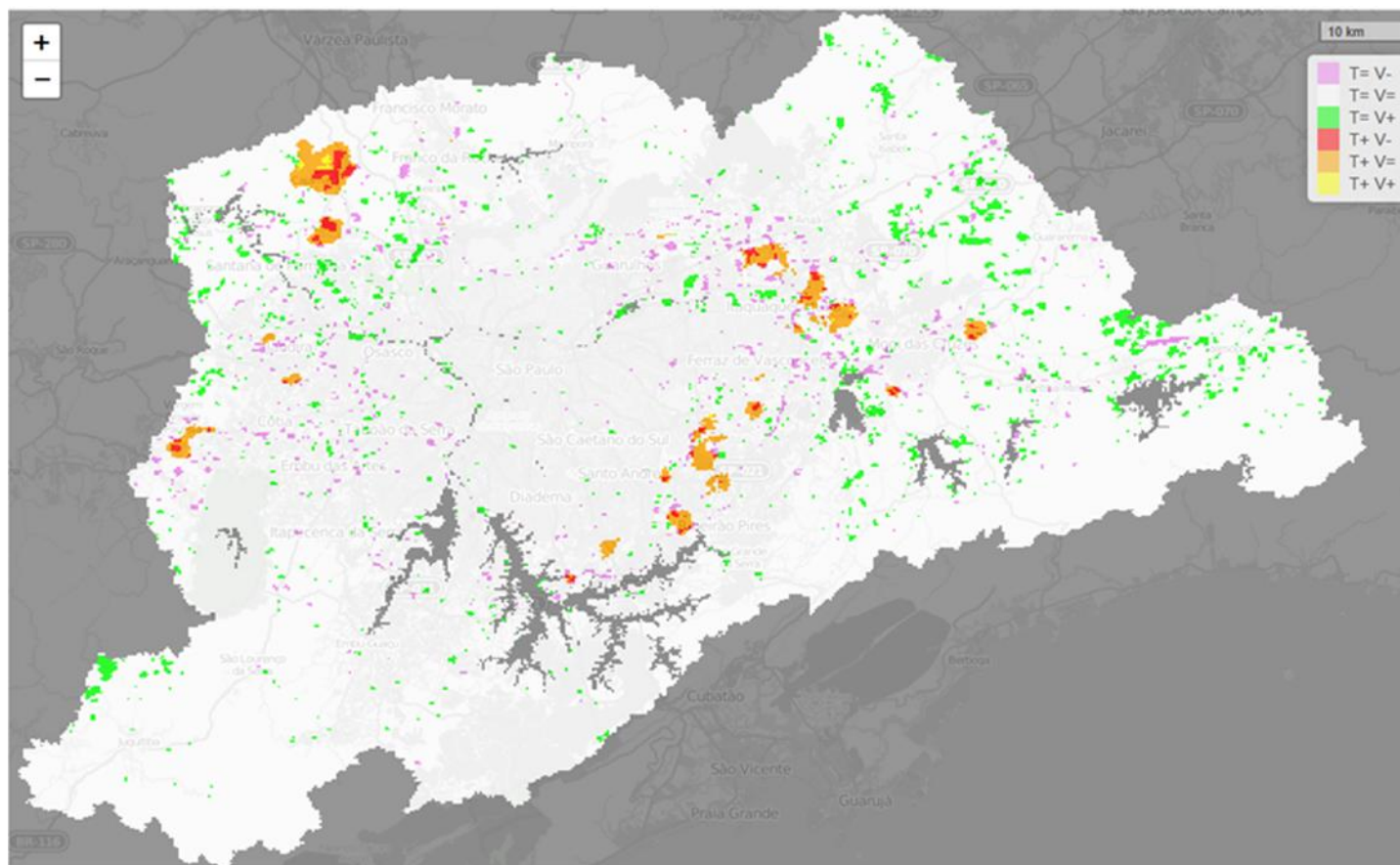


Figura C.20: Mapa da Região Metropolitana de São Paulo com cruzamento entre as variáveis LST Dia e EVI, considerando o período de 01 jan. 2003 a 31 dez. 2017, com significância prática.

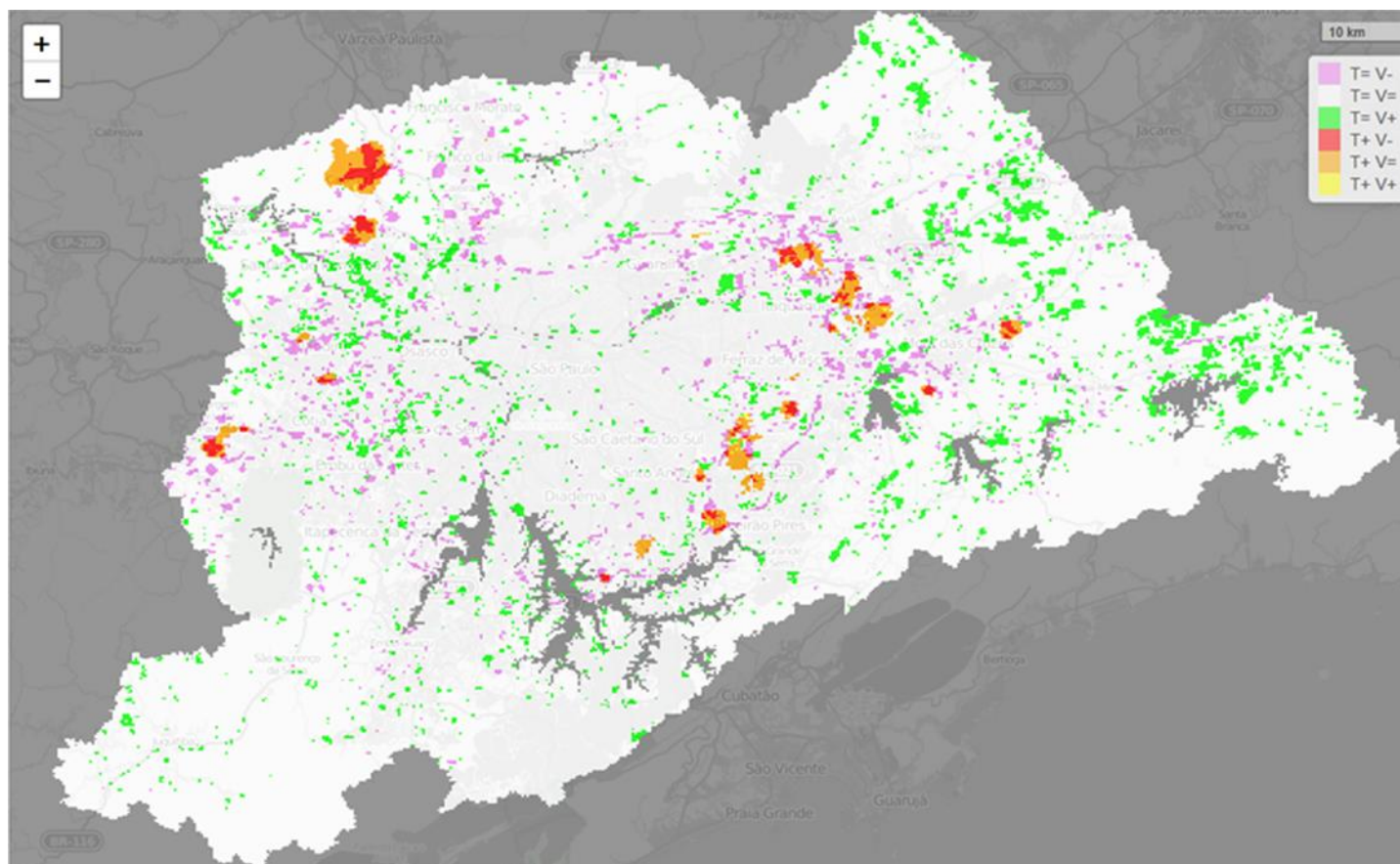


Figura C.21: Mapa da Região Metropolitana de São Paulo com cruzamento entre as variáveis LST Dia e NDVI, considerando o período de 01 jan. 2003 a 31 dez. 2017, com significância prática.

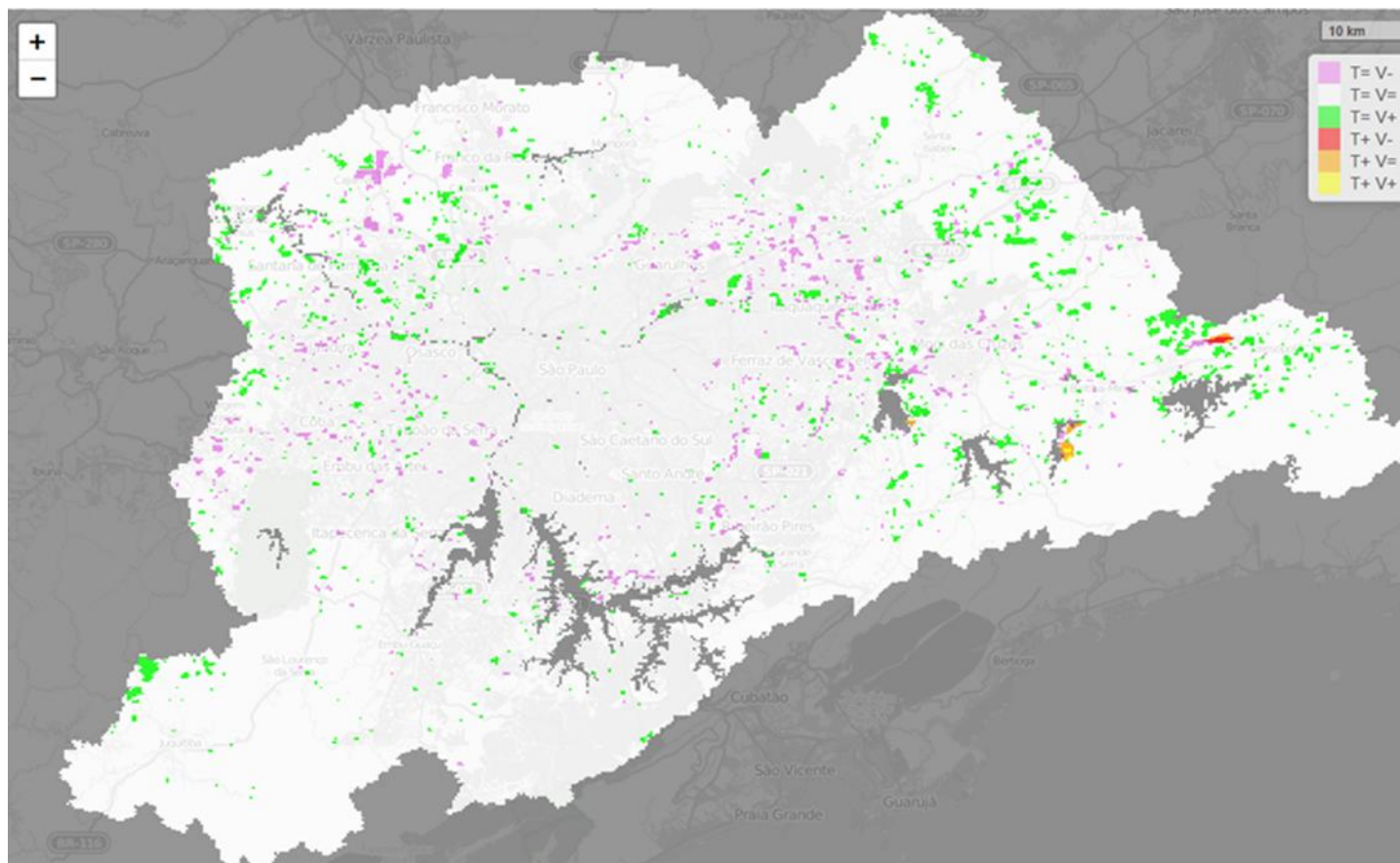


Figura C.22: Mapa da Região Metropolitana de São Paulo com cruzamento entre as variáveis LST Noite e EVI, considerando o período de 01 jan. 2003 a 31 dez. 2017, com significância prática.

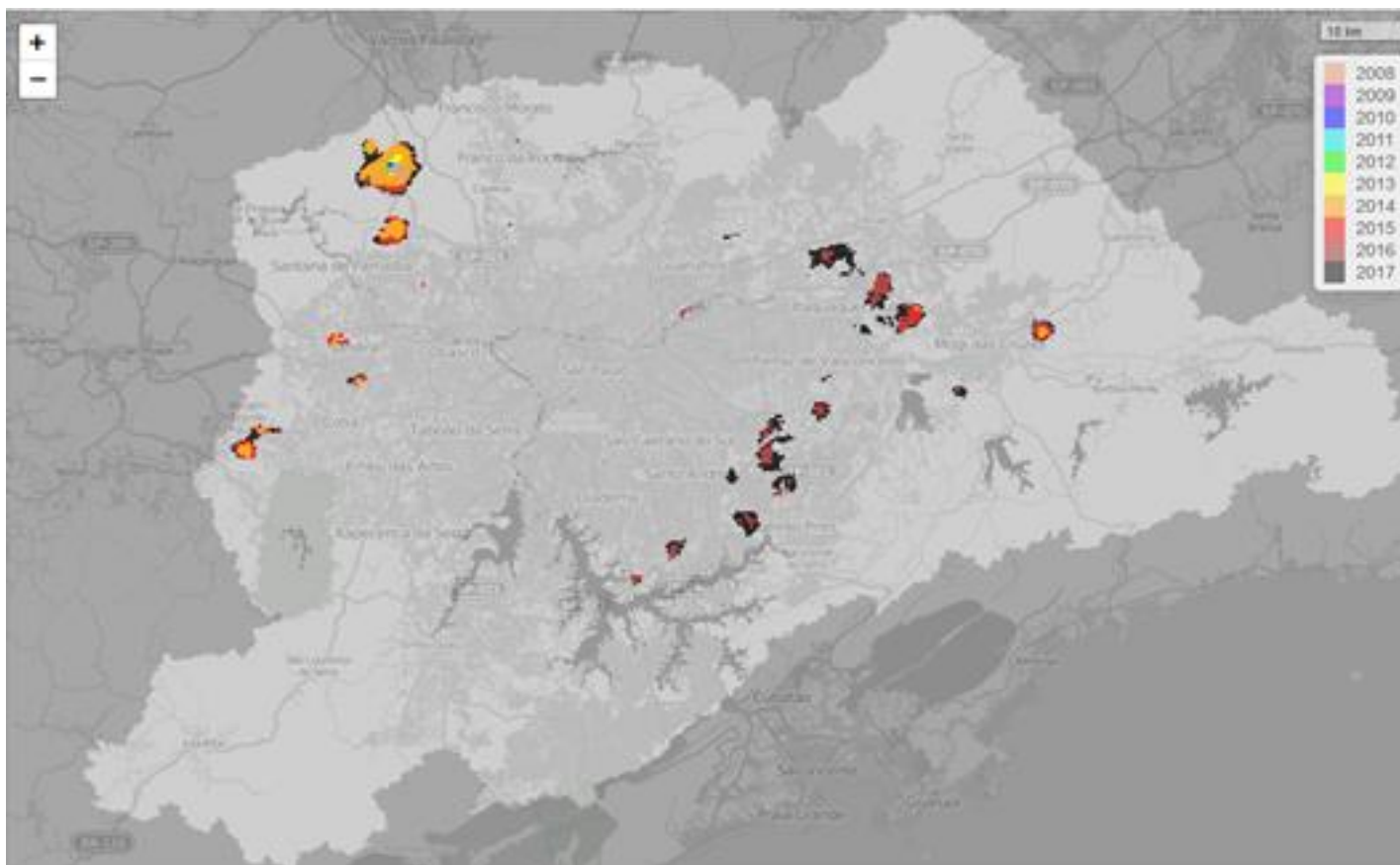


Figura C.24: Mapa da Região Metropolitana de São Paulo com ano de aumento da temperatura, considerando a variável LST Dia (por pixel).

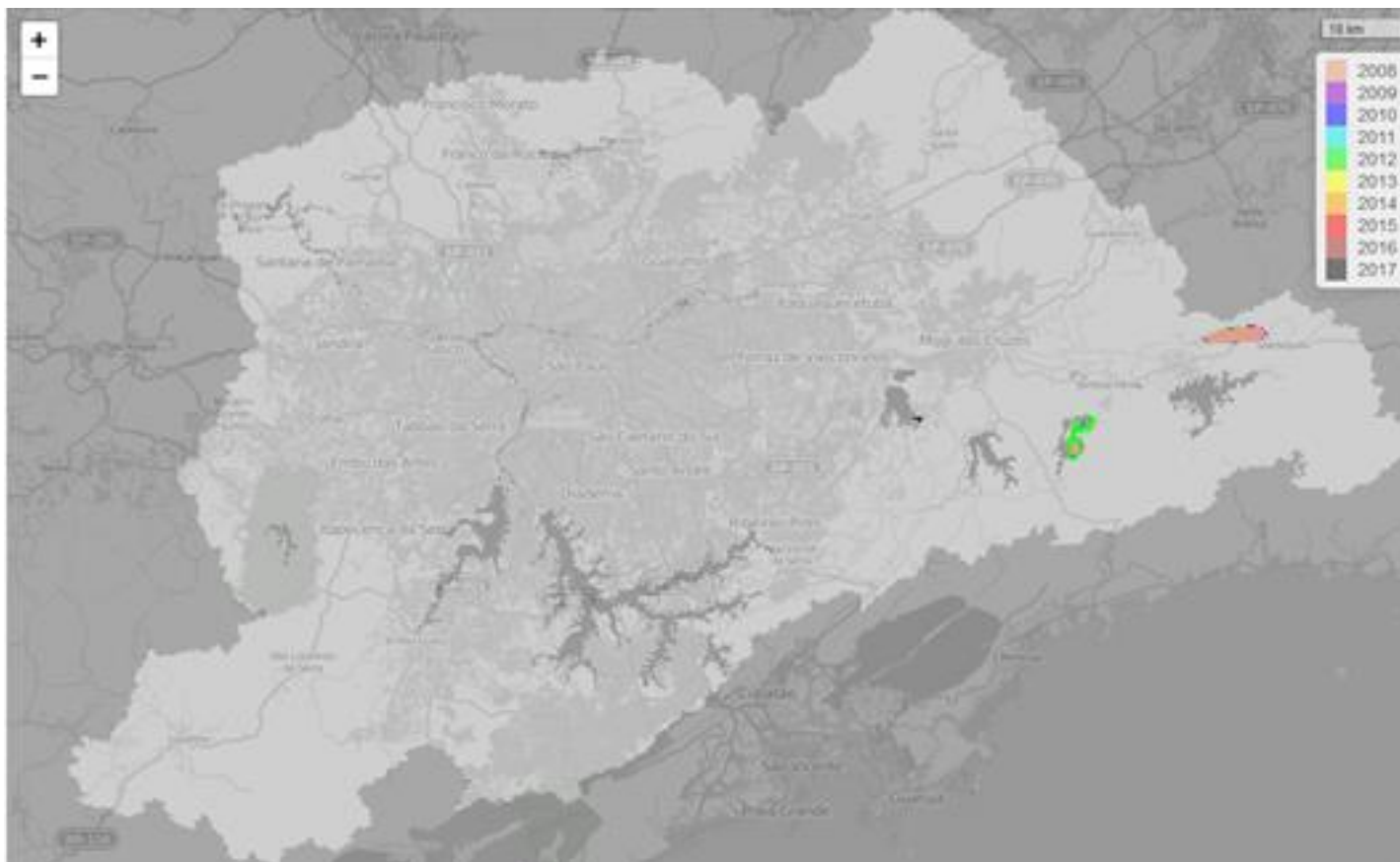


Figura C.25: Mapa da Região Metropolitana de São Paulo com ano de aumento da temperatura, considerando a variável LST Noite (por pixel).

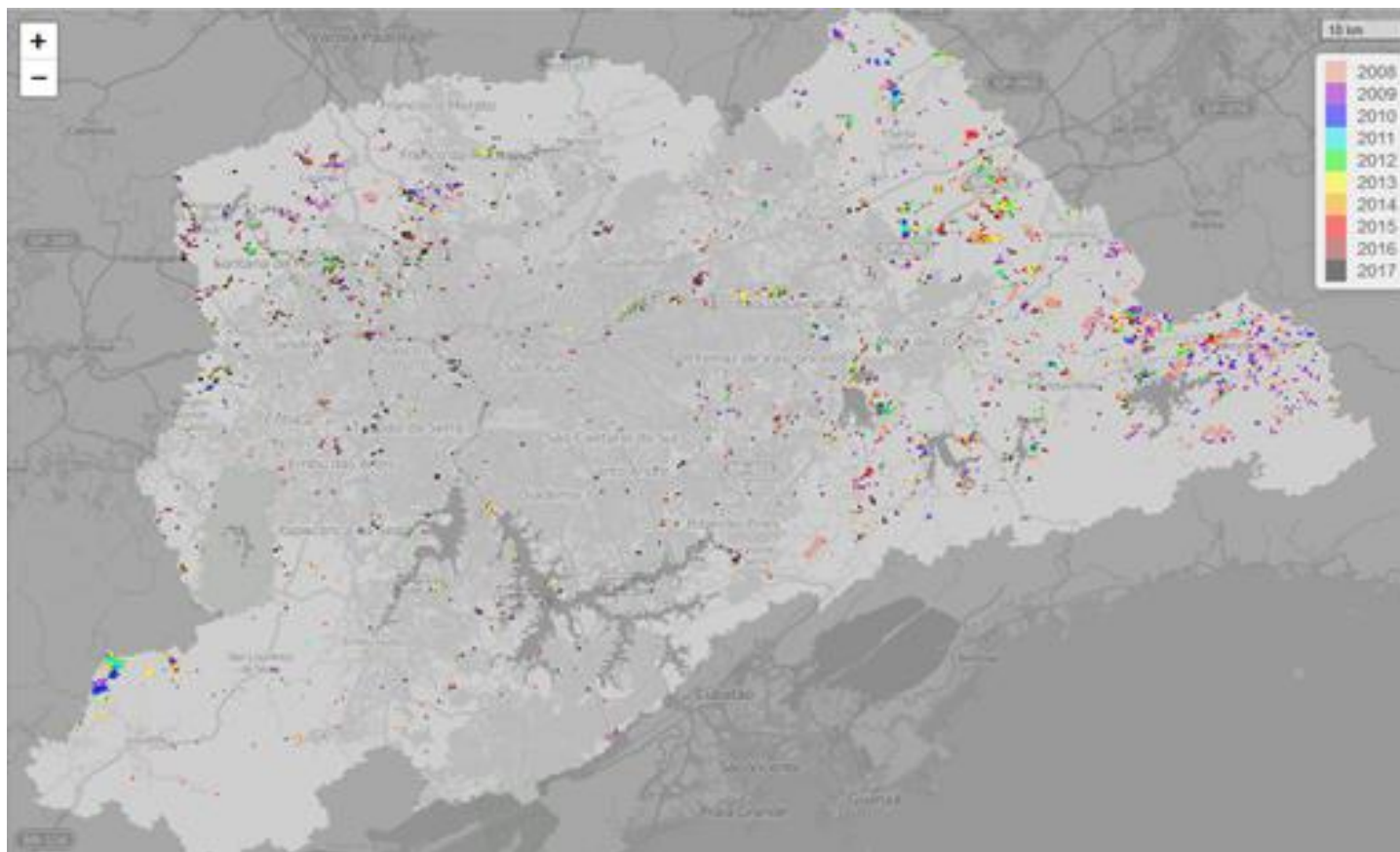


Figura C.26: Mapa da Região Metropolitana de São Paulo com ano de aumento da vegetação, considerando a variável EVI (por pixel).

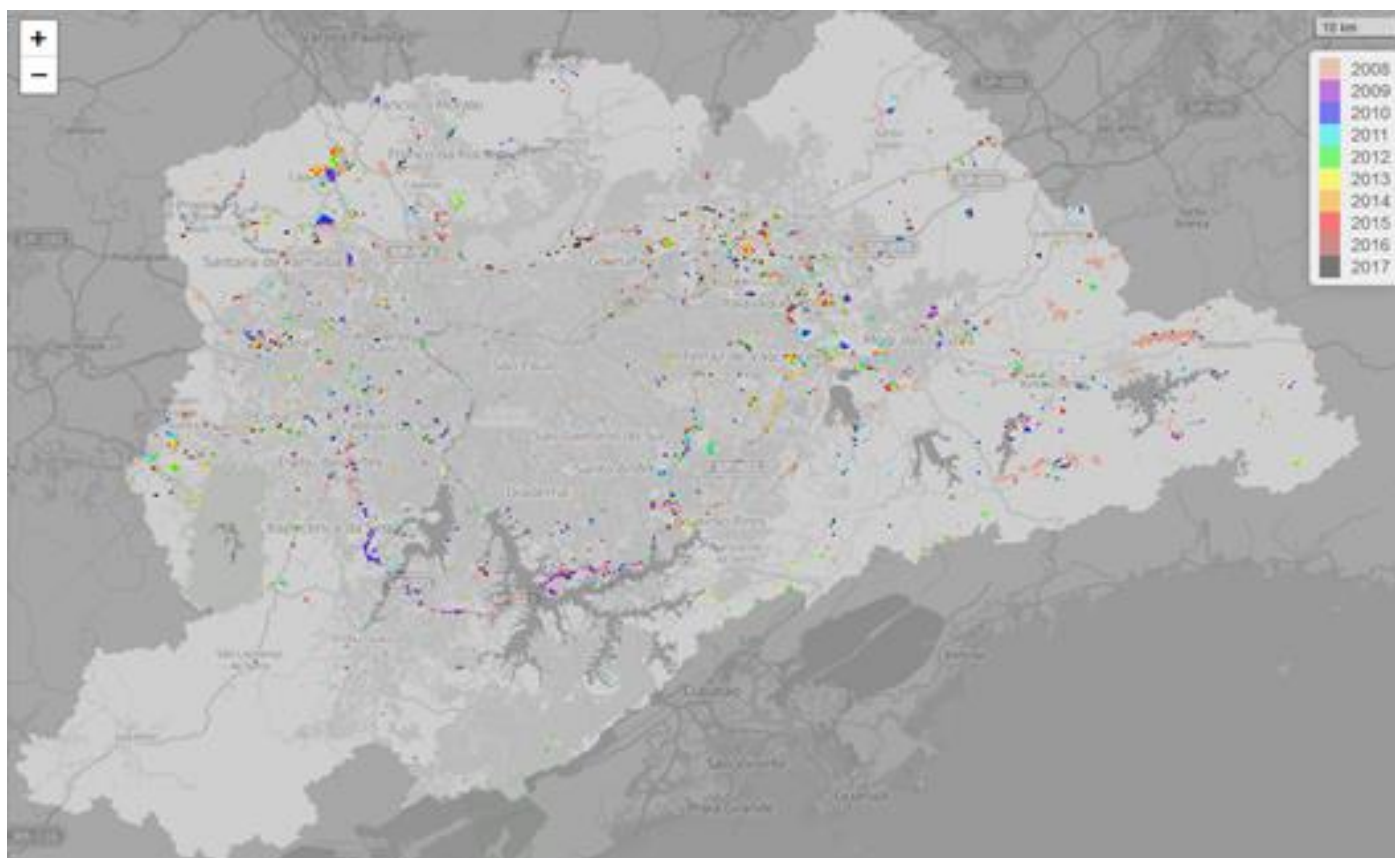


Figura C.27: Mapa da Região Metropolitana de São Paulo com ano de perda da vegetação, considerando a variável EVI (por pixel).

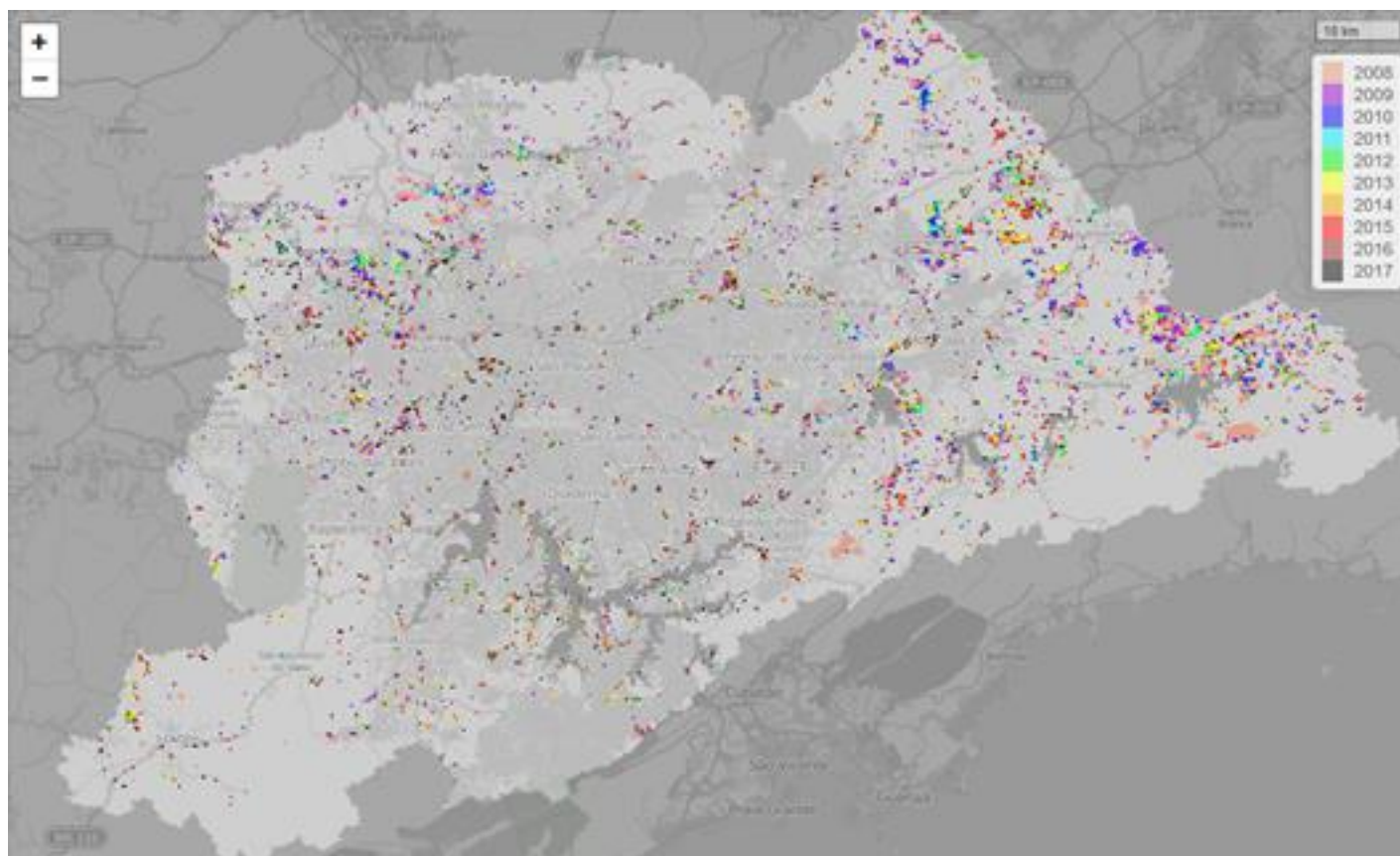


Figura C.28: Mapa da Região Metropolitana de São Paulo com ano de aumento da vegetação, considerando a variável NDVI (por pixel).

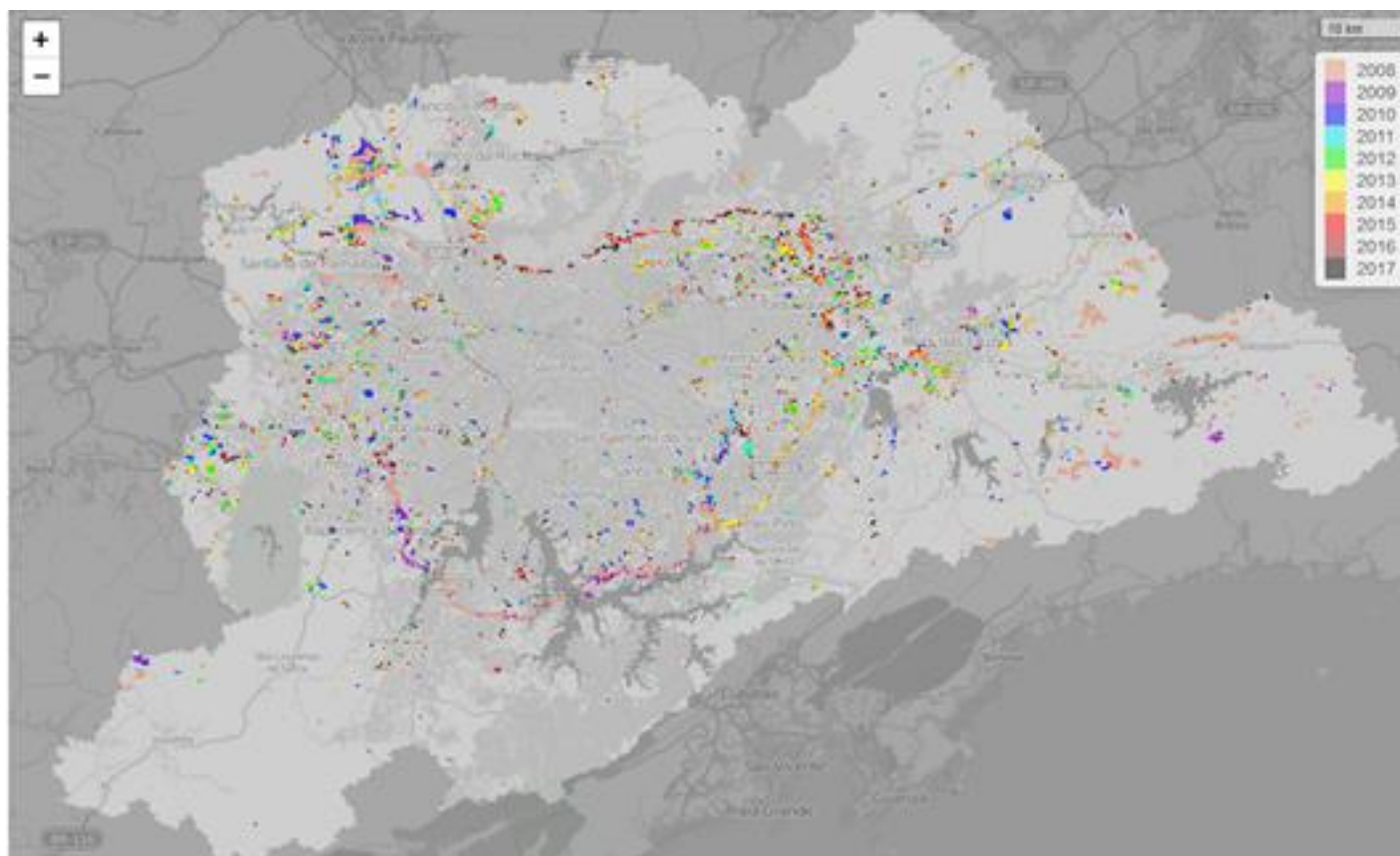


Figura C.29: Mapa da Região Metropolitana de São Paulo com ano de perda da vegetação, considerando a variável NDVI (por pixel).

Região	Ano de aumento da vegetação
Chácara Itaim	2016
Vila Sabará	2016
Boaçava	2017

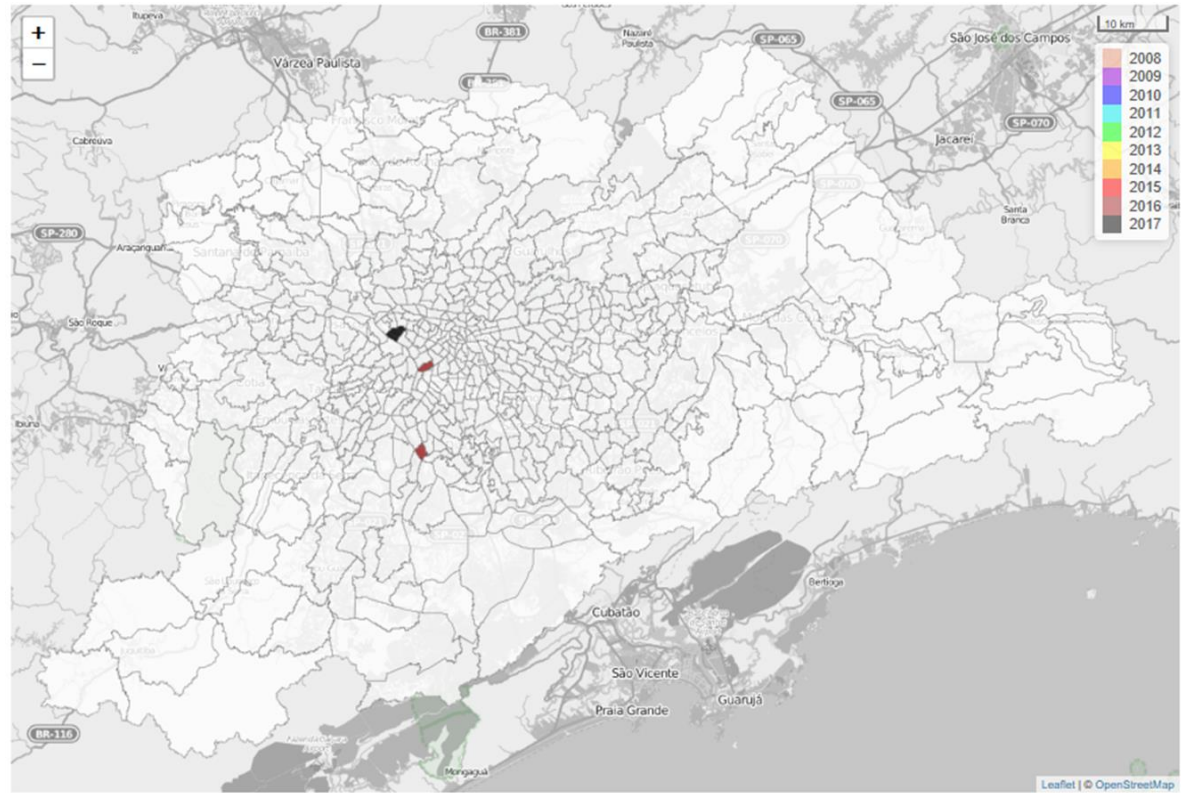


Figura C.31: Mapa da Região Metropolitana de São Paulo com ano de aumento da vegetação, considerando a variável NDVI (por região).

Região	Ano de perda da vegetação
Jardim Pinheiros / Jardim da Represa	2009
Mananciais - Norte do Rodoanel	2009
Ribeirão Itaqui	2009
Jardim Belval	2011
Paraisópolis	2011
Polvilho	2011
Sertãozinho - Mauá	2011
Ribeirão das Pombas	2012
Cajamar	2013

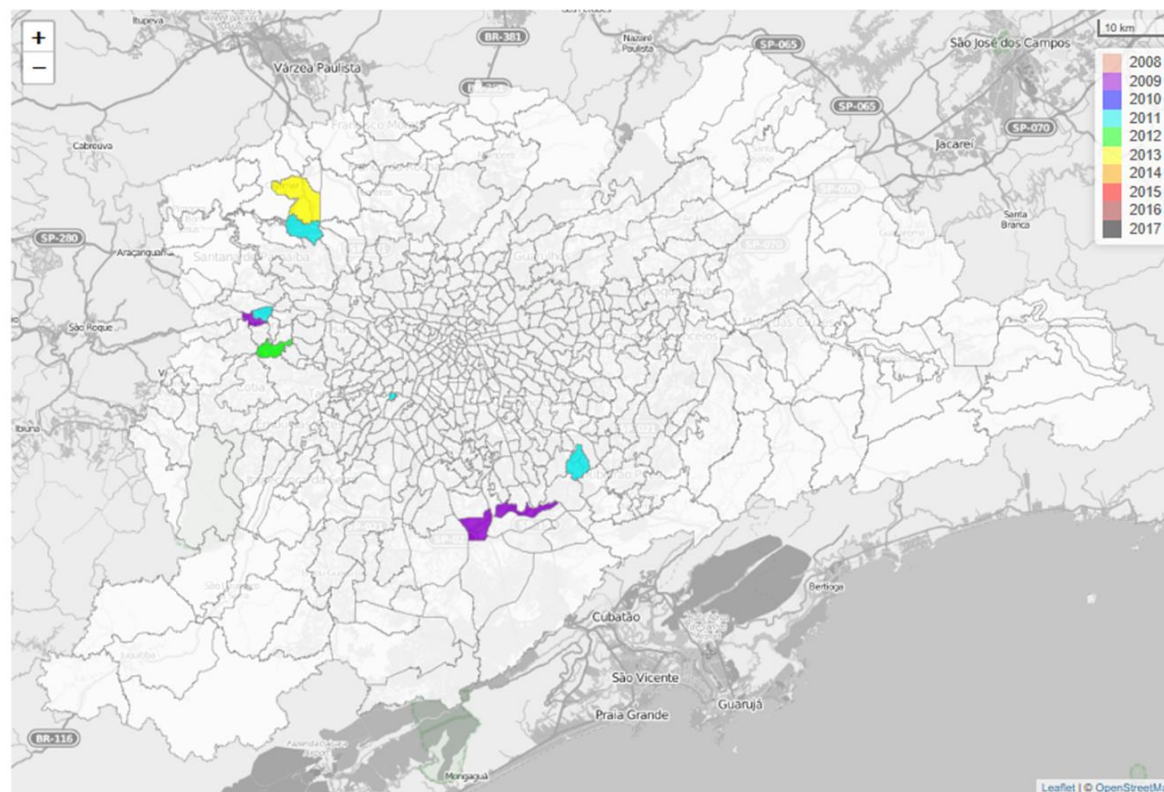


Figura C.32: Mapa da Região Metropolitana de São Paulo com ano de perda da vegetação, considerando a variável NDVI (por região).