
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
(BIOLOGIA VEGETAL)**

**INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS SOBRE A FENOLOGIA DE
ESPÉCIES ARBÓREAS EM ÁREAS URBANAS**

MILENE AMÂNCIO ALVES EIGENHEER

Dissertação apresentada ao Instituto de Biociências do Câmpus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Biológicas (Biologia Vegetal).

Agosto - 2013

MILENE AMÂNCIO ALVES EIGENHEER

**INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS SOBRE A
FENOLOGIA DE ESPÉCIES ARBÓREAS EM ÁREAS URBANAS**

Dissertação apresentada ao Instituto de
Biociências do Câmpus de Rio Claro da
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho”, como requisito para
obtenção do grau de Mestre em Ciências
Biológicas (Biologia Vegetal)

Orientadora: Leonor Patrícia
Cerdeira Morellato

Co-orientador: Milton Cezar Ribeiro

Rio Claro-SP
2013

581.5 Eigenheer, Milene Amâncio Alves
E342i Influência de variáveis meteorológicas sobre a fenologia
de espécies arbóreas em áreas urbanas / Milene Amâncio
Alves Eigenheer. - Rio Claro, 2013
95 f. : il., figs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Biociências de Rio Claro
Orientador: Leonor Patrícia Cerdeira Morellato
Coorientador: Milton Cezar Ribeiro

1. Ecologia vegetal. 2. Vegetação urbana. 3. Ilhas de calor.
4. Análise da paisagem. 5. Mudanças climáticas. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO


TÍTULO: ANÁLISE DO CLIMA URBANO DE CAMPINAS-SP E DA SUA RELAÇÃO COM A FENOLOGIA DE ESPÉCIES VEGETAIS

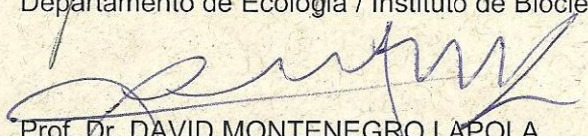
AUTORA: MILENE AMANCIO ALVES EIGENHEER

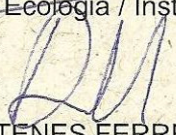
ORIENTADORA: Profa. Dra. LEONOR PATRÍCIA CERDEIRA MORELLATO

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. MILTON CEZAR RIBEIRO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS (BIOLOGIA VEGETAL) , pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. MILTON CEZAR RIBEIRO
Departamento de Ecologia / Instituto de Biociências de Rio Claro/UNESP


Prof. Dr. DAVID MONTENEGRO LAPOLA
Departamento de Ecologia / Instituto de Biociências de Rio Claro/UNESP


Prof. Dr. DEMÓSTENES FERREIRA DA SILVA FILHO
Depto de Ciências Florestais/ESALQ/Piracicaba

Data da realização: 28 de junho de 2013.

TÍTULO ALTERADO PARA: Influência de variáveis meteorológicas sobre a fenologia de espécies arbóreas em áreas urbanas.

Dedico essa dissertação ao meu melhor amigo e maior companheiro

André Eigenheer

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa de São Paulo (FAPESP) pela Bolsa Regular de Mestrado (Processo 2011/05032-2) e pela Bolsa Estágio de Pesquisa no Exterior (Processo 2012/06135-2). Também agradeço a CAPES/PROBAL (Processo 360/11) pelo auxílio financeiro concedido.

Agradeço a minha orientadora Dra. Patrícia Morellato, que tem acompanhado meu desenvolvimento acadêmico a mais de cinco anos. Obrigada pela orientação, carinho e paciência, tem sido muito bom trabalhar com você.

Agradeço ao meu co-orientador Dr. Milton Cezar Ribeiro, que foi um presente na minha vida acadêmica. Obrigada pela orientação, carinho e por todas as horas despendidas para o desenvolvimento dessa dissertação. E claro, obrigada a sua esposa e filhos (Keila, Camilo e Nicolas) por terem me emprestado o Miltinho em horários bizarros.

Agradeço a Professora Dra. Annette Menzel e a toda a sua equipe, especialmente Susanne Jochner e Christian Schleip por terem me recebido no Laboratório de Ecoclimatologia da Technische Universität München (TUM) para um período de estágio de pesquisa no exterior. O aprendizado, os campos e a bela paisagem alemã são coisas que eu guardarei para sempre.

Agradeço ao Laboratório de Fenologia que tem me ensinado como trabalhar em equipe é mais produtivo e divertido. Vocês são demais! Obrigada pelas experiências trocadas, pelos risos e pelas lágrimas. Agradeço ao Laboratório de Ecologia Espacial e Conservação (LEEC) que tem me ajudado em todas as análises, e sido grandes companheiros para todas as horas. Fico muito feliz por fazer parte desse time!

Agradeço também a todos os funcionários, professores e amigos da UNESP que direta ou indiretamente afetaram e influenciaram a minha vida nesses últimos anos, em especial aos professores Reinaldo Monteiro, Massanori Takaki, Alessandra Fidelis e Alessandra Coan e a queridíssima secretária da Botânica, Célia Hebling. Obrigada a todos os amigos que caminharam junto comigo e estavam aí pro que desse e viesse, em especial a Paula Montagnana, Clarissa Morita, Bianca Nadai, Gabi Camargo, Natalia Costa, Nathalia Miranda, Bruna Alberton, Luís Felipe Daibes, Elaine Lopes, Mayra Eichenberg, Camila Kissman, Shirley Silva, Renata Muylaert e Natalia Stefanini. Obrigada também aos que não estavam exatamente por perto, mas que estiveram muito presentes e me apoiando: Mariana Furlan, Claudia Arnecke, Simone Arnecke, Wanderson Santos, Regina Cypriano, Natalia Thompson e Alessa Flores. E um obrigada mais que especial ao Hélio Hoshina!

Agradeço aos “urban heat island drivers”: Amanda Batista, Fernanda Zambonini e Yuri Brenninkmeijer. Vocês foram os melhores ajudantes de campo que eu poderia pedir e esse trabalho existe graças à ajuda de vocês. Obrigada pelo companheirismo, pelas conversas e pelos pastéis. Vocês sempre terão um lugar no meu coração. Obrigada também a todos que em algum momento me ajudaram em campo (Pedro Miguel, Antonio Farias, Luís Felipe Daibes, Lucia Bonci, Sean Hieda e Nara Vogado).

Um obrigada especial as minhas irmãzinhas não sanguíneas: Mariana Diniz, você é incrível, obrigada por me apoiar sempre; Nara Vogado, você é um doce e muito especial, obrigada por todas a ajuda acadêmica e não acadêmica nesse período e; Eliana Gressler, uma das pessoas mais gentis e fofas que eu conheço, obrigada por todo o companheirismo e diversão, guria! Vocês são três das pessoas mais importantes da minha vida e eu amo vocês de verdade!

Agradeço a minha família que sempre me apoiou nas minhas escolhas, em especial a São Pedro e Santa Nice (meus pais) que me quebraram um milhão de galhos durante o desenvolvimento da dissertação. Obrigada a meus irmãos e cunhadas Junior, Luciano, Fabiana e Kedmann por estarem sempre dispostos a me ouvir e dar seus preciosos conselhos. Obrigada aos meus sobrinhos queridos Mateus, Isabelli, Mariana e Bianca, que tanto tem colorido a minha vida e que eu amo mais do que posso explicar e pra sempre.

E por último, meu eterno agradecimento ao melhor ajudante de campo, construtor de tubos para equipamentos, colocador de logger, psicólogo nas horas vagas, ecólogo não diplomado, melhor amigo e marido dos sonhos: André Eigenheer. Te amo muito e mais ainda! Essa dissertação é sua filha também! Sinta-se Mestre junto comigo.

E que venham mais quatro anos!



Watterson, 1996

Resumo

Ilha de calor é o nome dado ao fenômeno em que determinadas regiões da cidade ficam mais quentes que as áreas de entorno, o que ocorre devido a alterações físicas no meio urbano. O estudo da fenologia urbana é um excelente indicador dos efeitos das ilhas de calor e do potencial impacto de mudanças climáticas nas plantas; mas são raros em ambientes tropicais. Esta dissertação tem como objetivo estudar a existência de ilhas de calor afetando a fenologia de árvores em ambientes urbanos tropicais, procurando explicar: (i) qual o efeito das ilhas de calor sobre a fenologia de três espécies arbóreas em uma cidade tropical; (ii) desenvolver e testar uma nova metodologia de análise da paisagem urbana tropical e; (iii) verificar se a região estudada passou por algum momento de mudança em suas séries históricas de temperatura e umidade; e compreender se esta mudança está relacionada a uma alteração global ou local. No capítulo 1 verificamos que *Tipuana tipu* é uma excelente indicadora de alterações climáticas em meio urbano tropical, mas mudanças fenológicas são mais acentuadas e marcantes em cidades temperadas. No capítulo 2 propomos uma nova metodologia para estudos de fenologia e clima urbano, que levem em conta diversos aspectos da paisagem das cidades. No capítulo 3 observamos que a região da área de estudo sofreu diversas mudanças no clima urbano em caráter regional, não ligadas a mudanças climáticas globais, mas ao processo de urbanização.

Palavras chave: Fenologia, Ilhas de calor, Análise da paisagem, Mudanças climáticas.

Abstract

Urban heat island is the name of the phenomenon describing that certain areas of a city become warmer than the surroundings due to physical changes on the urban environment. The study of urban phenology is an excellent indicator of the effects of urban heat islands and allow to access the potential impacts of climate change on plants. However, studies on urban phenology related to heat island effects are rare for tropical cities. The present thesis aims to study the occurrence of urban heat islands affecting the phenology of tropical trees in urban tropical environments seeking to explain: (i) what is the effect of urban heat islands on the phenology of three tree species in a tropical city comparing to a temperate city, (ii) develop and test a new methodology for analyzing the tropical urban landscape and (iii) verify if the study region has undergone changes in the time series of temperature and humidity, and understand if this change is related to a global or local factors. In chapter 1 we verified that *Tipuana tipu* is an excellent indicator of climate alterations in tropical urban areas, but phenology changes are stronger in temperate cities. In Chapter 2 we propose a new methodology for the study of urban climate and phenology, which take into account various aspects of the landscape of cities. In chapter 3 we observe that the region of the study area presented several changes in urban climate in a regional aspect, not related to global climate changes but the local history of urbanization.

Keywords: Phenology, Urban heat islands, Landscape analysis, Climate change.

SUMÁRIO

Introdução Geral	12
Bibliografia:	15
Capítulo 1	18
Abstract.....	19
1. Introduction	20
2. Data and methods	22
2.1. Study area.....	22
2.1.1. Geographical location	22
2.1.2. Climate (1971–2000).....	23
2.2. Phenological observations.....	24
2.2.1. Selected plants.....	24
2.2.2. Observation methods.....	25
2.2.3. Meteorological measurements.....	25
2.2.4. Auxiliary data.....	26
2.2.5. Statistical methods.....	26
3. Results	27
3.1. Climate	27
3.2. Phenological onset dates in 2011	30
3.3. Explanatory variables in urban phenology	32
4. Discussion.....	36
4.1. UHI effect.....	36
4.2. Urban–rural differences in phenology.....	36
4.3. Air temperature, humidity and the phenology of trees in urban areas	37
5. Conclusions	38
Capítulo 2	45
Resumo	46
1. Introdução.....	47
2. Métodos	49
2.1. Área de estudo.....	49
2.2. Clima	49
2.3. Espécies estudadas	49
2.4. Fenologia.....	50
2.5. Medidas meteorológicas.....	51

2.6.	Análises	51
2.6.1.	Mapeamento	52
2.6.2.	Análises na escala da paisagem em múltiplas escalas.....	53
2.7.	Análises Estatísticas	54
3.	Resultados.....	54
4.	Discussão e considerações finais.....	62
5.	Bibliografia.....	64
	Material Suplementar Online.....	67
Capítulo 3	74
	Resumo.....	75
1.	Introdução	76
2.	Material e Métodos.....	77
2.1.	Área de estudo.....	77
2.2.	Análises estatísticas.....	79
3.	Resultados.....	80
4.	Discussão e Conclusões.....	83
5.	Referências Bibliográficas.....	86
	Material Suplementar Online.....	89
Considerações Finais	95

Introdução Geral

Ilha de calor é o nome dado ao fenômeno em que determinadas regiões da cidade ficam mais quentes que as áreas de entorno (Monteiro 1976, Oke 1978, Lombardo 1985) e é resultado da interação entre diversos fatores humanos, ambientais, econômicos e sociais, como a localização geográfica das cidades, as condições climatológicas do dia, o tamanho da cidade, a densidade da população, a cultura local, entre outros (Bristow e Mullens, 1995, Monteiro e Mendonça, 2003). O uso e ocupação dos solos urbanos é um dos principais fatores causadores e intensificadores das ilhas de calor urbano, uma vez que as propriedades térmicas dos materiais que compõe a superfície do solo em áreas urbanas são capazes de modificar as variáveis microclimáticas, definindo claramente a fronteira com as áreas de entorno (Perez et al. 2001). O aumento da temperatura nas regiões centrais das cidades ocorre principalmente devido às alterações do meio físico, como a predominância de materiais como concreto e asfalto no solo urbano, a alteração da rugosidade urbana causada pela verticalização das edificações e a ausências de reguladores térmicos, como áreas verdes e corpos d'água (Lombardo 1985, Ayoade 1991, Tavares e Lastória, 1994).

Essas alterações afetam o balanço de energia do sistema cidade-atmosfera (Perez et al. 2001; Monteiro e Mendonça, 2003). Devido à impermeabilização do solo que impede a absorção de água e da redução das áreas úmidas e produtoras de umidade nas áreas urbanas, apenas uma pequena parcela da radiação que chega a superfície terrestre é utilizada para evaporação (calor latente) e a maior parte dessa radiação é utilizada para aquecer a terra e o ar diretamente (calor sensível), gerando maior aquecimento superficial do ar, contribuindo grandemente na formação das ilhas de calor (Perez et al. 2001, Gedzelman et al. 2003).

Áreas urbanas com ilhas de calor podem ser consideradas similares a situações de mudanças climáticas (Ziska et al. 2003), permitindo estudos e experimentos que prevêem a resposta de diversos organismos e sistemas a esse tipo de alteração. A fenologia, que é o estudo da temporalidade de eventos biológicos cíclicos e a sua relação com os meios biótico e abiótico (Lieth 1974, Morellato & Leitão-Filho 1990), tem sido um indicador de alta sensibilidade a possíveis efeitos de mudanças climáticas (Peñuelas et al. 2004, Williams e Abberton 2004). Estudos em regiões temperadas indicam uma clara relação entre ilhas de calor e fenologia, sendo que o aumento da temperatura aparece como a principal variável climática influenciadora no desencadeamento das fenofases (Roetzer et al. 2000, Defila & Clot 2001, Luo et al. 2007, Mimet et al. 2009). Sendo assim, a fenologia realizada em áreas com ilhas de calor é um excelente modelo de previsão dos impactos de possíveis mudanças

climáticas no desenvolvimento de plantas (Ziska et al. 2003, Luo et al. 2007, Mimet et al. 2009).

Neste contexto, estudos de fenologia em cidades de regiões temperadas da Europa (e.g. Zacharias, 1972; Baumgartner et al., 1984; Bernhofer, 1991; Lakatos and Gulyas, 2003; Mimet et al., 2009; Jochner et al., 2011; Jochner et al., 2012), da América do Norte (e.g. White et al., 2002; Zhang et al., 2004) e da Ásia (e.g. Omoto and Aono, 1990; Lu et al., 2006; Luo et al., 2007; Jeong et al., 2011) têm mostrado um florescimento antecipado na presença de ilhas de calor em relação às áreas de entorno. Entretanto, estudos de fenologia em ambientes urbanos tropicais são raros (e.g. Gazal et al., 2008) e pouco se sabe sobre como a fenologia de árvores tropicais é influenciada por essas diferenças de temperatura.

Esta dissertação tem como objetivo estudar a existência de ilhas de calor afetando a fenologia de árvores em ambientes urbanos tropicais, procurando explicar: (i) qual o efeito das ilhas de calor sobre a fenologia de três espécies arbóreas em uma cidade tropical; (ii) criar e testar uma nova metodologia de análise da paisagem urbana tropical e; (iii) verificar se a região estudada passou por algum momento de mudança em suas séries históricas de temperatura e umidade; e compreender se esta mudança está relacionada a uma alteração global ou local.

Este estudo será apresentado em três capítulos que pretendem contribuir para o entendimento da relação entre urbanização e seus efeitos no clima e na fenologia de espécies tropicais:

Capítulo 1 - Using phenology to assess urban heat islands in tropical and temperate regions – neste artigo avaliamos e comparamos a presença de ilhas de calor e seus efeitos sobre a fenologia de espécies em uma cidade de clima temperado (Munique) e uma de clima tropical (Campinas)

Capítulo 2 – Proposta de avaliação da urbanização aplicada a estudos fenológicos e de clima urbano em cidades tropicais – neste capítulo propomos uma nova maneira de avaliar a urbanização em cidades tropicais, utilizando vários aspectos da paisagem em diversas escalas possam explicar os padrões de clima urbano e fenologia.

Capítulo 3 – Detecção de mudança em séries históricas de temperatura através de análises bayesianas – neste capítulo analisamos séries históricas de temperatura e precipitação de cinco cidades de uma mesma região através de técnicas bayesianas. Nosso principal objetivo foi identificar a presença de mudanças nas séries, quando elas ocorreram e a causa dessas mudanças ao longo do tempo.

Bibliografia:

Alberti, M.; Marzluff, J. M.; Shulenberger, E.; Bradley, G.; Ryan, C.; Zumbrennen, C. 2003. Integrating Humans into Ecology: Opportunities and Challenges for Studying Urban Ecosystems. **BioScience**, 53:1169-1179.

Ayoade, J. O. 1991. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 3. ed. Rio de Janeiro, Ed. Bertrand.

Bristow, R. S.; Mullens, J. B. 1995. Environmental geography education: urban heat islands. **Geography and Regional Planning**, Westfield.

Conti, J. B. **Clima e meio ambiente**. 4. ed. São Paulo, Ed. Atual, 1998.

Corte, V. B.; Borges, E. E. L.; Ventrella, M. C.; Leite ITA, Braga AJT. 2008. Histochemical aspects of reserves mobilization of *Caesalpinia peltophoroides* (Leguminosae) seeds during germination and seedlings early growth. **Revista Árvore** 32: 641–650.

Defila, C.; Clot, B. 2001. Phytophenological trends in Switzerland. **Inter J Biometeorol**, 45:203-207.

Gazal, R.; White, M. A.; Gillies, R.; Rodemaker, E.; Sparrow, E.; Gordon, L. 2008. GLOBE students, teachers, and scientists demonstrate variable differences between urban and rural leaf phenology. **Global Change Biology** 14: 1568–1580.

Gedzelman, S. D.; Austin, S.; Cermak, R.; Stefano, N.; Partridge, S.; Quesenberry, S.; Robinson, D. A. 2003. Mesoscale aspects of the Urban Heat Island around New York City. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 75, p. 29–42.

Jeong, J. H.; Ho, C. H.; Linderholm, H. W.; Jeong, S. J.; Chen, D.; Choi, Y. S. 2011. Impact of urban warming on earlier spring flowering in Korea. **International Journal of Climatology** 31: 1488–1497.

Jochner, S.; Beck, I.; Behrendt, H.; Traidl-Hoffmann, C.; Menzel, A. 2011. Effects of extreme spring temperatures on urban phenology and pollen production: a case study in Munich and Ingolstadt. **Climate Research** 49: 101–112.

Jochner, S.; Sparks, T. H.; Estrella, N.; Menzel, A. 2012. The influence of altitude and urbanisation on trends and mean dates in phenology (1980–2009). *International Journal of Biometeorology* 56: 387–394

Jochner, S.; Alves-Eigenheer, M. A.; Menzel, A.; Morellato, L. P. C. 2013. Using phenology to assess urban heat islands in tropical and temperate regions. **Int. J. Climatol.** *Online first*. DOI: 10.1002/joc.3651.

Lieth, H. 1974. Introduction to phenology and the modeling of seasonality. *In: Phenology and seasonality modeling* (H. Lieth). Berlin-Springer-Verlag, New York, p.3-19.

Lombardo, M. A. **Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo, Ed. Hucitec. 1985.

Lu P., Yu Q., Liu J., Lee X. 2006. Advance of tree-flowering dates in response to urban climate change. **Agricultural and Forest Meteorology** 138: 120–131.

Luo, Z.; Sun, O. J.; Ge, Q.; Xu, W.; Zheng, J. 2007. Phenological responses of plants to climate change in an urban environment. **Ecological Research** 22: 507–514

Menzel, A.; Sparks, T. H.; Estrella, N.; Koch, E.; Aasa, A.; Ahas, R.; Alm-Kubler, K.; Bissoli, P.; Braslavka, O.; Briede, A.; Chmielewski, F. M. Crepinsek, Z.; Curnel, Y.; Dahl, A.; Defila, C.; Donnelly, A.; Filella, Y.; Jatczak, K.; Mage, F.; Mestre, A.; Nordli, O.; Peñuelas, J.; Pirinen, P.; Remisová, V.; Scheifinger, H.; Striz, M.; Susnik, A.; van Vliet, A. J. H.; Wielgolaski, F. E.; Zach, S.; Zust, A. 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. **Global Change Biology** 12: 1969–1976.

Mimet, A.; Pellissier, V.; Quénot, H.; Aguejedad, R.; Dubreuil, V.; Rozé, F. 2009. Urbanisation Induces Early Flowering: Evidence from *Platanus Acerifolia* and *Prunus Cerasus*. **Inter J Biometeorol**, v. 53, p. 287-298.

Monteiro, C. A. F. 1976. **Teoria e Clima Urbano**. São Paulo: Série teses e monografias, 25.

Monteiro, C. A. F.; Mendonça, F. 2003. **Clima Urbano**. São Paulo: Editora Contexto.

Morellato, L. P. C. & Leitão-Filho, H. F. 1990. Estratégias fenológicas de espécies arbóreas em floresta mesófila na Serra do Japi, Jundiá, São Paulo. **Revista Brasileira de Biologia** 50:163-173.

Oke, T. R. 1978. **Boundary Layer Climates**. London: Methuem & Ltd. A. Halsted Press Book, John Wiley & Sons, New York.

Omoto, Y.; Aono, Y. 1990. Estimation of change in blooming dates of cherry flower by urban warming. **Journal of Agricultural Meteorology** 46: 123–129.

Peñuelas, J.; Filella, I.; Zhang X. Y.; Llorens, L.; Ogaya, R.; Lloret, F.; Comas, P.; Estiarte, M.; Terradas, J. 2004. Complex spatiotemporal phenological shifts as a response to rainfall changes. **New Phytologist** 161:837–846.

Perez, J.C.; Sánchez, M. A.V.; Barradas, V. L. 2001. Clima, urbanización y uso del suelo en ciudades tropicales de Mexico. **Red Nacional de Investigación Urbana**, Puebla, México, Ciudades 51.

Roetzer, T.; Wittenzeller, M.; Haeckel, H; Nekovar, J. 2000. Phenology in central Europe – differences and trends of spring phenophases in urban and rural areas. **Inter J Biometeorol**, v. 44, n. 2, p. 60-66.

Tavares, A. C.; Lastória, A. C. Comparações entre temperaturas extremas obtidas no centro e na periferia de Piracicaba-SP. **Geografia**, Rio Claro, v. 19, n. 1, p. 61-75. 1994.

Zhang X., Friedl M. A., Schaaf C. B., Strahler A. H., Schneider A. 2004. The footprint of urban climates on vegetations phenology. **Geophysical Research Letters** 31: L12209. DOI: 10.1029/2004GL020137.

Ziska L. H., Gebhard D. E., Frenz D. A., Faulkner S., Singer B. D., Straka J. G. 2003. Cities as harbingers of climate change: common ragweed, urbanization, and public health. **The Journal of Allergy and Clinical Immunology** 111: 290–295.

White, M. A.; Ramakrishna, R.; Nemani, R.; Thornton, P. E.; Running, S. W. 2002. Satellite evidence of phenological differences between urbanised and rural areas of the eastern United States deciduous broadleaf forest. **Ecosystems** 5: 260–277.

Williams, T. A.; Abberton, M. T. 2004. Earlier flowering between 1962 and 2002 in agricultural varieties of white clover. **Oecologia** 138:122–126.

Using phenology to assess urban heat islands in tropical and temperate regions

Susanne Jochner¹, Milene Alves-Eigenheer², Annette Menzel¹ and Leonor Patrícia C. Morellato²

¹ Department of Ecology and Ecosystem Management, Ecoclimatology, Technische Universität München, Freising, Germany

² Departamento de Botânica, Laboratório de Fenologia, Plant Phenology and Seed Dispersal Group, Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro (SP), Brazil

Trabalho publicado no International Journal of Climatology (Online first) - DOI: 10.1002/joc.3651

ABSTRACT: The study of urban phenology is relevant to assess the effects of heat islands and the potential impacts of climate change on plants. Temperature is the main factor regulating plant development in moist/temperate regions. However, plants in tropical cities may respond to additional environmental cues, such as air humidity. We examined whether differences in air temperature and humidity along an urban–rural gradient influenced phenological onset dates of trees in a temperate mid-latitude city (Munich, Germany) and a city in the neotropics (Campinas, Brazil). (Dis)similarities were identified incorporating equivalent study design based on identical methods for recording phenology and site-specific meteorological data. We found that phenological onset dates of silver birch (*Betula pendula*) were able to describe local temperature variations in Munich. Correlation coefficients between mean temperature and onset dates of *Betula* were significant and varied between $r=-0.48$ and $r=-0.72$. However, onset dates for yellow trumpet tree (*Tabebuia chrysotricha*), false Brazilwood (*Caesalpinia peltophoroides*) and rosewood (*Tipuana tipu*) in Campinas were rather variable, and the magnitude and significance of correlation coefficients with temperature varied greatly among species/phenophases. Nevertheless, we detected significant correlations, especially between *Tipuana* phenophases and temperature and between leaf unfolding of *Tabebuia* and humidity. Our findings revealed that the phenology of *Tipuana* was sufficiently sensitive to detect urban heat island effects in Campinas and might be a useful indicator of temperature variations and, in turn, of global warming. Because *Tipuana* is widely used for urban arborization in South America, we foresee many applications for monitoring heat islands in the neotropics. Furthermore, the fact that most phenophases of *Tabebuia* were not responsive to temperature stressed the importance of humidity variables. Additional species and phenophases should be explored to identify the further potential of phenology for monitoring heat islands in tropical cities.

KEY WORDS: BBCH; Brazil; Germany; humidity; phenology; temperature; urban climate

1. Introduction

Since Howard (1833) published the first study about the urban heat island (UHI) in London, this phenomenon has gained considerable interest among meteorologists (Kratzer, 1937; Chandler, 1964; Oke, 1976; Landsberg, 1981). The examination of the UHI effect and associated aspects is still relevant and important (McCarthy *et al.*, 2010; Oleson *et al.*, 2010), especially because an increasing percentage of the world population – particularly in the tropics – live in (mega)cities (Roth, 2007; Grimm *et al.*, 2008) or are regular visitors to urban areas for *inter alia* employment or social/recreational reasons.

The major cause of the development of the UHI is the substitution of the natural environment by built-up and sealed areas (Landsberg, 1981). The construction material used in cities (e.g. concrete and asphalt) does not allow water to penetrate into the soil. Additionally, a high proportion of the incident shortwave radiation is absorbed and transformed into sensible heat (Landsberg, 1981). In particular, the three-dimensional urban design with tall buildings, high building density and narrow streets promotes the absorption of a high fraction of radiation (Landsberg, 1981; Oke, 1987). In contrast, vegetated urban areas represent cooler spots through evaporation processes (Upmanis *et al.*, 1998; Shustack *et al.*, 2009). Another factor that contributes to the UHI is the anthropogenic emission of sensible heat as well as moisture associated with energy consumption (Sailor, 2011). Urban air pollutants do have an effect not only on air quality and therefore on human health (Davidson *et al.*, 2005; Kampa and Castanas, 2008) but also on urban energy fluxes (Landsberg, 1981). Particulates scatter and absorb incoming solar radiation leading to a reduction of direct radiation and a higher amount of diffuse radiation (Landsberg, 1981; Kuttler, 2004). In addition, absorption and reemission by infrared active gases and aerosols increase downward longwave atmospheric radiation (Kuttler, 2004).

Urban climate studies have been conducted far less in (sub)tropical areas compared with temperate regions (Roth, 2007). In general, the UHI intensity is less pronounced in sub(tropical) compared with temperate cities, whereas highest urban–rural temperature differences are observed in the dry season. In temperate cities the UHI is more pronounced in the winter season and during night (Landsberg, 1981; Baker *et al.*, 2002; Mimet *et al.*, 2009; Shustack *et al.*, 2009).

In phenological research, cities represent important study areas because their warmer conditions allow an assessment of the potential future impacts of climate change on plant development. Therefore, urban areas can be used as a surrogate or experimental treatment for

future global warming (Ziska *et al.*, 2003; Luo *et al.*, 2007; Mimet *et al.*, 2009). This application is related to one of the original purposes of urban phenology: detecting UHI effects. The use of phenological observations in urban areas for assessing microclimatic conditions has a long tradition in temperate regions. There are plenty of studies dealing with plant development in urban areas of Europe (e.g. Zacharias, 1972; Baumgartner *et al.*, 1984; Bernhofer, 1991; Lakatos and Gulyás, 2003; Mimet *et al.*, 2009; Jochner *et al.*, 2011; Jochner *et al.*, 2012a), North America (e.g. White *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2004) and Asia (e.g. Omoto and Aono, 1990; Lu *et al.*, 2006; Luo *et al.*, 2007; Jeong *et al.*, 2011).

These studies clearly reveal that plants growing in temperate cities flower earlier than plants in rural areas because of higher local temperatures. However, urban phenology studies in tropical cities are rare (e.g. Gazal *et al.*, 2008) and absent in the neotropics. There is still a lack of understanding of how the phenology of tropical tree species is influenced by temperature, e.g. whether there is a temperature threshold for plant activity under warm tropical climates (Clark, 2007; Colwell *et al.*, 2008). Moreover, phenology in tropical trees is generally considered to be water or light limited (Morellato *et al.*, 2000; Borchert *et al.*, 2002; Singh and Kushwaha, 2005; Staggemeier and Morellato, 2011). There are suggestions that climate-driven models are not applicable for predicting plant phenology in the tropics (Borchert *et al.*, 2005; Gazal *et al.*, 2008) and that phenology in tropical biomes may fail to be a useful indicator of global warming (Borchert *et al.*, 2005). Does this in turn also apply for the estimation of temperature distributions at the local scale?

This study incorporated one temperate mid-latitude city (Munich, Germany) and one tropical city (Campinas, Brazil) of almost the same size, in each of which a broad-scale network was installed measuring air temperature and humidity at the observed sites. Using consistent phenological observation methods, an equivalent study design and meteorological data collection, we address these major research questions:

1. Do the two cities show distinctive UHI effects?
2. How suitable are the selected phenophases and species – especially in the tropics – for detecting differences in urban–rural temperature at the local scale?
3. Are the urban index, an estimate for the degree of urbanization, as well as relative and absolute humidity valuable explanatory variables in urban phenology?

2. Data and methods

2.1. Study area

2.1.1. Geographical location

Campinas ($22^{\circ} 54' S$, $47^{\circ} 3' W$) is located in the Piracicaba river basin in the state of São Paulo, Brazil (Figure 1), on a plateau at about 685 m altitude, near to the Serra do Japi mountains. Munich ($48^{\circ} 8' N$, $11^{\circ} 35' E$) is located in southern Bavaria, Germany (Figure 1), on the Isar river north of the Bavarian Alps at an altitude of around 515 m. Population sizes are 1.38 million (Munich) and 1.08 million inhabitants (Campinas). However, the cities' structures differ considerably. Although Campinas' inner city is dominated by numerous multi-storey buildings, Munich's architecture is characterized by only a few tall buildings higher than 100 m. Conversely, a number of green open areas can be found in both cities. For details of land use, see Figure 2.

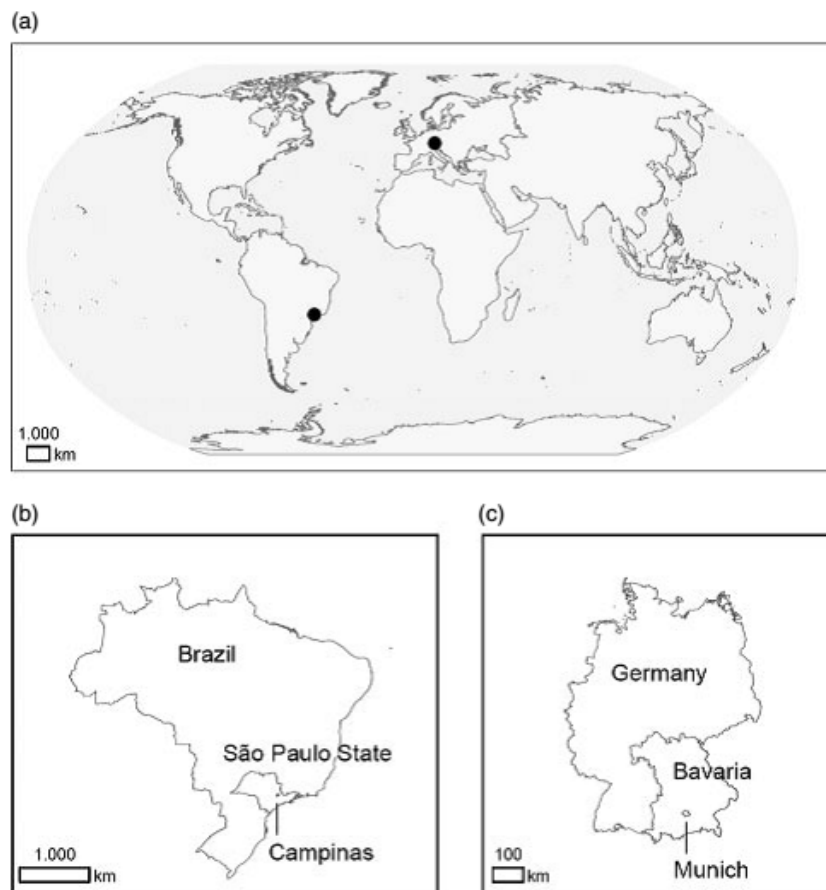


Figure 1. Location of (a) the study sites (black dots) in Brazil and Germany, (b) Campinas ($22^{\circ} 54' S$, $47^{\circ} 3' W$), São Paulo State, Brazil and (c) Munich ($48^{\circ} 8' N$, $11^{\circ} 35' E$), Bavaria, Germany (country boundaries: ESRI, 2011).

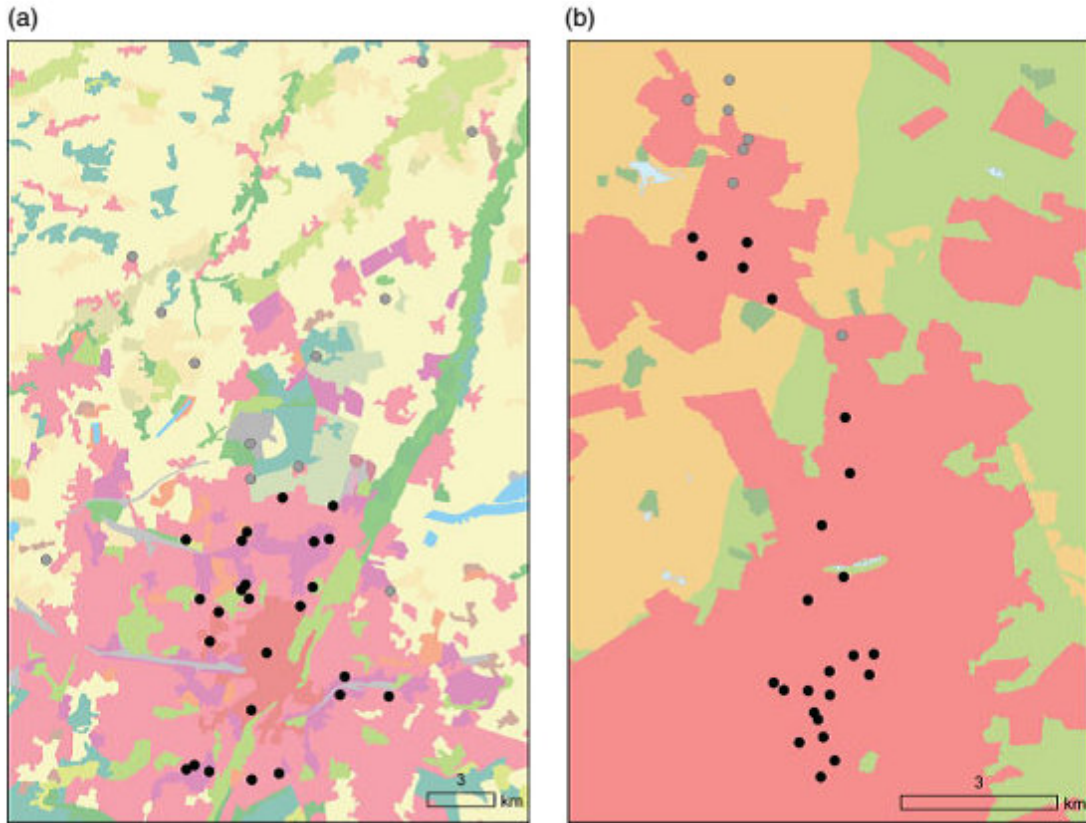


Figure 2. The cities of (a) Campinas, background: land cover (INPE, Brazilian National Institute for Space Research, Vieira *et al.*, 2010, see also: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/36QPBO5>), major classes: red=urban fabric, orange=sugar cane, light green=pasture and dark green=eucalyptus forest remnants, and (b) Munich, Germany, background: land cover (CORINE Land Cover 2006, EEA, 2010, see also: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2006-raster> for a complete legend), major classes: red=urban fabric, green=forest and pastures, yellow=arable land and blue=rivers and lakes. Black and grey dots represent the studied urban and rural sites within each city, respectively.

2.1.2. Climate (1971–2000)

Campinas has a seasonal tropical climate (Koppen type Cwa); it is characterized by a warm and wet season from October to March and a cold and comparably drier season from April to September, and an annual mean precipitation of 1410 mm. During the dry season, only 25% of the annual rainfall is received and the average precipitation during the driest month (August) is 33 mm. Maximum mean monthly rainfall occurs in January (250 mm).

Mean annual temperature is 21.9° C (minimum in June: 18.4° C and maximum in February: 24.6° C) (data source: IAC, Instituto Agronômico).

Munich is characterized by a warm temperate climate (Koppen type Cfb). The annual mean temperature is 9.5° C with an average of 0.3° C in the coldest month (January) and 18.9° C in the warmest month (July). Annual precipitation averages 954 mm, with most of the rain occurring during summer and a maximum of 125 mm in July. The winter is drier with a minimum of 46 mm in January (data source: DWD, German Meteorological Service).

2.2. Phenological observations

2.2.1. Selected plants

The Brazilian study was based on flowering and leaf unfolding of three different species. As the suitability of trees for urban climate studies in the tropics has not been investigated yet, we selected species that are abundant in urban areas: *Tabebuia chrysotricha* (Mart. Ex DC.) Standl., known as yellow trumpet tree or ipê, is a deciduous tropical tree species of the Bignoniaceae family and native to Brazil. It is the national flower of Brazil and often used as an ornamental tree in urban settlements, parks and along streets (Souza *et al.*, 2005). *Caesalpinia peltophoroides* Benth., also called sibipiruna or false Brazilwood, is a legume tree of the Fabaceae family. It originates from Brazil and is often used as an ornamental tree in cities (Corte *et al.*, 2008). *Tipuana tipu* (Benth.) Kuntze, commonly called tipu tree or racehorse tree, is a large deciduous to semi-deciduous tree belonging to the Fabaceae family and originates from Argentina and Bolivia. *Tipuana* is widely planted in urban areas, mainly in southern Brazil (dos Santos Pereira and de Aquino-Neto, 2003). Because rural areas outside Campinas are mostly occupied by sugar cane or pasture, these three tropical tree species are mainly restricted to settlements.

As opposed to the tropics, a greater knowledge exists about species that are suitable for detecting UHIs in temperate cities (Baumgartner, 1952; Bernhofer, 1991) and especially spring phenophases (leaf unfolding and flowering) were found to be most sensitive to temperature (Menzel *et al.*, 2006). For the German study area, we selected leaf unfolding and flowering of only one species, *Betula pendula* Roth (silver birch). It is a deciduous tree of the Betulaceae family and a pioneer plant that is widespread across Europe and can be frequently found both in urban and rural areas (Aas, 2000). Because of the allergenicity of its pollen, the tree has gained strong interest in studies related to phenology (Siljamo *et al.*, 2008; Jochner *et*

al., 2011), aerobiology (Emberlin *et al.*, 2002; Jochner *et al.*, 2012b) and medicine (Traidl-Hoffmann *et al.*, 2003; Bryce *et al.*, 2010).

2.2.2. Observation methods

The observation sites in both cities were chosen along urban–rural gradients within a ~100-m total elevation range to avoid altitudinal and associated temperature effects on phenology. The selection of sites was mainly based on the occurrence of trees (two to nine individuals required) and depended on, e.g. free accessibility or an authorization from the property owner. We observed 83 *Tabebuia* trees at 19 sites, 101 *Caesalpinia* trees at 28 sites and 68 *Tipuana* trees at 17 sites in Campinas (Figure 2(a)). In Munich, we observed 130 *Betula* trees at 38 sites (Figure 2(b)).

To ensure consistent phenological observation methods we used the BBCH code (Meier, 2001). Initially developed for development stages of agricultural plants by the Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt and Chemical industry, the extended BBCH scale for monocotyledonous and dicotyledonous plant species allows the assessment of not only principal growth stages (e.g. flowering and leaf unfolding) but also short developmental steps (sub-stages and secondary growth stages) that are passed successively within the development process (e.g. bud shows green tip, inflorescence or flower buds visible). In Section 3 for clarity, however, we only present the data for BBCH 61 (beginning of flowering: 10% of flowers open/emitting pollen), BBCH 65 (full flowering: >50% of flowers open/emitting pollen, first petals falling), BBCH 10 (mouse-ear stage: green leaf tips 10 mm above the bud scales) and BBCH 15 (>50% leaves unfolded).

Observations were carried out by only one person per city in order to reduce subjective variation in assessing BBCH development stages and were repeated every third day. The observation period in Munich lasted from the end of March to mid-April 2011 and in Campinas from mid-July to the beginning of October 2011.

2.2.3. Meteorological measurements

One individual tree per site (Campinas :n=31 and Munich: n=38) was equipped with an air temperature and humidity sensor (HOBO U23-001, Onset Computer Corporation, Southern MA, USA). The loggers were mounted in a radiation shield on tree trunks at 3 m height to minimize theft or vandalism because almost all sites were communal or municipal

and therefore open to the public. In both Munich and Campinas, one logger was stolen and not replaced during the observation period. Loggers were mounted on the northern (Munich) or southern (Campinas) side of trees. However, for security and safety reasons, about half of the loggers in Campinas could not be placed on this orientation prior to the end of September – until leaf unfolding progressed and acted as visual cover. To avoid possible problems, radiation shields were provided with slots allowing for ventilation and we additionally included mean nighttime temperatures in statistical analyses. Loggers in Campinas were sequentially installed: 18 in August, 28 in September and a further three loggers were mounted in October.

2.2.4. Auxiliary data

The sites in Munich were categorized as urban or rural using CORINE Land Cover (CLC) 2006 data (EEA, 2010) with a spatial resolution of 100 m. CLC data consist of 44 land cover classes, which were grouped into five main categories (artificial surfaces, agricultural areas, forest and semi-natural areas, wetlands and water bodies). Using ArcGIS 10 (ESRI, 2009, Redlands, CA, USA) we extracted particular elements of artificial surfaces (e.g. continuous and discontinuous urban fabric, industrial and commercial units) that are characterized by a high degree of impervious surfaces to create an ‘urban layer’. Because CLC data only cover European countries we applied land use data of the Brazilian National Institute for Space Research (INPE, Vieira *et al.*, 2010) with a spatial resolution of 30 m for Campinas and extracted areas that were already classified as “urban”.

Following Jochner *et al.* (2012a), we calculated an index describing the degree of urbanization (u_i =urban index) for each site using the proportion of urban land use within a radius of 2 km. The sites were classified as urban when the u_i -values were greater than 0.5, otherwise as rural. Black and grey dots in Figure 2(a) and (b) indicate the sites characterized as urban and rural, respectively.

2.2.5. Statistical methods

We derived daily mean and maximum temperatures (T_{mean} and T_{max}) as well as mean nighttime temperatures [T_{night} ; calculated using data from 6:00 pm to 6:00 am (Campinas) or 7:00 pm to 7:00 am (Munich)]. The diurnal temperature range (DTR) was calculated as the difference between the maximum temperature and the minimum temperature

of 1 d. In addition to relative humidity [RH (%)], we also included absolute humidity [a (g m^{-3})] calculated using Equations (1)–(3),

$$e = \text{RH} \times E / 100 \quad (1)$$

$$E = 6.1078 \times \text{EXP} [(17.0809 \times T) / (234.175 + T)] \quad (2)$$

$$a = e / [0.00462 \times (273 + T)] \quad (3)$$

where e is the water vapour pressure (hPa), RH is the relative humidity (%), E is the saturation water vapour pressure (hPa) and T is the temperature ($^{\circ}\text{C}$).

The overall range of meteorological variables (range) is the difference between the warmest and coldest/most humid and least humid station. We also calculated differences between urban and rural areas for meteorological and phenological data where positive temperature/moisture differences indicate higher temperatures/humidity in the city. The UHI effect refers to differences in urban and rural temperature. Negative phenological differences – called the urban phenology effect (UPE) – indicate an earlier onset in the city compared with the countryside and vice versa.

Air temperature, humidity and phenological data were tested for differences between urban and rural areas using two-sample t-tests. We calculated Pearson's correlations to examine relationships between phenological onset dates, the urban index and meteorological variables. We used temperature and humidity data of the months before mean onset of the respective phenophases (e.g. see missing cells in Table IV).

All statistical analyses were performed using SPSS Statistics 19 (IBM SPSS, Chicago, IL, USA).

3. Results

3.1. Climate

Table I shows meteorological data for urban and rural areas of Campinas in August and September 2011 and for Munich in March 2011. The UHI effect as shown by mean temperatures in Campinas was small and not significant for either month. The overall range of mean monthly temperatures showed little variation in August (0.9°C) and September (1.1°C). In both months differences between urban and rural areas were only significant for mean nighttime temperatures (0.7 and 0.6°C , respectively) and DTR (-1.7 and -1.9°C , respectively).

Table I. Mean temperature (°C), humidity variables and respective standard deviation between sites for selected months in urban and rural areas in Campinas (August=8 and September=9) and Munich (March=3) in 2011

	urban	rural	difference	overall	Range
CAMPINAS					
Tm8 (°C)	20.7 ± 0.3	20.5 ± 0.2	0.2	20.6 ± 0.3	0.9
Tm9 (°C)	21.6 ± 0.3	21.6 ± 0.3	0.0	21.6 ± 0.3	1.1
Tnight8 (°C)	18.6 ± 0.5	17.9 ± 0.5	0.7	18.4 ± 0.6	2.3
Tnight9 (°C)	19.2 ± 0.4	18.6 ± 0.5	0.6	19.0 ± 0.5	2.1
Tmax8 (°C)	26.1 ± 0.7	25.6 ± 0.5	0.5	25.9 ± 0.7	2.2
Tmax9 (°C)	27.1 ± 0.4	26.7 ± 0.7	0.4	27 ± 0.6	2.2
DTR8 (°C)	11.3 ± 1.0	13.0 ± 1.0	-1.7	11.8 ± 1.2	4.7
DTR9 (°C)	12.8 ± 0.9	14.7 ± 1.1	-1.9	13.4 ± 1.3	5.1
RH8 (%)	62.3 ± 2.3	64.2 ± 2.4	-1.9	62.9 ± 2.5	9.0
RH9 (%)	54.9 ± 1.8	56.8 ± 1.8	-1.9	55.5 ± 1.9	7.9
a8 (g m ⁻³)	10.7 ± 0.3	10.9 ± 0.3	-0.2	10.7 ± 0.3	0.9
a9 (g m ⁻³)	9.9 ± 0.2	10.1 ± 0.2	-0.2	9.9 ± 0.3	0.9
MUNICH					
Tm3 (°C)	6.1 ± 0.5	5.1 ± 0.4	1.0	5.7 ± 0.6	2.5
Tnight3 (°C)	4.0 ± 0.7	2.6 ± 0.6	1.4	3.6 ± 0.9	3.8
Tmax3 (°C)	11.7 ± 0.7	11.3 ± 0.5	<i>0.4</i>	11.6 ± 0.6	2.6
DTR3 (°C)	10.6 ± 0.2	11.8 ± 0.3	-1.2	11 ± 1.1	4.6
RH3 (%)	71 ± 2.5	76.8 ± 2.2	-5.8	72.9 ± 3.7	14.7
a3 (g m ⁻³)	5.1 ± 0.1	5.2 ± 0.1	-0.1	5.2 ± 0.1	0.5

Tm, mean temperature; Tnight, mean nighttime temperature; Tmax, maximum temperature; DTR, diurnal temperature range; RH, relative humidity (%); a, absolute humidity (gm⁻³); difference, urban–rural difference; range, maximum value minus minimum value in the study area. Significance, bold values: significant urban–rural differences at the 5% level; bold and italic value: significant urban–rural differences at the 10% level.

Relative and absolute humidity showed significant differences between urban and rural areas in September. In contrast, we found distinctive urban–rural differences in March

temperature for Munich (Table I). The UHI effect was significant at the 5% level: 1.0° C for mean temperatures, 1.4° C for nighttime temperatures, -1.2° C for DTR, -5.8% for RH and -0.1 g m⁻³ for absolute humidity. Compared to Campinas, the range of mean temperature as well as of nighttime temperature was higher, reaching 2.5 and 3.8° C, respectively.

Correlations between the urban index and temperature/humidity variables are summarized in Table II. For Campinas the highest correlations with urban index were for DTR ($r \sim -0.8$) and mean nighttime temperature ($r \sim 0.75$). Maximum temperature, RH and absolute humidity (September only) also had relatively strong correlations (all $|r| > 0.5$) with urban index. However, mean monthly temperatures were not strongly correlated with urban index: the correlation coefficients were either low (August and September) and/or not significant (September). The urban index in Munich was most strongly correlated with RH ($r = -0.84$), mean temperature ($r = 0.8$) and mean nighttime temperatures ($r = 0.77$) in March. All other correlations were also significant.

Table II. Pearson's correlation coefficients (r) for urban index (ui) and temperature and humidity variables for selected months in Campinas (August=8 and September=9) and Munich (March=3) in 2011.

CAMPINAS ui	<i>r</i>	Tm8 0.486	Tnight8 0.750	Tmax8 0.534	DTR8 -0.825	RH8 -0.599	a8 -0.463
	<i>n</i>	18	18	18	18	18	18
CAMPINAS ui	<i>r</i>	Tm9 0.191	Tnight9 0.756	Tmax9 0.633	DTR9 -0.794	RH9 -0.678	a9 -0.623
	<i>n</i>	27	27	27	27	27	27
MUNICH ui	<i>r</i>	Tm3 0.798	T3night 0.767	Tmax3 0.348	DTR3 -0.567	RH3 -0.839	a3 -0.560
	<i>n</i>	37	37	37	37	37	37

Tm, mean temperature; Tnight, mean nighttime temperature; Tmax, maximum temperature; DTR, diurnal temperature range; RH, relative humidity; a, absolute humidity; n, number of sites. Significance, bold values: significant coefficients at the 5% level; bold and italic value: significant coefficients at the 10% level.

3.2. Phenological onset dates in 2011

The mean onset dates and standard deviations (SDs) of flowering and leaf unfolding phenophases for the four studied species in both urban and rural areas are summarized in Table III. Campinas exhibited large SDs between site means of 8.9 (*Caesalpinia*: mouse-ear stage) and 17.4 d (*Tipuana*: beginning of flowering) (Table III). However, even trees within one site exhibited a large asynchrony in flowering and leaf unfolding: mean SD ranged between 12.1 and 15.7 d for *Tabebuia*, between 9.4 and 12.9 d for *Caesalpinia* and between 7.5 and 14.1 d for *Tipuana* (data not shown). The highest SD for one site (with n=6) was 36.1 d for full flowering of *Tabebuia*. In contrast, the results for *Betula* in Munich were characterized by relatively low SDs between 1.6 (mouse-ear stage) and 3.0 d (full flowering, Table III). At single Munich sites, mean SD did not exceed 2.4 d for all analyzed phenological phases (data not shown).

Significant urban–rural differences (UPE) were found for all phenophases of *Betula* in Munich and ranged between –1.5 (>50% leaves unfolded) and –3.4 d (full flowering), indicating an earlier onset in urban areas (Figure 3). In Campinas, UPE of *Tabebuia* varied between –1.5 (>50% leaves unfolded) and +9.3 d (beginning of flowering). However, these differences were not statistically significant. This was also true for *Caesalpinia* where differences ranged between +2.2 and +5.7 d. Significant differences were only found for flowering onset of *Tipuana* (–19.7 d) and for >50% leaf unfolding of the same species (–10.5 d, significant at the 10% level).

Table III. Mean (μ) onset dates (DOY, day of the year), standard deviations (SDs) between sites for flowering and leaf unfolding phenophases of *Tabebuia*, *Caesalpinia* and *Tipuana* in Campinas and *Betula* in Munich, 2011.

Species (City)	<i>n</i>	BBCH 61		BBCH 65		BBCH 10		BBCH 15		
		μ date	SD	μ date	SD	μ date	SD	μ date	SD	
<i>Tabebuia</i> (Campinas)	overall	19	230.0 18.08.	13.0	242.7 31.08.	10.7	225.5 13.09.	13.3	271.8 29.09.	13.6
	urban	14	232.5 21.08.	13.8	244.0 01.09.	11.8	257.1 14.09.	14.5	271.4 28.09.	15.0
	rural	5	223.2 11.08.	7.9	239.1 27.08.	6.2	251.3 08.09.	9.5	272.9 30.09.	9.8
<i>Caesalpinia</i> (Campinas)	overall	28	246.2 22.09.	11.5	272.2 29.09.	10.6	240.1 28.08.	8.9	248.2 05.09.	10.4
	urban	19	265.7 23.09.	10.6	274.1 01.10.	8.8	240.8 29.08.	8.9	249.2 06.09.	10.5
	rural	9	261.2 18.09.	13.4	268.4 25.09.	13.5	238.6 27.08.	9.3	246.1 03.09.	10.6
<i>Tipuana</i> (Campinas)	overall	17	264.9 22.09.	17.4	280.0 07.10.	14.6	235.0 23.08.	10.3	241.7 30.08.	10.9
	urban	12	259.1 16.09.	16.0	276.3 03.10.	14.4	241.2 29.08.	7.6	238.6 27.08.	10.7
	rural	5	278.8 06.10.	12.8	288.8 16.10.	11.9	232.4 20.08.	10.5	246.1 06.09.	8.0
<i>Betula</i> (Munich)	overall	38	98.6 09.04.	2.1	101.0 11.04.	3.0	94.7 05.04.	1.6	101.0 11.04.	2.5
	urban	25	97.8 09.04.	1.5	99.8 10.04.	2.1	94.2 04.04.	1.3	100.5 11.04.	2.3
	rural	13	100.1 10.04.	2.3	103.2 13.04.	3.3	95.7 06.04.	1.8	102.0 12.04.	2.7

BBCH 61, beginning of flowering; BBCH 65, full flowering; BBCH 10, mouse-ear stage; BBCH 15, >50% of leaves unfolded; n, number of sites.

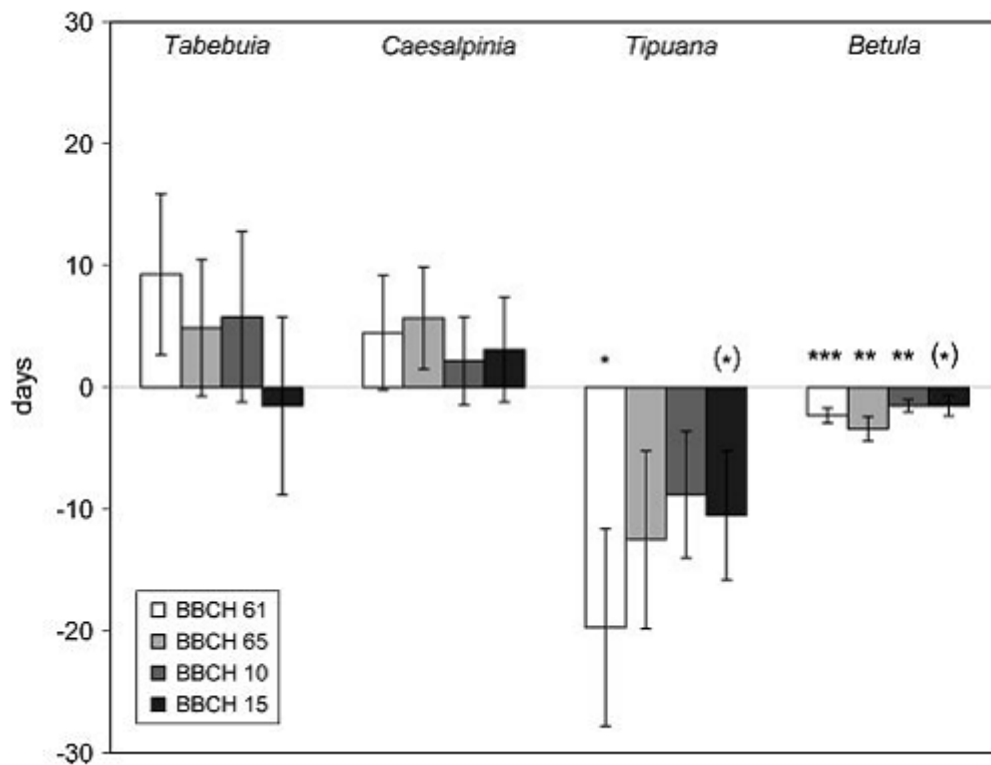


Figure 3. Urban–rural differences in phenology (UPE, urban phenology effect, in days) and corresponding standard error for flowering and leaf unfolding phenophases of *Tabebuia*, *Caesalpinia* and *Tipuana* in Campinas and *Betula* in Munich, 2011; BBCH 61, beginning of flowering; BBCH 65, full flowering; BBCH 10, mouse-ear stage; BBCH 15, >50% of leaves unfolded. Significant at the ***0.1% level, **1% level, *5% level and (*)10% level.

3.3. Explanatory variables in urban phenology

Correlation coefficients between phenological onset dates of the three selected species and urban index, temperature and humidity in Campinas are summarized in Table IV. There were no significant correlations with flowering phenophases of *Tabebuia*. However, leaf phenophases revealed some strong correlations with mean, nighttime and maximum temperatures in August (all $r < -0.5$). The highest correlations were obtained with relative and absolute humidity in August ($r > 0.7$). Partial correlation analyses with mean temperature as a control variable underlined the significant influence of humidity variables on leaf phenophases (all $r > 0.65$, data not shown). For *Caesalpinia* there were no significant correlations. In contrast, there were several significant correlations for flowering and leaf unfolding phenophases of *Tipuana*. The beginning of flowering, e.g. was correlated with DTR ($r=0.58$), mean nighttime temperature and humidity related variables in September (all

$|r|>0.5$). For full flowering, correlations with relative and absolute humidity were less significant. We detected strong correlations for leaf unfolding phenophases and mean and nighttime temperatures (all $r<-0.7$). For almost all phenophases (except full flowering) statistically significant correlations with the urban index were $r < -0.5$.

For *Betula* phenology there were strong correlations with nighttime and mean temperatures in March, especially for the beginning of flowering and for full flowering (all $r<-0.7$), as well as with DTR (Table IV). In contrast, we did not find any significant correlations with maximum temperature or absolute humidity. The urban index was negatively correlated with onset dates and was again stronger for flowering phenophases ($r<-0.57$). RH was more strongly correlated with flowering phenophases of *Betula* than with leaf unfolding phenophases. This, however, appears to be attributable to the high correlation between RH and mean temperature ($r=-0.94$) because partial correlations with mean temperature as the control variable did not show any significant correlations (data not shown).

Table IV. Pearson's correlation coefficients (r) for flowering and leaf unfolding phenophases of *Tabebuia*, *Caesalpinia* and *Tipuana* in Campinas and *Betula* in Munich, 2011.

Table IV (1/2)

<i>Tabebuia</i>		ui	Tm8	Tnight8	Tmax8	DTR8	RH8	a8	Tm9	Tnight9	Tmax9	DTR9	RH9	a9
BBCH61	<i>r</i>	0.284	-0.199	0.173	0.178	-0.192	0.012	-0.043						
	<i>n</i>	19	14	14	14	14	14	14						
BBCH65	<i>r</i>	0.162	-0.167	0.174	0.068	-0.200	0.081	0.077						
	<i>n</i>	19	14	14	14	14	14	14						
BBCH10	<i>r</i>	0.120	-0.591	-0.533	-0.585	0.234	0.812	0.803	-0.090	0.180	-0.322	0.164	0.168	0.152
	<i>n</i>	18	13	13	13	13	13	13	16	17	16	16	16	16
BBCH15	<i>r</i>	-0.112	-0.455	-0.557	-0.570	0.371	0.710	0.752	0.046	0.187	-0.344	0.400	0.271	0.348
	<i>n</i>	19	14	14	14	14	14	14	17	17	16	16	16	16
<i>Caesalpinia</i>		ui	Tm8	Tnight8	Tmax8	DTR8	RH8	a8	Tm9	Tnight9	Tmax9	DTR9	RH9	a9
BBCH61	<i>r</i>	0.215	-0.385	-0.060	0.014	-0.107	0.176	0.088	-0.061	-0.295	0.040	0.069	0.010	-0.049
	<i>n</i>	28	18	18	18	18	18	18	26	26	25	25	25	25
BBCH65	<i>r</i>	0.273	-0.212	-0.020	0.176	-0.008	0.049	-0.042	-0.017	-0.293	0.131	0.041	-0.080	-0.152
	<i>n</i>	28	18	18	18	18	18	18	26	26	25	25	25	25
BBCH10	<i>r</i>	0.109	-0.157	-0.052	0.164	0.071	-0.006	-0.100						
	<i>n</i>	28	18	18	18	18	18	18						
BBCH15	<i>r</i>	0.144	-0.203	-0.028	0.145	-0.004	0.001	-0.092						
	<i>n</i>	28	18	18	18	18	18	18						

Table IV. (2/2)

<i>Tipuana</i>		ui	Tm8	Tnight8	Tmax8	DTR8	RH8	a8	Tm9	Tnight9	Tmax9	DTR9	RH9	a9
BBCH61	<i>r</i>	-0.540	-0.618	-0.632	-0.582	0.501	0.559	0.463	-0.114	-0.578	-0.365	0.582	0.563	0.607
	<i>n</i>	17	8	8	8	8	8	8	15	14	14	14	14	14
BBCH65	<i>r</i>	-0.388	-0.695	-0.624	-0.550	0.385	0.545	0.393	-0.234	-0.590	-0.297	0.548	0.437	0.335
	<i>n</i>	17	8	8	8	8	8	8	15	14	14	14	14	14
BBCH10	<i>r</i>	-0.547	-0.727	-0.714	-0.638	0.564	0.674	0.553						
	<i>n</i>	17	8	8	8	8	8	8						
BBCH15	<i>r</i>	-0.561	-0.746	-0.779	-0.700	0.655	0.727	0.612						
	<i>n</i>	17	8	8	8	8	8	8						
<i>Betula</i>		ui	Tm3	Tnight3	Tmax3	DTR3	RH3	a3						
BBCH61	<i>r</i>	-0.574	-0.742	-0.752	-0.163	0.709	0.637	0.124						
	<i>n</i>	38	37	37	37	37	37	37						
BBCH65	<i>r</i>	-0.585	-0.739	-0.749	-0.194	0.679	0.673	0.219						
	<i>n</i>	38	37	37	37	37	37	37						
BBCH10	<i>r</i>	-0.404	-0.571	-0.609	-0.030	0.668	0.473	0.031						
	<i>n</i>	38	37	37	37	37	37	37						
BBCH15	<i>r</i>	-0.288	-0.482	-0.450	-0.259	0.324	0.412	0.095						
	<i>n</i>	38	37	37	37	37	37	37						

ui, urban index; Tm, mean temperature; Tnight, mean nighttime temperature; Tmax, maximum temperature; DTR, diurnal temperature range; RH, relative humidity; a, absolute humidity, in March (=3), August (=8) and September (=9); BBCH 61, beginning of flowering; BBCH 65, full flowering; BBCH 10, mouse-ear stage; BBCH 15, >50% of leaves unfolded; n, number of sites; P, significance, bold values: significant coefficients at the 5% level; bold and italic values: significant coefficients at the 10% level.

4. Discussion

4.1. UHI effect

We did not find a significant UHI in the tropical city of Campinas, contrasting with the more distinct urban–rural temperature differences in Munich, showing a mean UHI of 1.0° C. In addition, differences were more pronounced in Munich than in Campinas for DTR, nighttime temperatures and for the absolute temperature ranges between all sites. The fact that UHI is greater for minimum than for maximum temperatures is well documented in existing literature (Landsberg, 1981; Baker *et al.*, 2002; Mimet *et al.*, 2009; Shustack *et al.*, 2009), and was also shown in our study of Campinas and Munich. Furthermore, relative and absolute humidity were significantly lower in urban than rural Munich (–5.8% and –0.1g m^{–3} respectively). Campinas, however, was characterized by a smaller urban–rural difference in relative and absolute humidity.

The question arises whether these negligible differences within the study area in Brazil are linked to the site selection criteria. Campinas' most rural site exhibited an urban index (ui) of 0.156 compared with 0.003 in Munich, with five additional Munich sites having ui values smaller than 0.010. In addition, the maximum distance to the city center was 12.7 km in Campinas compared with 28.2 km in Munich. Therefore, we suggest that the dominance of sites with a higher degree of urbanization might have influenced temperature variations/ranges in Campinas. However, existing studies also demonstrated minor UHI effects in (sub)tropical cities (e.g. reviewed by Roth, 2007).

In both cities the urban index was a good predictor of local temperature and humidity conditions. The only exception was mean temperature in Campinas, that only had a correlation of $r=0.49$ in August and no significant correlation in September. Nevertheless, we propose that an easily computable urban index might be useful for a quick and inexpensive estimation of the spatial structure of UHIs.

4.2. Urban–rural differences in phenology

In contrast to small SDs of *Betula* onset dates in Munich of between 1.6 (mouse-ear stage) and 3.0 d (>50% leaves unfolded), we observed high SDs in onset dates for the three selected species in Campinas ranging between 8.9 (*Caesalpinia*: mouse-ear stage) and 17.4 d (*Tipuana*: beginning of flowering). A high variation in onset dates of phenological phases in the tropics was also reported by Gazal *et al.* (2008) for three tropical cities in Asia and Africa

and for tropical wet and dry forest trees (Morellato *et al.*, 2000; Borchert *et al.*, 2005). The high within-species variation in tropical tree phenology might partly explain small urban–rural differences. We only found significant UHI-related differences for *Tipuana* in Campinas, whereas almost all phenophases of *Tabebuia* and all of *Caesalpinia* had small positive urban–rural differences (albeit not significant) that indicated an earlier onset in the countryside. Gazal *et al.* (2008) reported earlier bud burst dates only in the tropical city of Bangkok (–23 d), but not in Korat (+9 d) or Dakar (+9 d). In addition, bud burst was delayed with increasing land surface temperature, suggesting a low temperature sensitivity, or other influencing environmental variables (e.g. humidity-related variables).

In contrast to our findings for Campinas, we detected significant differences between onset dates for *Betula* phenophases in Munich ranging between –1.5 (mouse ear stage) and –3.4 d (full flowering). An urban–rural comparison in Berlin, Germany, conducted by Henniges and Chmielewski (2006) also revealed greater differences for *Betula* flowering (–2.6 d) compared with *Betula* leaf unfolding (–0.3 d). Hence, this result is in accordance with our findings: *Betula* flowering phenophases are more responsive to temperature variations than leaf unfolding phenophases.

In Campinas, the vertical structure of the city is much more pronounced than in Munich. Zhang *et al.* (2004) concluded that UHI effects on plant phenology are stronger in North America than in Europe or Asia owing to the dense, vertical urban design in North American cities. However, this cannot be tested for our European and South American study sites because species were not identical. We only found a distinctive high urban–rural difference of –10.5 to –19.7 d in *Tipuana* spring phenology that was much higher than the difference of –1.5 to –3.4 d in *Betula* phenology.

4.3. Air temperature, humidity and the phenology of trees in urban areas

We demonstrated the suitability of *Betula* phenophases in urban climatology applications by high correlations between phenological onset dates and DTR (exception >50% leaves unfolded). The DTR is a good indicator for UHIs as it is smaller in the city because of the thermal energy storage of urban constructions (Landsberg, 1981). Mimet *et al.* (2009) also reported that the DTR is most strongly correlated with budburst onset dates of sour cherry in the city of Rennes, France. In general, UHI is clearer in minimum temperatures (Baker *et al.*, 2002; Mimet *et al.*, 2009; Shustack *et al.*, 2009). Therefore, we also found slightly stronger correlations with mean nighttime temperature than with mean temperature (exception >50%

leaves unfolded) and no statistically significant correlation with maximum temperature. This is in accordance with Wielgolaski (1999) and Mimet *et al.* (2009) who stated that maximum temperature does not play an important role in phenological models. Furthermore, particularly for flowering phenophases of *Betula* in Munich, there was a strong and evident relationship between urban index and onset dates.

In Campinas, however, the significance and magnitude of the difference in onset dates varied considerably among species and phenophases. The most promising species for urban phenology applications was *Tipuana* as shown by high correlations, especially with mean and nighttime temperatures, and the significant relationship with the urban index for three of the four selected phenophases. *Caesalpinia* failed to show any significant correlations with the selected environmental variables and was thus not suitable to demonstrate temperature variations at the local scale associated with the UHI effect. This also applied for flowering phenophases of *Tabebuia*, although leaf unfolding phenophases were particularly sensitive to humidity and also to air temperature.

The influence of air humidity in the study area of Munich was negligible because absolute humidity was not correlated with phenological onset dates of *Betula* and partial correlation analyses with temperature as a control variable showed no significant correlations with RH. On the other hand, our results suggest that humidity influences leaf phenology of *Tabebuia*. The influence of humidity on the other phases and species, however, was not that marked. The only other study comparing urban and rural phenology of tropical tree species also identified the potential importance of humidity (Gazal *et al.*, 2008). Leafing phenology of tropical trees under a seasonal climate is driven mostly by precipitation and also by non-climatic parameters such as leaf longevity, water stress and increasing day length (Morellato *et al.*, 2000; Borchert *et al.*, 2005; Staggemeier and Morellato, 2011). Therefore, a consideration of humidity variables is especially recommended to understand urban effects in tropical cities under climates with dry and wet seasons.

5. Conclusions

We propose that phenological observations of *Tipuana*, a tree species widely used for planting in South American cities, are useful for a quick and inexpensive estimation of the spatial structure of UHIs in neotropical cities. Facing the high number of different species in tropical biomes, the need for further investigations becomes particularly evident. In the temperate/moist regions of Europe, possible species have already been tested for their

suitability in urban applications, and greater knowledge in this respect exists (Baumgartner, 1952; Bernhofer, 1991). Consequently, additional species and phenophases should be explored to further identify the potential of phenology to monitor heat islands in tropical cities.

Acknowledgements

The research conducted in Germany was supported by the grant ME 179/3-1 of the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) and the EUROPA MOBELUmweltstiftung; the research conducted in Brazil by CAPES/PROBAL (360/11), FAPESP (Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo, 2009/54208-6), CNPq (Coordenação Nacional de Pesquisa) and DAAD (German Academic Exchange Service, 50752579). MAE received a master and BEPE fellowship from FAPESP; LPCM received a Research Productivity fellowship and grant from CNPq. We are grateful to Milton Ribeiro from the Ecology Department (Landscape Ecology, UNESP) for the acquisition of digital land use data. We thank our drivers Yuri Brenn, Amanda Alfonso Batista and Fernanda Zambonini (Campinas).

6. References

- Aas G. 2000. Hangebirke (*Betula pendula*) und andere einheimische Birken - Dendrologische Anmerkungen. LWF-Bericht 28: 1–5.
- Baker LA, Brazel AJ, Selover N, Martin C, McIntyre N, Steiner FR, Nelson A, Musacchio L. 2002. Urbanization and warming of Phoenix (Arizona, USA): impacts, feedbacks and mitigation. *Urban Ecosystems* 6: 183–203.
- Baumgartner A. 1952. Zur Phanologie von Laubholzern und ihre Anwendung bei lokalklimatischen Untersuchungen. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone* 42: 69–73.
- Baumgartner A, Mayer H, Brunel W, Katz A, Mudslinger E, Nyack EM. 1984. Phanologische Beobachtungen in Munchen. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen 8: 30–35.
- Bernhofer C. 1991. Stadtphanologie am Beispiel der Forsythia. *Wetter und Leben* 43: 213–218.
- Borchert R, Rivera G, Hagnauer W. 2002. Modification of vegetative phenology in a tropical semi-deciduous forest by abnormal drought and rain. *Biotropica* 34: 27–39.
- Borchert R, Robertson K, Schwartz MD, Williams-Linera G. 2005. Phenology of temperate trees in tropical climates. *International Journal of Biometeorology* 50: 57–65.
- Bryce M, Drews O, Schenk MF, Menzel A, Estrella N, Weichenmeier I, Smulders MJM, Buters J, Ring J, Gørg A, Behrendt H, Traidl-Hoffmann C. 2010. Impact of urbanization on the proteome of birch pollen and its chemotactic activity on human granulocytes. *International Archives of Allergy and Immunology* 151: 46–55.
- Chandler TJ. 1964. City growth and urban climates. *Weather* 19: 170–171. Clark DA. 2007. Detecting tropical forests' responses to global climatic and atmospheric change: current challenges and a way forward. *Biotropica* 39: 4–19.
- Colwell RK, Brehm G, Cardelus CL, Gilman AC, Longino JT. 2008. Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics. *Science* 322: 258–261.
- Corte VB, Borges EEL, Ventrella MC, Leite ITA, Braga AJT. 2008. Histochemical aspects of reserves mobilization of *Caesalpinia peltophoroides* (Leguminosae) seeds during germination and seedlings early growth. *Revista Árvore* 32: 641–650.
- Davidson CI, Phalen RF, Solomon PA. 2005. Airborne particulate matter and human health: a review. *Aerosol Science and Technology* 39: 737–749.
- Emberlin J, Detandt M, Gehrig R, Jäger S, Nolard N, Rantio-Lehimäki A. 2002. Responses in the start of *Betula* (birch) pollen season to recent changes in spring temperature across Europe. *International Journal of Biometeorology* 46: 159–170.
- European Environment Agency (EEA). 2010. Corine Land Cover (CLC) 2006 Raster Data

100 x 100 m - Version 13 (02/2010). Available at <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corineland-cover-2006-raster>.

Gazal R, White MA, Gillies R, Rodemaker E, Sparrow E, Gordon L. 2008. GLOBE students, teachers, and scientists demonstrate variable differences between urban and rural leaf phenology. *Global Change Biology*14: 1568–1580.

Grimm NB, Stanley HF, Gobubiewski NE, Redman CL, Wu J, Bai X, Briggs JM. 2008. Global change and the ecology of cities. *Science* 319: 756–760.

Henniges Y, Chmielewski F-M. 2006. Zukunftsorientierte Nutzung ländlicher Räume - LandInnovation - Stadt-Umland-Gradientenphänologischer Phasen im Raum Berlin. Materialien der Interdisziplinären Arbeitsgruppe Nr. 11, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften: Berlin.

Howard L. 1833. *The Climate of London: Deduced from Meteorological Observations Made in the Metropolis and at Various Places around it*. Harvey and Darton: London.

Jeong J-H, Ho C-H, Linderholm HW, Jeong S-J, Chen D, Choi Y-S. 2011. Impact of urban warming on earlier spring flowering in Korea. *International Journal of Climatology* 31: 1488–1497.

Jochner S, Beck I, Behrendt H, Traidl-Hoffmann C, Menzel A. 2011. Effects of extreme spring temperatures on urban phenology and pollen production: a case study in Munich and Ingolstadt. *Climate Research* 49: 101–112.

Jochner S, Sparks TH, Estrella N, Menzel A. 2012a. The influence of altitude and urbanization on trends and mean dates in phenology (1980–2009). *International Journal of Biometeorology*56: 387–394.

Jochner S, Ziello C, Bock A, Estrella N, Buters J, Weichenmeier I, Behrendt H, Menzel A. 2012b. Spatio-temporal investigation of flowering dates and pollen counts in the topographically complex Zugspitze area on the German-Austrian border. *Aerobiology*. 28: 541–556.

Kampa M, Castanas E. 2008. Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution*151: 362–367.

Kratzer PA. 1937. *Das Stadtklima*. Friedr. Vieweg und Sohn: Braunschweig.

Kuttler W. 2004. *Stadtklima. Teil 1. Grundzüge und Ursachen*. Umweltwissenschaften und Schadstoffforschung16: 187–199.

Lakatos L, Gulyás A. 2003. Connection between phenological phases and urban heat island in Debrecen and Szeged, Hungary. *Acta Climatologica et Chorologica*36–37: 79–83.

Landsberg HE. 1981. *The Urban Climate*. Academic Press: New York.

Lu P, Yu Q, Liu J, Lee X. 2006. Advance of tree-flowering dates in response to urban climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*138: 120–131.

- Luo Z, Sun OJ, Ge Q, Xu W, Zheng J. 2007. Phenological responses of plants to climate change in an urban environment. *Ecological Research* 22: 507–514.
- McCarthy MP, Best MJ, Betts RA. 2010. Climate change in cities due to global warming and urban effects. *Geophysical Research Letters* 37: L09705. DOI: 10.1029/2010GL042845
- Meier U (ed). 2001. *Entwicklungsstadien Mono- und Dikotyler Pflanzen*. BBCH-Monograph. Biologische Bundesanstalt für Land und Forstwirtschaft: Berlin, Braunschweig.
- Menzel, A.; Sparks, T. H.; Estrella, N.; Koch, E.; Aasa, A.; Ahas, R.; Alm-Kubler, K.; Bissoli, P.; Braslavka, O.; Briede, A.; Chmielewski, F. M. Crepinsek, Z.; Curnel, Y.; Dahl, A.; Defila, C.; Donnelly, A.; Filella, Y.; Jatzcak, K.; Mage, F.; Mestre, A.; Nordli, O.; Peñuelas, J.; Pirinen, P.; Remisová, V.; Scheifinger, H.; Striz, M.; Susnik, A.; van Vliet, A. J. H.; Wielgolaski, F. E.; Zach, S.; Züst, A. 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology* 12: 1969–1976.
- Mimet A, Pellissier V, Quénot H, Aguejdad R, Dubreuil V, Rozé F. 2009. Urbanization induces early flowering: evidence from *Platanus aceriflora* and *Prunus cerasus*. *International Journal of Biometeorology* 53: 287–298.
- Morellato LPC, Talora DC, Takahasi A, Bencke CC, Romera EC, Zipparro VB. 2000. Phenology of Atlantic rain forest trees: a comparative study. *Biotropica* 32: 811–823.
- Oke TR. 1976. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere* 14: 269–277.
- Oke TR. 1987. *Boundary Layer Climates*, 2nd edn. London: Methuen&Co.
- Oleson KW, Bonan GB, Feddema J, Jackson T. 2010. An examination of urban heat island characteristics in a global climate model. *International Journal of Climatology* 31: 1848–1865.
- Omoto Y, Aono Y. 1990. Estimation of change in blooming dates of cherry flower by urban warming. *Journal of Agricultural Meteorology* 46: 123–129.
- Roth M. 2007. Review of urban climate research in (sub)tropical regions. *International Journal of Climatology* 27: 1859–1873.
- Sailor DJ. 2011. A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. *International Journal of Climatology* 31: 189–199.
- Santos Pereira A, de Aquino-Neto FR. 2003. Chemical composition of *Tipuana tipu*, a source for tropical honey bee products. *Zeitschrift für Naturforschung. Section C58*: 201–206.
- Shustack DP, Rodewald AD, Waite TA. 2009. Springtime in the city: exotic shrubs promote earlier green up in urban forests. *Biological Invasions* 11: 1357–1371.
- Siljamo P, Sofiev M, Ranta H, Linkosalo T, Kubin E, Ahas R, Genikhovich E, Jatzcak K, Jato V, Neková J, Minin A, Severova E, Shalaboda V. 2008. Representativeness of point-wise

phonological *Betula* data collected in different parts of Europe. *Global Ecology and Biogeography* 17: 489–502.

Singh KP, Kushwaha CP. 2005. Paradox of leaf phenology: *Shorea robusta* is a semi-evergreen species in tropical dry deciduous forests in India. *Current Science* 88: 1820–1824.

Souza LA, Iwazaki MC, Moscheta IS. 2005. Morphology of the pericarp and seed of *Tabebuia chrysotricha* (Mart. ex DC.) Standl. (Bignoniaceae). *Brazilian Archives of Biology and Technology* 48:407–418.

Staggemeier VG, Morellato LPC. 2011. Reproductive phenology of coastal plain Atlantic forest vegetation: comparisons from seashore to foothills. *International Journal of Biometeorology* 55:843–854.

Traidl-Hoffmann C, Kasche A, Menzel A, Jakob T, Thiel M, Ring J, Behrendt H. 2003. Impact of pollen on human health. More than allergen carriers? *International Archives of Allergy and Immunology* 131: 1–13.

Upmanis H, Eliasson I, Lindqvist S. 1998. The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Goteborg, Sweden). *International Journal of Climatology* 18: 681–700.

Vieira RMSP, Alvalá RCS, Ponzoni FJ, Ferraz Neto S, Canavesi V. 2010. Mapa de uso e cobertura da terra do Estado de São Paulo. São José dos Campos: INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Available at <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/36QPBQ5>

White MA, Ramakrishna R, Nemani R, Thornton PE, Running SW. 2002. Satellite evidence of phenological differences between urbanised and rural areas of the eastern United States deciduous broadleaf forest. *Ecosystems* 5: 260–277.

Wielgolaski FE. 1999. Starting dates and basic temperatures in phenological observations of plants. *International Journal of Biometeorology* 42: 158–168.

Zacharias F. 1972. Bluhphaseneintritte an Straßenbaumen (insbesondere *Tilia x euchlora* KOCH) und Temperaturverteilung in Westberlin, PhD thesis, Freie Universitat Berlin, Berlin.

Zhang X, Friedl MA, Schaaf CB, Strahler AH, Schneider A. 2004. The footprint of urban climates on vegetations phenology. *Geophysical Research Letters* 31: L12209. DOI: 10.1029/2004GL020137

Ziska LH, Gebhard DE, Frenz DA, Faulkner S, Singer BD, Straka JG. 2003. Cities as harbingers of climate change: common ragweed, urbanization, and public health. *The Journal of Allergy and Clinical Immunology* 111: 290–295

Capítulo 2

Proposta de avaliação da urbanização aplicada a estudos fenológicos e de clima urbano em cidades tropicais

Alves-Eigenheer, M. A.^{1,2}; Ribeiro, M. C.²; Morellato, L. P. C.¹

¹ Laboratório de Fenologia, Departamento de Botânica, Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro (SP), Brasil

² Laboratório de Ecologia Espacial e Conservação, Departamento de Ecologia, Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro (SP), Brasil

Resumo

O crescimento acelerado e sem planejamento das cidades vem alterando a estrutura original da paisagem, o que pode alterar o clima urbano e a fenologia de espécies. Nosso estudo propõe um novo método de avaliar a urbanização da cidade, levando em conta diversos aspectos e escalas da paisagem e sua influência sobre o clima urbano e a fenologia. Nossa área de estudo foi a cidade de Campinas (sudeste do Brasil), onde acompanhamos a floração e desenvolvimento foliar de três espécies arbóreas (*Caesalpinia peltophoroides*, *Tipuana tipu* e *Tabebuia chrysotricha*) distribuídas em 31 grupos ao longo da cidade, além de coletarmos dados de temperatura e umidade em cada ponto. Pretendemos testar: 1) se as métricas da paisagem albedo, cobertura vegetal, permeabilidade do solo e densidade de construções horizontais e verticais podem descrever o clima urbano e a fenologia nos trópicos; e 2) em quais escalas as métricas da paisagem podem ser aplicadas para o entendimento da fenologia e do clima urbano. Nossos resultados mostraram que todas as métricas da paisagem estudadas, com exceção do albedo, explicaram as variações do clima urbano e da fenologia de *Tipuana tipu*, não sendo satisfatórias para explicar a fenologia das outras espécies estudadas. Cada métrica possuiu uma escala, não sendo possível padronizar apenas um único tamanho. Esperamos que nosso trabalho estimule novos estudos relacionados a fenologia urbana em áreas tropicais.

Palavras-chave: Análise da paisagem, clima urbano, fenologia.

1. Introdução

Segundo a UNFPA (2009), cerca de 50% da população mundial vive atualmente em áreas urbanas, com perspectiva de aumento para 70% em 2050. Esse crescimento tem ocorrido rapidamente e geralmente sem planejamento, apresentando sérias modificações nos ambientes e biodiversidade urbana em função da poluição por veículos e indústrias, e fragmentação de áreas devido à expansão urbana e alterações secundárias (Alberti et al. 2003), como modificação do fotoperíodo devido à iluminação pública, superfícies horizontais e verticais totalmente modificadas, entre outras (Hart e Sailor 2009). Essas modificações alteram as características físicas das variáveis climáticas, como temperatura, precipitação, umidade e vento (Mimet et al. 2009).

Essas alterações geram uma importante alteração no clima urbano, denominada “ilha de calor”, resultado da predominância de concreto e asfalto no solo urbano combinada com a falta de áreas verdes, o que leva ao aumento do calor e à perda da umidade do ar (Lombardo 1985). Além disso, segundo Tavares e Lastória (1994), as temperaturas são mais elevadas na região central das cidades uma vez que há uma maior rugosidade urbana, ou seja, uma maior diversidade de edificações, sendo que nos trópicos esse efeito ocorre com maior intensidade devido à maior insolação. Segundo Ayoade (1991), as ilhas de calor provocam o aumento da amplitude térmica nas cidades, especialmente pela ausência de “reguladores de temperatura” como áreas verdes e “olhos d’água”.

Estudos em regiões temperadas indicam uma clara relação entre as ilhas de calor e a fenologia, sendo que o aumento da temperatura aparece como a principal variável climática influenciadora no desencadeamento das fenofases (Roetzer et al. 2000; Defila & Clot 2001; Menzel et al. 2006; Luo et al. 2007, Mimet et al. 2009). Portanto, a fenologia é um excelente indicador para detectar e medir o impacto das ilhas de calor na vegetação das cidades.

Jochner et al. (2011) propuseram uma nova maneira de avaliação da relação entre ilhas de calor, urbanização e fenologia. O chamado “urban index” (UI) é calculado a partir de mapas de uso do solo e reflete a proporção de áreas construídas em um raio de 2 km de cada ponto de coleta de dados fenológicos. Os valores variam de 0 a 1, em um gradiente que vai de baixo (UI=0) a alto (UI=1) grau de urbanização. Jochner et al. (2013) também utilizou esse mesmo método para a avaliação comparativa do efeito de ilha de calor na fenologia de árvores em uma cidade de clima temperado (Munique – Alemanha) e em uma de clima tropical (Campinas – Brasil). Ao avaliar a contribuição do UI para explicar as fenofases das plantas urbanas de Campinas, os autores concluíram que as fenofases estavam mais correlacionadas

com as variáveis climáticas estudadas, porém não foram encontradas ilhas de calor na área. Esse resultado contraria os estudos de conforto térmico realizados na mesma cidade (Pezzuto et al. 2004; Abreu-Harbich et al. 2013) que indicam temperaturas mais altas em alguns pontos de Campinas utilizando métodos diferentes.

No trabalho de Jochner et al. (2013) os resultados do UI de Campinas foram bem diferentes dos de Munique e isso foi atribuído a seleção dos locais estudados. Munique possui em seu ponto mais rural um índice de 0,003, enquanto Campinas possui o índice de 0,156. Além disso, a máxima distância até o centro da cidade em Munique foi de 28,2 quilômetros e em Campinas foi de 12,7 quilômetros. Sendo assim, a dominância de locais com alto grau de urbanização pode ter influenciado os resultados encontrados pelas autoras. No entanto, a estrutura das cidades brasileiras é fundamentalmente diferente da estrutura de cidades alemãs. Em Munique, os edifícios possuem em média quatro andares e estes se concentram essencialmente na região central da cidade, enquanto em Campinas ocorrem prédios com até trinta andares, e diversos edifícios residenciais espalhados ao longo da cidade com cerca de vinte andares (Figura 1). Outra importante diferença entre as cidades é que a zona rural de Munique é composta de pequenos sítios de produtores locais, enquanto a zona rural de Campinas é basicamente composta de monoculturas de cana-de-açúcar. Devido a esse fator é possível encontrar árvores em áreas realmente afastadas da cidade de Munique, o que não ocorre em Campinas.



Figura 1 – Região central das cidades de (A) Munique e (B) Campinas, onde é possível verificar algumas diferenças na estrutura espacial da região central das cidades.

Devido a essas diferenças na estrutura espacial das cidades, este estudo propõe uma nova forma de avaliar a urbanização em cidades tropicais, que possuem estruturas diferentes

do encontrado na maioria das cidades européias. O objetivo do presente estudo é propor uma forma de análise que contemple as diferenças estruturais das cidades tropicais, evidenciando variações e características da paisagem em diferentes escalas, facilitando assim o diagnóstico de ilhas de calor. Propomos avaliar: 1) que tipos de métricas da paisagem não foram consideradas por Jochner et al. (2011) para explicar o clima urbano e as alterações nas fenofases? 2) se em cidades tropicais as métricas de paisagem urbana podem apresentar escalas (i.e. raio de influência) diferentes da proposta por Jochner et al. (2011) (2 km) e; 3) se as novas métricas da paisagem urbana podem explicar as alterações fenológicas e o clima urbano. Esperamos propor uma nova metodologia mais adequada para explicar a fenologia e o clima em áreas urbanas tropicais.

2. Métodos

2.1. Área de estudo

O município de Campinas (22°54´S, 47°03´W) está localizado no interior do Estado de São Paulo, região sudeste do Brasil e possui pouco mais de um milhão de habitantes em uma área de 796 km² (IBGE 2010). Campinas foi escolhida por apresentar uma realidade urbana complexa, com diferentes configurações de uso e ocupação do solo, além de uma grande concentração de área construída e adensamento populacional. A área de estudo escolhida foi a mesma utilizada em Jochner et al. (2013), e portanto, o novo índice a ser testado e proposto pode ser aplicado aos mesmos dados fenológicos e climáticos, permitindo uma comparação acurada entre os métodos.

2.2. Clima

Campinas possui um clima tropical sazonal (Cwa, segundo a classificação de Koeppen), caracterizado por um período quente e úmido de Outubro a Março e frio e seco de Abril a Setembro, com precipitação média anual é de 1410 mm e a temperatura média é de 21,9°C (dados do Instituto Agrônomo de Campinas).

2.3. Espécies estudadas

Escolhemos analisar as fenofases referentes ao brotamento e a floração de três espécies. Como a aplicabilidade de espécies de árvores para esse tipo de estudo ainda não foi investigada no Brasil, nós realizamos saídas de campo de reconhecimento da área, com o

objetivo de selecionar as três espécies mais abundantes na arborização urbana da região estudada em Campinas.

As espécies selecionadas foram as mesmas do trabalho de Jochner *et al.* 2013: *Caesalpinia peltophoroides* Benth., conhecida popularmente como Sibipiruna, uma árvore decídua da família Fabaceae, subfamília Caesalpinoideae, nativa do Brasil (Lorenzi 2000; Corte *et al.* 2008); *Tipuana tipu* (Benth.) Kuntze, semi-decídua, conhecida popularmente como Tipuana ou Amendoim-Acácia que é também da família Fabaceae, subfamília Faboidea e originária da Argentina e Bolívia (Lorenzi 2000); e *Tabebuia chrysotricha* (Mart.Ex DC.) Standl. ou Ipê Amarelo, árvore decídua da família Bignoniaceae, nativa do Brasil, e é a espécie mais cultivada em praças e ruas de cidades brasileiras (Lorenzi 2000).

2.4. Fenologia

Os pontos de coleta de dados foram escolhidos em um gradiente urbano partindo da região central em direção a Estrada da Rhodia (Paulínia), com pouca variação altitudinal (aproximadamente 100 metros) e baseado principalmente na ocorrência das espécies (com no mínimo dois indivíduos por ponto). Nós observamos 83 indivíduos de *Tabebuia chrysotricha* em 19 pontos, 101 de *Caesalpinia peltophoroides* em 28 pontos e 68 de *Tipuana tipu* em 17 pontos.

Como método de observação fenológica nós utilizamos o modelo BBCH-scale (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt and Chemical Industry), que foi desenvolvido inicialmente para acompanhamento fenológico de plantas agrícolas (Meier, 2011). Esse método permite o acompanhamento detalhado de cada pequena alteração fenológica dos principais estágios fenológicos e foi aplicado por Jochner *et al.* 2013 (Material Suplementar 1).

Neste estudo observamos as fenofases relacionadas ao surgimento de novas folhas, desenvolvimento foliar, surgimento de botões e inflorescências e floração (com exceção da espécie *Tipuana tipu*, onde não acompanhamos o surgimento de novas folhas, uma vez que a espécie é semidecídua e nem sempre foi possível acompanhar o desenvolvimento de novos brotos com eficácia). As observações foram realizadas sempre pela mesma pessoa para reduzir variações subjetivas na avaliação das fenofases, e foram realizadas a cada três dias, no período entre Julho de 2011 e Janeiro de 2012.

2.5. Medidas meteorológicas

Um indivíduo de *Caesalpinia peltophoroides* em cada ponto de coleta foi equipado com um sensor de temperatura e umidade (HOBO U23-001, Onset Computer Corporation), coletando dados a cada 10 minutos e instalados sempre na direção sul, a três metros de altura. Foram instalados 18 equipamentos em Agosto, 28 em Setembro e 3 em Outubro. Durante o período de coleta quatro equipamentos foram perdidos ou roubados e não repostos.

Utilizando os dados coletados nós calculamos as medidas de temperatura – média diária, média noturna (entre 18 horas e 6 horas), amplitude térmica (diferença entre a temperatura máxima e a mínima registrada no dia), máxima e mínima – e de umidade relativa e absoluta, esta última calculada da seguinte maneira:

$$e = RH * E / 100$$

$$E = 6,1078 * \text{EXP}((17,0809 * T) / (234,175 + T))$$

$$a = e / (0,00462 * (273 + T))$$

onde e = pressão do vapor d'água, RH = umidade relativa, E = pressão do vapor d'água saturado, T = temperatura, a = umidade absoluta.

2.6. Análises

Apresentamos aqui um diagrama de como foram realizadas as análises apresentadas neste trabalho, para maior compreensão (Figura 2).

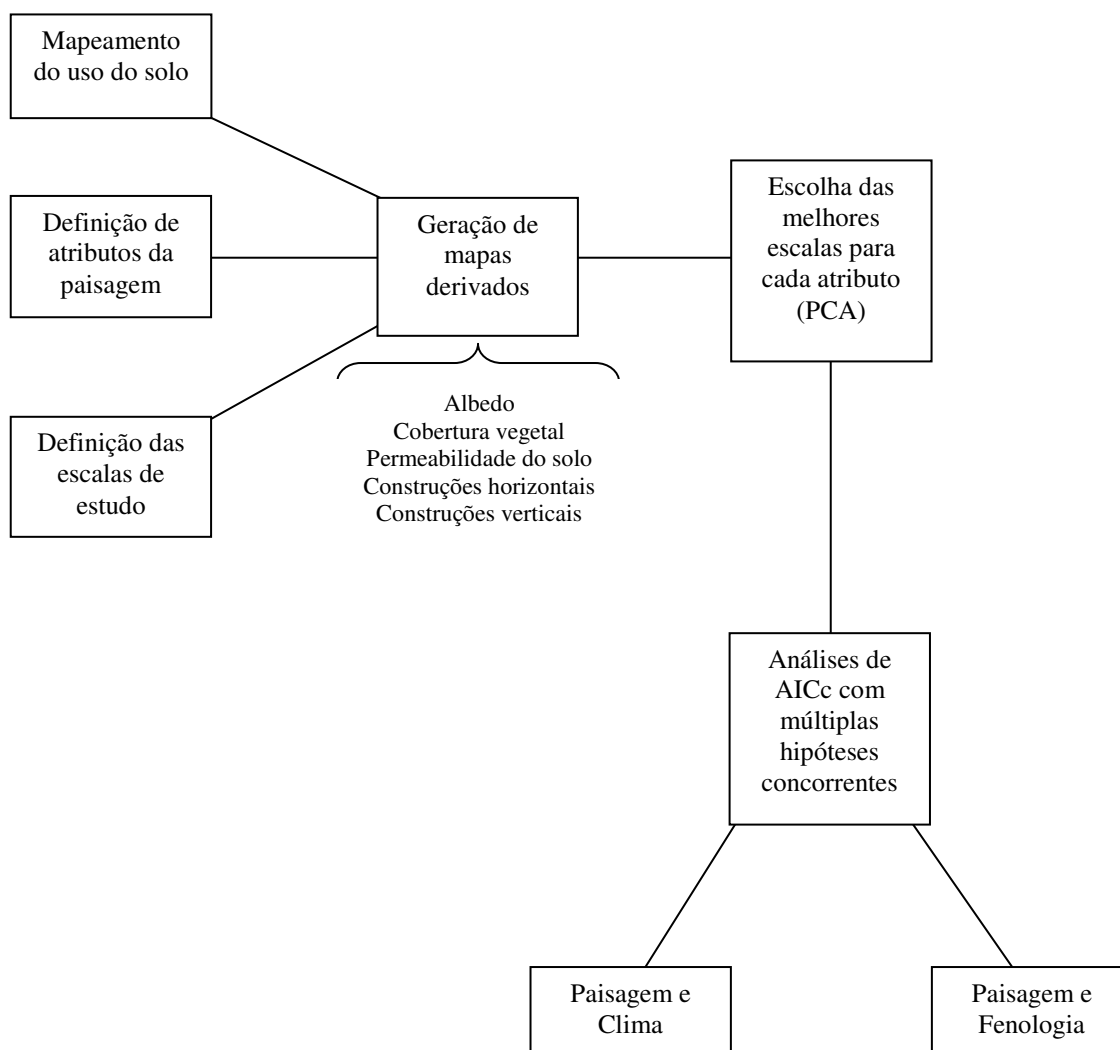


Figura 2 – Diagrama das etapas realizadas para o desenvolvimento da nova metodologia de análise da urbanização.

2.6.1. Mapeamento

O mapeamento da cobertura de uso e ocupação do solo da área urbana de Campinas foi realizado na escala 1:10.000. Calculamos um buffer de 2 km de raio a partir de cada ponto de coleta de dados fenológicos, utilizando imagens de alta resolução (~ 1 m) fornecidas pelo Google Earth, pelo OpenLayer disponível no Quantum Gis 1.8 (Quantum GIS Development Team 2012), onde realizamos o mapeamento. Consideramos as classes apresentadas com maior detalhe no Material Suplementar 2.

2.6.2. Análises na escala da paisagem em múltiplas escalas

Escolhemos cinco atributos da paisagem que são importantes para o clima urbano: albedo, cobertura vegetal, permeabilidade do solo, densidade de construções horizontais e densidade de construções verticais. Seguindo o mesmo método utilizado por Rayfield et al. (2010) e Muhlnner et al. (2010), atribuímos pesos a cada um desses atributos da paisagem (Tabela 1). A partir desses valores, atribuímos os pesos adequados para cada categoria em cada classe de uso do solo (Material Suplementar 1).

Tabela 1: Características da paisagem e seus custos para avaliação da relação entre a paisagem, clima e fenologia.

Parâmetros	Muito baixo	Baixo	Intermediário	Alto	Muito alto
Albedo	1	25	50	75	100
Permeabilidade do solo	10	200	300	400	500
Cobertura Vegetal	2	20	40	60	80
Densidade de construções horizontais	7	14	21	28	35
Densidade de construções verticais	350	650	700	850	1000

Para analisar os efeitos da paisagem sobre as variáveis resposta (clima e fenologia), foram definidas paisagens virtuais circulares ao redor dos pontos de coleta dos dados fenológicos, com as seguintes escalas (i.e. tamanhos do raios): 50, 100, 250, 500, 1000, 1500 e 2000 metros. O mapa de uso e cobertura do solo derivou os cinco mapas citados anteriormente, na resolução espacial de 5 m. Utilizando o software GRASS GIS 6.4.3 (GRASS Development Team 2012) os pesos foram atribuídos para cada aspecto da paisagem. O passo seguinte foi utilizar a função `r.neighbors` do GRASS para estimar a média de cada um dos cinco parâmetros para cada escala. Com isto, para cada parâmetro (por exemplo albedo), obtivemos um mapa em formato matricial para cada escala (50 a 2000 m, indicadas anteriormente). Por fim, utilizando a função `v.what.rast` do GRASS foram obtidas as estimativas para cada um dos cinco parâmetros, e para cada escala por ponto de amostragem dos dados de clima e fenologia. As informações foram organizadas em formato tabular, e exportada em formato `.dbf` para serem lidas no programa de estatística R 2.15.3 (R Core Team, 2013).

2.7. Análises Estatísticas

Para selecionar as escalas espaciais (variáveis explanatórias) de cada atributo da paisagem que melhor explicasse os padrões do clima urbano e da fenologia (variáveis resposta) das espécies estudadas utilizamos Análises de Componentes Principais (PCA). Após essa seleção correlacionamos a paisagem com o clima e com a fenologia utilizando Correlações de Pearson. Também criamos Modelos Lineares Generalizados (GLM) relacionando cada aspecto da paisagem com o clima e também com as fenofases de cada espécie. Os modelos foram selecionados e avaliados com base no Critério de Informação de Akaike Corrigido (AICc), utilizando o pacote “bbmle” no Software R 2.15.3 (R Core Team 2013). O melhor modelo foi o que apresentou o menor valor de AICc e também os modelos com $\Delta AIC \leq 2$ (Burnham & Anderson 1998).

3. Resultados

O mapa de uso do solo gerado em nosso mapeamento é mostrado na Figura 3. Criamos vários buffers em diferentes escalas para cada atributo da paisagem urbana, verificando quais são as melhor relacionadas com o clima e com a fenologia para cada ponto de coleta de dados fenológicos (Figura 4). Esses buffers geraram dados que foram estudados através de Análises de Componentes Principais (PCA) e indicaram que as seguintes escalas são as mais adequadas para cada variável de paisagem: albedo = 50 m, cobertura vegetal = 2000 m, permeabilidade do solo = 1000 m, densidade de construções horizontais = 500 m e densidade de construções verticais = 500 m. Com isto o que podemos observar é que para alguns parâmetros da paisagem a escala que mais importa é a escala fina (p.ex. 50 m para albedo), porém outras são escalas intermediárias (500 ou 1000 m), e outras mais amplas, como o caso da vegetação (2000 m).

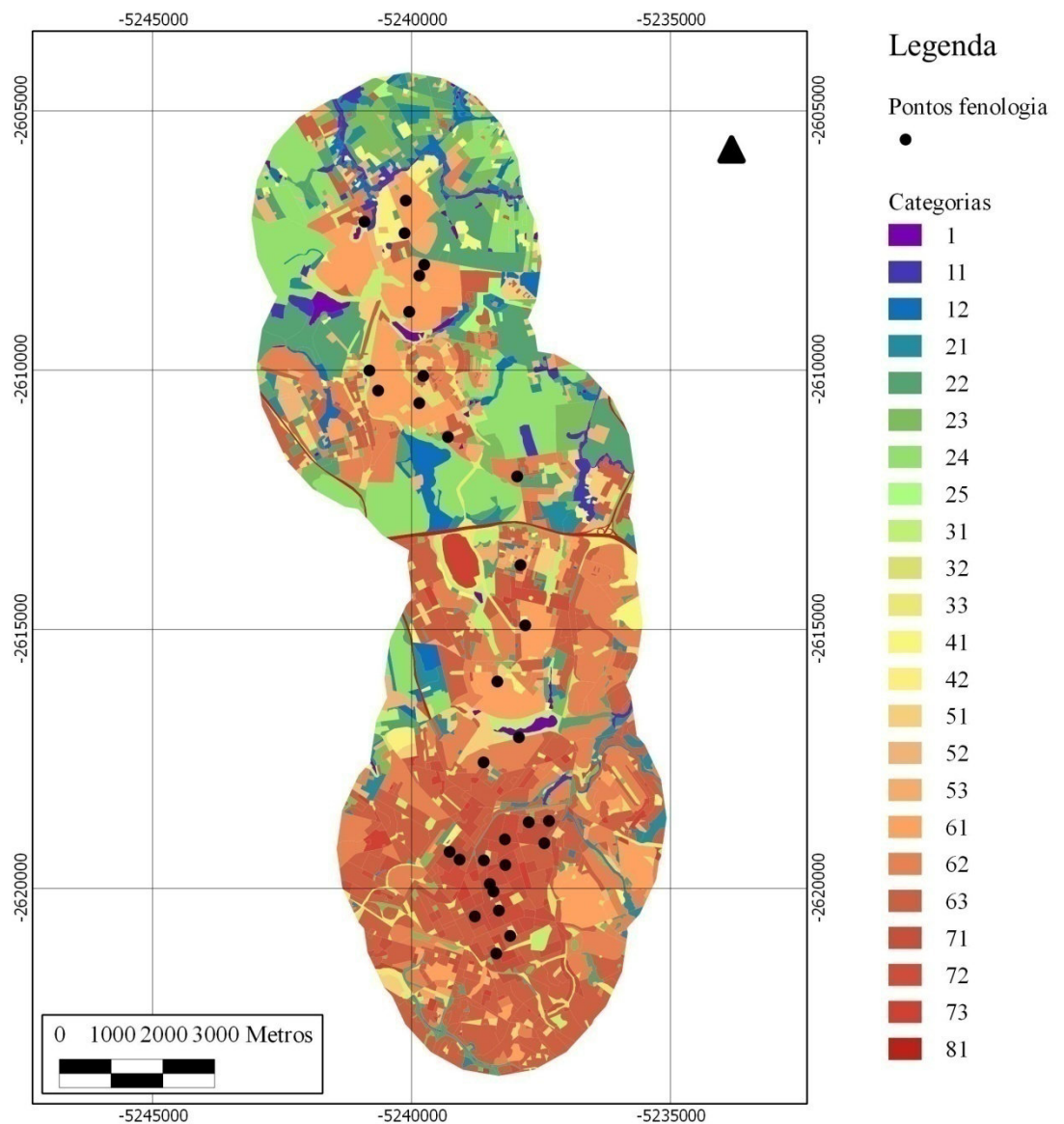


Figura 3 – Mapa de uso do solo da região estudada em Campinas, SP, Brasil. O gradiente de cores representa as categorias apresentadas na Tabela 1 do Material Suplementar, cores quentes estão associadas à cobertura e uso do solo com nível mais elevado de urbanização, enquanto cores frias representam as classes naturais, como água ou vegetação. Os pontos pretos representam cada ponto de coleta fenológica. O plano de fundo é uma imagem de satélite fornecida pelo Google Earth, disponível no OpenLayer do Qauntum Gis 1.8.

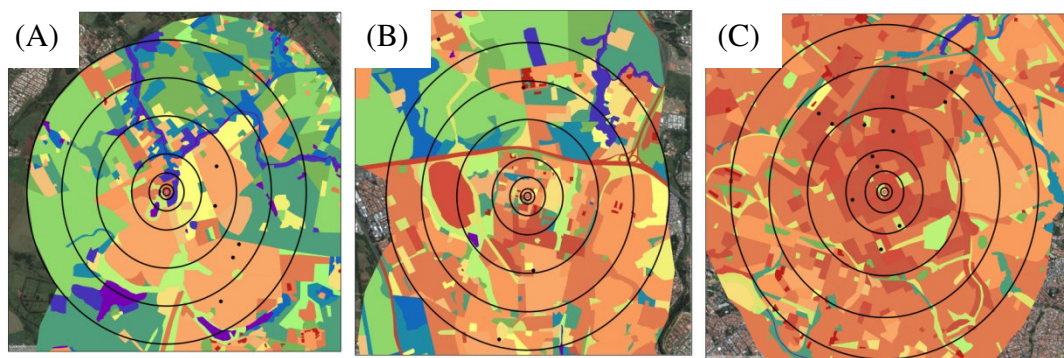


Figura 4 – Escalas de 50, 100, 250, 500, 1000, 1500 e 2000 metros em um ponto de coleta com (a) baixo nível de urbanização, (b) médio nível de urbanização e (c) alto nível de urbanização. Cores quentes estão associadas à cobertura e uso do solo com nível mais elevado de urbanização, enquanto cores frias representam as classes naturais, como água ou vegetação.

Os resultados das correlações de Pearson de cada aspecto da paisagem com as médias e desvios padrão do clima são mostrados nos Materiais Suplementares 3 e 4. Os resultados mostraram que cobertura vegetal e permeabilidade do solo possuíram altas correlações com as variáveis temperatura noturna, temperatura mínima e umidade relativa. Os resultados do Critério de Informação de Akaike corrigido são apresentados na tabela 2.

Tabela 2: Modelos selecionados segundo critério de Akaike (AIC) para explicar o clima urbano de três espécies arbóreas urbanas, no município de Campinas, SP, Brasil. Apenas modelos com $\Delta AIC \leq 2$ são apresentados. Os wAICc cumulativos são apresentados para cada variável climática em itálico e negrito. Nos casos em que o Modelo Nulo foi selecionado, nenhum outro modelo é apresentado para a mesma variável resposta.

Tabela 2 (1/2)

Variável climática	Aspectos da paisagem	DF	$\Delta AICc$	wAICc
Temperatura mínima	Cobertura vegetal (2000m)	3	0	0,3877
	Permeabilidade do solo (1000m)	3	0,1	0,3653
	Densidade de construções verticais (500m)	3	1,9	0,1504
				<i>0,9034</i>
Amplitude térmica	Permeabilidade do solo (1000m)	3	0	0,45879
	Densidade de construções verticais (500m)	3	1,2	0,24719
	Densidade de construções horizontais (500m)	3	1,4	0,23301
				<i>0,93899</i>
Temperatura diurna	Modelo Nulo	2	0,7	<i>0,1838</i>
Temperatura máxima	Densidade de construções horizontais (500m)	3	0	0,4742
	Densidade de construções verticais (500m)	3	1,9	0,1823
	Permeabilidade do solo (1000m)	3	2	0,1764
				<i>0,8329</i>

Tabela 2 (2/2)

Temperatura média	Modelo Nulo	2	0	0,3213
Temperatura noturna	Permeabilidade do solo (1000m)	3	0	0,54656
	Cobertura vegetal (2000m)	3	0,5	0,42273
				0,96929
Umidade absoluta	Densidade de construções horizontais (500m)	3	0	0,621
	Permeabilidade do solo (1000m)	3	2	0,2242
				0,8452
Umidade relativa	Cobertura vegetal (2000m)	3	0	0,4063
	Permeabilidade do solo (1000m)	3	0,1	0,378
	Densidade de construções horizontais (500m)	3	1,5	0,1881
				0,9724

Os resultados das correlações de Pearson de cada aspecto da paisagem com as médias e desvios padrão das fenofases botão, antese, brotamento e desenvolvimento foliar das três espécies estudadas são mostrados nos Materiais Suplementares 5 e 6. Não encontramos altas correlações com *C. peltophoroides*, mas a densidade de construções verticais foi altamente correlacionada com as fenofases reprodutivas de *T. chrysotricha*. Na espécie *T. tipu* encontramos altas correlações entre densidade de construções verticais e permeabilidade do solo para as fenofases botão e desenvolvimento foliar. Os resultados do Critério de Informação de Akaike corrigido são apresentados na tabela 3.

Tabela 3: Modelos selecionados segundo critério de Akaike (AIC) para explicar a fenologia de três espécies arbóreas urbanas, no município de Campinas, SP, Brasil. Apenas modelos com ΔAIC (ΔAIC_c) < 2 são apresentados. Os $wAIC_c$ cumulativos são apresentados para cada fenofase de cada espécie em itálico e negrito. Nos casos em que o Modelo Nulo foi selecionado, nenhum outro modelo é apresentado para a mesma variável resposta.

Tabela 3 (1/2)

Espécie	Fenofase	Modelos	df	ΔAIC_c	$wAIC_c$
<i>C. peltothoroides</i>	Botão	Modelo Nulo	2	0	<i>0,357</i>
	Antese	Modelo Nulo	2	0	<i>0,311</i>
	Broto	Modelo Nulo	2	0	<i>0,383</i>
	Desenvolvimento Foliar	Modelo Nulo	2	0	<i>0,391</i>
<i>T. chrysotricha</i>		Densidade de construções verticais (500m)	3	0	0,5755
	Botão	Albedo (50m)	3	2	0,2109
					<i>0,7864</i>
	Antese	Densidade de construções verticais (500m)	3	0	<i>0,6279</i>
	Broto	Modelo Nulo	2	0	<i>0,379</i>
	Desenvolvimento Foliar	Modelo Nulo	2	0	<i>0,309</i>

Tabela 3 (2/2)

	Botão	Densidade de construções horizontais (500m)	3	0	0,9423
	Antese	Densidade de construções horizontais (500m)	3	0	0,4122
		Permeabilidade do solo (1000m)	3	1,6	0,1856
<i>T. tipu</i>					0,5978
		Densidade de construções horizontais (500m)	3	0	0,5641
	Desenvolvimento Foliar	Permeabilidade do solo (1000m)	3	1,7	0,2421
					0,8061

4. Discussão e considerações finais

Ao obtermos as melhores escalas para cada atributo da paisagem, observamos que alguns parâmetros respondem em uma escala fina (p.ex. 50 m para albedo), outras em escalas intermediárias (500 ou 1000 m), e outras em mais amplas, como o caso da vegetação (2000 m). Semelhantemente a outros estudos ecológicos (Boscolo & Metzger 2009, Lyra-Jorge *et al.* 2010), cada atributo da paisagem foi explicado em uma escala distinta. Esse resultado aponta que a adoção de uma única escala e um único parâmetro da paisagem (como a porcentagem de área urbana de 2 km proposto por Jochner *et al.* (2011)), não é a melhor alternativa para explicar o clima e a fenologia das espécies estudadas em paisagens urbanas tropicais.

O Critério de Informação de Akaike Corrigido (AICc) indicou os principais modelos que podem explicar alterações climáticas, como ilhas de calor. A permeabilidade do solo e a densidade de construções verticais explicaram as variáveis de temperatura de maneira bastante satisfatória. A densidade de construções horizontais e cobertura vegetal explicaram parcialmente a temperatura, exceto nos casos de temperatura diurna e média, onde nenhum modelo pode ser escolhido. A umidade foi bem explicada pela permeabilidade do solo e densidade de construções. Portanto, as métricas permeabilidade do solo e densidade de construções (horizontais e verticais) foram as mais bem relacionadas a variações climáticas. Esses resultados concordam com Monteiro e Mendonça (2003), que afirmam que o clima urbano é derivado da substituição das paisagens naturais por ambientes construídos.

No caso das variáveis fenológicas, nenhum modelo pode explicar as fenofases relacionadas à espécie *Caesalpinia peltophoroides*, assim como para as fenofases vegetativas de *Tabebuia chrysotricha*. A densidade de construções verticais explicou satisfatoriamente as fenofases reprodutivas de *T. chrysotricha*. A densidade de construções horizontais foi o aspecto da paisagem que melhor explicou as fenofases reprodutivas e vegetativas de *Tipuana tipu*, além da permeabilidade do solo na fenofase de desenvolvimento foliar. A densidade de construções das cidades também apareceu como um importante fator influenciados da fenologia nos estudos de Zhang *et al.* (2004). Aparentemente a espécie *C. peltophoroides* não é uma boa espécie indicadora de alterações e *T. tipu* é, entre as espécies estudadas, a que melhor responde a alterações na estrutura das cidades, resultado similar ao encontrado por Jochner *et al.* (2013) ao analisar a relação entre o clima e a fenologia das mesmas espécies na mesma área.

Neste estudo trouxemos uma nova perspectiva de análise integrando paisagem, clima e fenologia, uma vez que analisamos múltiplas escalas. O desenvolvimento de novas maneiras de avaliação do clima urbano e da fenologia em áreas tropicais é de grande importância devido a características diferenciadas desse tipo de ambiente. Esperamos que nosso estudo possa ser aprofundado, para um maior entendimento do fenômeno de ilhas de calor e que estimule novas pesquisas relacionadas a análises em ambientes tropicais.

5. Bibliografia

- Abreu-Harbich, L. V.; Labaki L. C.; Matzarakis, A. 2013. Thermal bioclimate in idealized urban street canyons in Campinas, Brazil. **Theor Appl Climatol**. *Online first*. DOI 10.1007/s00704-013-0886-0.
- Alberti M, Marzluff JM, Shulenberger E, Bradley G, Ryan C, Zumbrennen C. 2003. Integrating Humans into Ecology: Opportunities and Challenges for Studying Urban Ecosystems. **BioScience**, 53:1169-1179.
- Ayoade, J. O. 1991. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 3. ed. Rio de Janeiro, Ed. Bertrand.
- Boscolo D.; Metzger J. P. 2009. Is bird incidence in Atlantic forest fragments influenced by landscape patterns at multiple scales? **Landscape Ecol** 24:907–918. DOI 10.1007/s10980-009-9370-8.
- Burnham, K. P.; Anderson, D. R. 1998. **Model selection and interface: a practical information-theoretic approach**. Springer-Verlag, New York.
- Conti, J. B. **Clima e meio ambiente**. 4. ed. São Paulo, Ed. Atual, 1998.
- Corte, V. B.; Borges, E. E. L.; Ventrella, M. C.; Leite ITA, Braga AJT. 2008. Histochemical aspects of reserves mobilization of *Caesalpinia peltophoroides* (Leguminosae) seeds during germination and seedlings early growth. **Revista Árvore** 32: 641–650.
- Defila, C.; Clot, B. 2001. Phytophenological trends in Switzerland. **Inter J Biometeorol**, 45:203-207.
- Dose, V.; Menzel, A. 2006. Bayesian correlation between temperature and blossom onset data. **Global Change Biology**, 12:1451-1459.
- Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry. **BBCH Monograph** (Ed: Meier, U.), 2 ed., 2001. Disponível em: <<http://syntechresearch.hu/sites/default/files/publikaciok/bbch.pdf>>. Acesso em Jan. 2011.
- GRASS Development Team. 2012. **Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software**, Version 6.4.3. Open Source Geospatial Foundation. <http://grass.osgeo.org>
- Hart, M. A.; Sailor, D. J. 2009. Quantifying the influence of land-use and surface characteristics on spatial variability in the urban heat island. **Theor Appl Climatol** 95:397–406. DOI 10.1007/s00704-008-0017-5.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE Cidades**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em Ago. 2010.

- Jochner, S.; Beck, I.; Behrendt, H.; Traidl-Hoffmann, C.; Menzel, A. 2011. Effects of extreme spring temperatures on urban phenology and pollen production: a case study in Munich and Ingolstadt. **Climate Research** 49: 101–112.
- Jochner, S.; Alves-Eigenheer, M. A.; Menzel, A.; Morellato, L. P. C. 2013. Using phenology to assess urban heat islands in tropical and temperate regions. **Int. J. Climatol.** *Online first*. DOI: 10.1002/joc.3651.
- Lombardo, M. A. **Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo, Ed. Hucitec. 1985.
- Lorenzi, H. **Árvores Brasileiras: Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Instituto Plantarum, Nova Odessa, 3 ed., v. 1. 2000.
- Luo Z, Sun OJ, Ge Q, Xu W, Zheng J. 2007. Phenological responses of plants to climate change in an urban environment. **Ecological Research** 22: 507–514
- Lyra-Jorge, M.; Ribeiro, M.; Ciocheti, G.; Tambosi, L.; Pivello, V. 2010. Influence of multi-scale landscape structure on the occurrence of carnivorous mammals in a human-modified savanna, Brazil. **European Journal of Wildlife Research**, 56:359–368.
- Menzel, A.; Sparks, T. H.; Estrella, N.; Koch, E.; Aasa, A.; Ahas, R.; Alm-Kubler, K.; Bissoli, P.; Braslavka, O.; Briede, A.; Chmielewski, F. M. Crepinsek, Z.; Curnel, Y.; Dahl, A.; Defila, C.; Donnelly, A.; Filella, Y.; Jatczak, K.; Mage, F.; Mestre, A.; Nordli, O.; Peñuelas, J.; Pirinen, P.; Remisová, V.; Scheifinger, H.; Striz, M.; Susnik, A.; van Vliet, A. J. H.; Wielgolaski, F. E.; Zach, S.; Zust, A. 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. **Global Change Biology** 12: 1969–1976.
- Mimet, A.; Pellissier, V.; Quénot, H.; Aguejdad, R.; Dubreuil, V.; Rozé, F. 2009. Urbanisation Induces Early Flowering: Evidence from *Platanus Acerifolia* and *Prunus Cerasus*. **Inter J Biometeorol**, v. 53, p. 287-298.
- Monteiro, C. A. F.; Mendonça, F. 2003. **Clima Urbano**. Ed. Contexto, São Paulo.
- Mühlner, S., Kormann, U., Schmidt-Entling, M.H., Herzog, F. & Bailey, D. 2010. Structural versus functional habitat connectivity measures to explain bird diversity in fragmented orchards. **Journal of Landscape Ecology** 3: 52-63.
- Pezzuto, C. C.; Labaki, L. C.; Francisco Filho, L. L. 2004. Air Temperature and Urban Form Studies in Open Spaces. The Case of Campinas, Brazil. **Plea2004** - The 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Eindhoven, The Netherlands.
- Quantum GIS Development Team. 2012. **Quantum GIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation. Available: <http://qgis.osgeo.org>.
- R Core Team. 2013. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.

Rayfield B, Fall A, Fortin MJ. 2010. The sensitivity of least-cost habitat graphs to relative cost surface values. **Landsc. Ecol.** 25:519–32.

Roetzer, T.; Wittenzeller, M.; Haeckel, H; Nekovar, J. 2000. Phenology in central Europe – differences and trends of spring phenophases in urban and rural areas. **Inter J Biometeorol**, v. 44, n. 2, p. 60-66.

Tavares, A. C.; Lastória, A. C. Comparações entre temperaturas extremas obtidas no centro e na periferia de Piracicaba-SP. **Geografia**, Rio Claro, v. 19, n. 1, p. 61-75. 1994.

United Nations Population Fund. **State of world population 2009**. 2009. Acesso em Fev.2011. Disponível em:

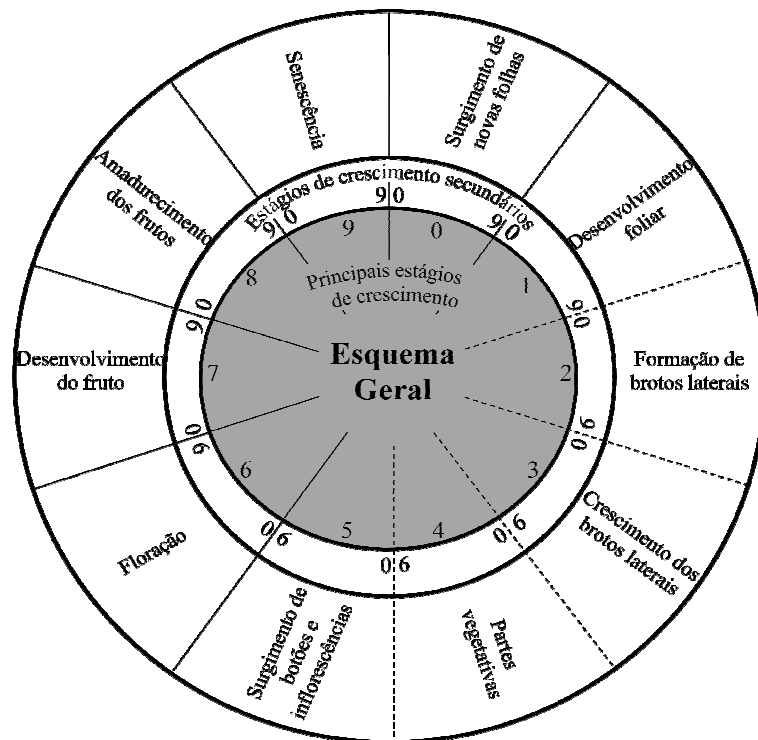
http://www.unfpa.org/webdav/site/global/shared/documents/publications/2009/state_of_world_population_2009.pdf

Zhang X, Friedl MA, Schaaf CB, Strahler AH, Schneider A. 2004. The footprint of urban climates on vegetations phenology. **Geophysical Research Letters** 31: L12209. DOI: 10.1029/2004GL020137.

MATERIAL SUPLEMENTAR ONLINE

Eigenheer *et al.* 2013. Índice de urbanização tropical para estudos fenológicos e de clima urbano.

Este material suplementar contém tabelas que complementam o entendimento de nosso trabalho.



Material Suplementar 1 – Subdivisão do ciclo de desenvolvimento das plantas em estágios principais e secundários segundo o método BBCH (adaptado de Meier, 2011)

Material Suplementar 2 – Descrição e peso de cada atributo (albedo, permeabilidade do solo, cobertura vegetal, densidade de construções verticais e densidade de construções horizontais) da paisagem para cada classe estudada.

M.S. 2 (1/2)

Classe	Descrição	Albedo	Permeab. solo	Cob. vegetal	Dens. const. vert.	Dens. const. horiz.
1	Corpos d`água	100	500	20	350	7
11	Fragmentos conservados	75	500	80	350	7
12	Fragmento perturbados	50	400	80	350	7
21	Pastagens e muita arborização	50	400	60	350	7
22	Pastagens e pouca arborização	50	300	40	350	7
23	Áreas abertas	50	300	2	350	7
24	Plantações	50	300	2	350	7
25	Solo exposto	1	200	2	350	7
31	Parques urbanos	50	300	80	350	7
32	Praças	25	200	40	350	14
33	Canteiros de estradas e ruas	25	200	2	350	7
41	Áreas com poucas construções (cerca de 10% da área)	50	300	20	350	14
42	Alta densidade de áreas verdes com poucas construções	50	400	60	350	14

M.S. 2 (2/2)

51	Baixa densidade de construções horizontais com muita arborização	50	300	60	350	21
52	Baixa densidade de construções horizontais com média arborização	25	300	40	350	21
53	Baixa densidade de construções horizontais com pouca arborização	1	200	2	350	21
61	Alta densidade de construções horizontais com muita arborização	50	200	40	350	28
62	Alta densidade de construções horizontais com média arborização	25	200	20	350	38
63	Alta densidade de construções horizontais com pouca arborização	1	10	2	650	35
71	Entre 30% e 50% de construções verticais	1	10	2	700	35
72	Entre 50 e 80% de construções verticais	1	10	2	850	35
73	Mais que 80% de construções verticais	1	10	2	1000	35
81	Estradas	1	10	2	350	7

Material Suplementar 3: Correlação de Pearson dos aspectos da paisagem com as médias das variáveis climáticas. Os valores em negrito indicam as correlações mais altas.

<i>Médias</i>	Albedo	Cobertura vegetal	Permeabilidade do solo	Densidade de construções horizontais	Densidade de construções verticais
T mínima	-0.40	-0.53	-0.53	0.41	0.48
Amplitude térmica	0.48	0.34	0.58	-0.55	-0.56
T diurna	0.32	-0.10	0.25	-0.32	-0.23
T máxima	0.38	0.04	0.41	-0.47	-0.41
T média	-0.09	-0.19	-0.12	0.04	0.24
T noturna	-0.55	-0.71	-0.72	0.60	0.62
U absoluta	0.44	0.36	0.50	-0.55	-0.39
U relativa	0.48	0.63	0.63	-0.60	-0.49

Material Suplementar 4: Correlação de Pearson dos aspectos da paisagem com os desvios padrão das variáveis climáticas. Os valores em negrito indicam as correlações mais altas.

<i>Desvio padrão</i>	Albedo	Cobertura vegetal	Permeabilidade do solo	Densidade de construções horizontais	Densidade de construções verticais
T mínima	0.61	0.63	0.69	-0.57	-0.57
Amplitude térmica	0.22	0.56	0.37	-0.27	-0.32
T diurna	0.03	0.14	0.18	-0.23	0.06
T máxima	-0.12	0.09	-0.05	0.10	0.26
T média	0.02	0.06	0.08	-0.11	0.12
T noturna	0.40	0.40	0.52	-0.50	-0.23
U absoluta	0.18	0.15	0.24	-0.34	-0.09
U relativa	-0.03	0.20	0.08	-0.06	0.15

Material Suplementar 5: Correlação de Pearson dos aspectos da paisagem com as médias das fenofases botão, antese, broto e desenvolvimento foliar. Os valores em negrito indicam as correlações mais altas.

	<i>Médias</i>	Albedo	Cobertura vegetal	Permeabilidade do solo	Densidade de construções horizontais	Densidade de construções verticais
Caesalpinia	Botão	-0.2	0.0	-0.1	0.0	0.0
	Antese	-0.3	0.0	-0.2	0.0	0.1
	Broto	-0.1	0.0	0.0	-0.2	0.0
	Desenv foliar	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.0
Tabebuia	Botão	-0.5	-0.2	-0.4	0.3	0.6
	Antese	-0.4	0.1	-0.3	0.2	0.6
	Broto	0.0	0.2	-0.1	0.0	0.2
	Desenv foliar	0.1	0.3	0.1	-0.3	-0.2
Tipuana	Botão	0.6	0.3	0.7	-0.8	-0.6
	Antese	0.3	0.1	0.4	-0.5	-0.4
	Broto	0.5	0.2	0.6	-0.7	-0.6

Material Suplementar 6: Correlação de Pearson dos aspectos da paisagem com os desvios padrão das fenofases botão, antese, broto e desenvolvimento foliar. Os valores em negrito indicam as correlações mais altas.

	<i>Desvio padrão</i>	Albedo	Cobertura vegetal	Permeabilidade do solo	Densidade de construções horizontais	Densidade de construções verticais
Caesalpinia	Botão	-0.2	0.0	-0.1	0.0	0.0
	Antese	-0.3	0.0	-0.2	0.0	0.1
	Broto	-0.1	0.0	0.0	-0.2	0.0
	Desenv foliar	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.0
Tabebuia	Botão	-0.5	-0.2	-0.4	0.3	0.6
	Antese	-0.4	0.1	-0.3	0.2	0.6
	Broto	0.0	0.2	-0.1	0.0	0.2
	Desenv foliar	0.1	0.3	0.1	-0.3	-0.2
Tipuana	Botão	0.6	0.3	0.7	-0.8	-0.6
	Antese	0.3	0.1	0.4	-0.5	-0.4
	Desenv foliar	0.5	0.2	0.6	-0.7	-0.6

Capítulo 3

Detecção de mudança em séries históricas de temperatura através de análises bayesianas

Alves-Eigenher, M. A.^{1,3}; Jochner, S.²; Morellato, L. P. C.¹; Ribeiro, M. C.³; Menzel, A.²

¹ Laboratório de Fenologia, Departamento de Botânica, Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro (SP), Brasil

² Department of Ecology and Ecosystem Management, Ecoclimatology, Technische Universitat Munchen, Freising, Germany

³ Laboratório de Ecologia Espacial e Conservação, Departamento de Ecologia, Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro (SP), Brasil

Resumo: O estudo das mudanças no clima tem ganhado importância no Brasil devido à vulnerabilidade das cidades e da agricultura a enchentes e secas extremas. A estatística bayesiana tem se mostrado uma ferramenta bastante prática e eficiente para análise de séries históricas. Esta é feita através da estimativa Bayesiana de funções não paramétricas e comparação de modelos (linear, constante ou de ponto de mudança), que indicam o padrão das mudanças e seu melhor descritor. O objetivo deste trabalho é avaliar a evolução climática da região de Campinas, Sudeste do Brasil, buscando responder as seguintes questões: (i) Existe um ponto de mudança para a região de Campinas? (ii) Qual é a tendência climática da região de Campinas? Analisamos séries históricas de temperaturas mínima, média e máxima de cinco municípios do Estado de São Paulo, com ao menos cinquenta anos de duração e que pertencessem a mesma região climática de Campinas. Os resultados indicam uma tendência de aumento da temperatura a partir da década de setenta, período de grande expansão urbana, industrial e canavieira na região. A maioria dos pontos de mudança ocorreu de maneira dispersa entre 1970 e 1990, indicando maiores influências locais, ligadas ao desenvolvimento das cidades.

Palavras-chave: Ponto de mudança, Mudanças climáticas, Séries históricas, Tendência climática, Campinas.

1. Introdução

Mudança climática é definida como uma alteração no estado do clima que pode ser identificada através de testes estatísticos por mudanças nas médias e/ou na variabilidade de suas propriedades e que persistem por períodos longos como décadas ou mais (IPCC 2007). Essas alterações podem ocorrer por processos naturais que modificam o albedo planetário, como erupções vulcânicas (Robock 2000) ou por alterações antropogênicas persistentes na composição da atmosfera ou no uso do solo, como aumento dos gases do efeito estufa (IPCC 2007) e intensa urbanização (Kalnay & Cai 2003). Devido à importância da atividade humana nesse processo, o IV Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas (IPCC 2007) faz uma distinção entre as mudanças naturais e as antrópicas e define mudança climática como uma alteração no clima que é atribuída direta ou indiretamente à atividade humana.

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas também descreve seis diferentes cenários relacionados ao aumento da concentração de gases do efeito estufa na atmosfera (IPCC 2007). Todas as possibilidades indicam aumento da temperatura e aceleração na taxa de emissão de gases do efeito estufa, sendo que ao fim deste século o planeta deverá estar de 1.4°C a 5.4°C mais quente. Levando em conta as preocupações relativas ao aumento iminente da temperatura global, é de extrema importância identificar quando essas mudanças de temperatura ocorreram, a que atores estão relacionadas além de prever a tendência climática para os próximos anos.

Diversos estudos tem se dedicado a entender melhor a relação entre as mudanças globais do clima e atividades antrópicas (Vicent *et al.* 2005; Alexander *et al.* 2006; IPCC 2007, 2012; Nobre *et al.* 2007; Lapola *et al.* 2010; Yau & Hasbi, 2013). Neste contexto, a estatística bayesiana é bastante apropriada para esse tipo de análise, pois permite a realização de inferências sobre dados históricos como informações *a priori*, além de permitir ausências pontuais de dados, bastante comuns em séries históricas do clima (Hobbs 1997; Gelman *et al.* 2003).

A análise de dados climáticos permite uma maior compreensão dos cenários atual e futuro, o que auxilia na formulação de medidas de mitigação (IPCC 2007, 2012). A análise bayesiana tem sido utilizado com sucesso nessas análises, detectando mudanças, realizando reconstruções climáticas (Berliner *et al.* 2000; Katz 2002; Kim *et al.* 2009; Fischer *et al.* 2011) e recentemente em estudos que relacionam séries climáticas à séries fenológicas, buscando a relação entre alterações de temperatura e umidade e de respostas nas plantas (Dose & Menzel 2004, 2006; Schleip *et al.* 2006, 2008; Menzel *et al.* 2008).

A estatística bayesiana é bastante apropriada para análises de séries históricas, por permitir a inclusão de dados de estudos anteriores como informações a priori, além de permitir ausências pontuais de dados (Hobbs 1997; Gelman *et al.* 2003). Uma metodologia que vem sendo aplicada com sucesso é a localização do ponto de mudança (também denominado “change point”), que é o ponto aproximado onde ocorreu uma alteração no comportamento e tendência de determinada série histórica (Hoskins 2003; Beckage *et al.* 2007). Esta abordagem tem sido utilizada com sucesso recentemente para a análise de mudanças de tendência na temperatura e na fenologia de espécies de plantas temperadas (Dose & Menzel 2004, 2006; Menzel *et al.* 2008; Schleip *et al.* 2006, 2009).

Com o objetivo de colaborar para uma maior compreensão da evolução do clima em áreas urbanas esse estudo se propõe a verificar a existência e ocorrência de um ponto de mudança, assim como descobrir a tendência climática em Campinas e outras quatro cidades da mesma região climática do interior do estado de São Paulo, Brasil. A partir dos nossos resultados pretendemos determinar se as mudanças encontradas estão ligadas às alterações globais ou locais, como as oriundas da urbanização e de ilhas de calor.

2. Material e Métodos

2.1. Área de estudo

Para desenvolver o presente estudo, selecionamos a maior região metropolitana do interior de São Paulo, centrada na cidade de Campinas, e outras quatro cidades do interior do Estado de São Paulo, todas com no mínimo 50 anos de coleta de dados climáticos: Campinas (56 anos), Limeira (72 anos), Monte Alegre do Sul (67 anos), Piracicaba (95 anos) e Ribeirão Preto (69 anos) (Figura 1) e localizadas em uma mesma região climática, na transição entre o clima Cwa (tropical de altitude) e Aw (tropical com verão seco), segundo a classificação climática de Koeppen (CEPAGRI 2012). Os dados foram fornecidos pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) e pelo Posto Meteorológico da Escola Superior de Agricultura de Piracicaba (ESALQ/USP). O estudo de várias cidades é importante para aumentar a confiabilidade nos padrões observados, evitando possíveis anomalias locais, como alterações físicas próximas às estações meteorológicas. Maiores informações sobre as cidades estudadas (população, área, localização geográfica das estações) podem ser encontradas no Material Suplementar 1.

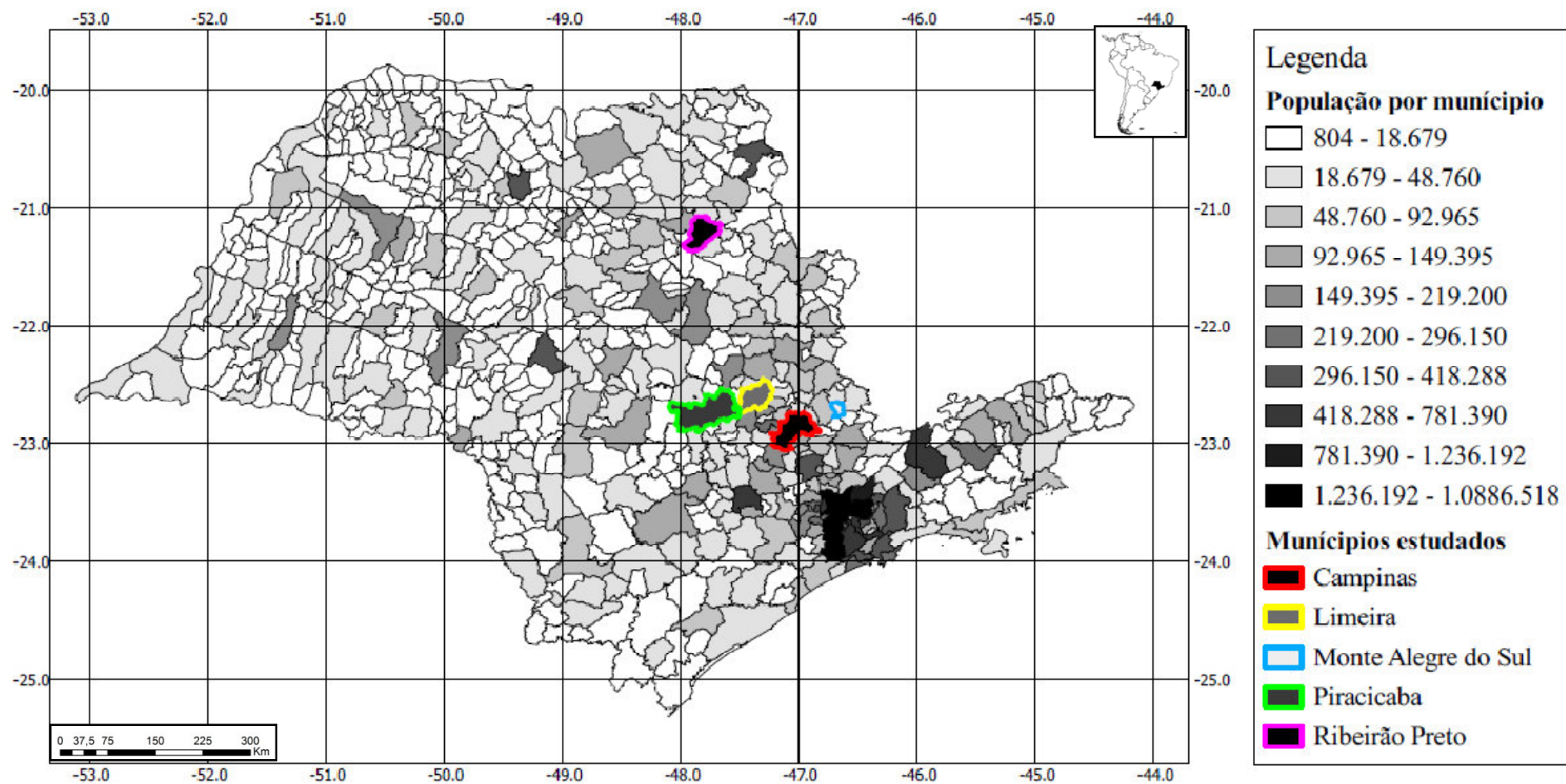


Figura 1: Municípios do Estado de São Paulo. Os tons de cinza indicam a população de cada município e os contornos coloridos mostram as cidades estudadas: Campinas, Limeira, Monte Alegre do Sul, Piracicaba e Ribeirão Preto.

2.2. Análises estatísticas

Utilizamos a abordagem bayesiana descrita por Dose e Menzel (2004), onde podem ser encontrados os detalhes computacionais e matemáticos utilizados em nossas análises. Essa abordagem foi desenvolvida para descrever alterações fenológicas e de temperatura ao longo dos anos (Schleip *et al.* 2006, 2009; Menzel *et al.* 2008), e pode ser utilizada para qualquer tipo de série histórica. A Teoria das Probabilidades de Bayes permite a comparação concorrente das probabilidades de diferentes modelos, atuando assim na seleção do modelo mais provável (Schleip *et al.* 2006). Neste trabalho selecionamos três modelos para descrever os dados de temperatura: modelo constante, modelo linear e modelo de ponto de mudança (Schleip *et al.* 2006).

O modelo constante ou nulo representa a hipótese de ausência de mudança nos dados, assumindo um comportamento funcional constante com uma taxa nula de tendência. Nesse caso, a interceptação e a tendência são estimadas através de uma regressão simples (Schleip *et al.* 2006). O modelo linear parte do pressuposto de que há uma tendência linear nos dados, que pode ser de aumento ou diminuição, em uma taxa constante de mudança (Dose & Menzel 2004). O modelo ponto de mudança é um refinamento natural do modelo linear, que pode ser representado através de seções lineares compostas. O caso mais simples seria um ponto de mudança separando duas seções lineares que se encontram em um determinado tempo (Dose & Menzel 2004; Schleip *et al.* 2006). Esse modelo é uma função triangular onde os valores funcionais, assim como o ponto de encontro, são variáveis do cálculo (Schleip *et al.* 2008).

Inicialmente calculamos as médias anuais de temperaturas mínimas, médias e máximas para as cinco cidades estudadas. A seleção do melhor modelo foi realizada utilizando essas médias anuais, do cálculo da probabilidade de cada modelo (constante, linear e ponto de mudança) através da teoria de probabilidades Bayesiana (detalhes dos cálculos envolvidos podem ser encontrados em Dose e Menzel 2004). A maior probabilidade indica o melhor modelo para descrever cada série. A teoria de probabilidades Bayesianas também descreve o comportamento funcional e a tendência para cada ano da série e, nos casos de modelo de ponto de mudança, fornece as probabilidades de mudança para cada série.

Portanto, após a seleção do melhor modelo, analisamos os dados gerados de modo a encontrar o ano de mudança (quando o melhor modelo foi o de ponto de mudança) e compreender o comportamento funcional e tendência para cada variável em cada cidade. No caso do melhor modelo ser o linear, realizamos também uma análise de regressão através do software R (R Development Core Team, 2012), para uma melhor compreensão da série

estudada. Para estipularmos o comportamento futuro das séries estudadas, calculamos as médias das tendências dos dez primeiros e dos dez últimos anos de cada série; e através de testes T de Student calculamos a tendência para cada série estudada.

3. Resultados

Todas as variáveis dos municípios estudados mostraram as maiores probabilidades para o modelo de ponto de mudança, com exceção da variável temperatura mínima da cidade de Campinas, que respondeu melhor ao modelo linear (Figura 2), com o modelo constante apresentando as menores probabilidades. O ano em que a probabilidade de mudança foi mais alta e a tendência de aumento por década são mostrados na Tabela 1. As tendências foram de aumento em quase todas as séries, sendo bastante significativas para as temperaturas média e máxima de Campinas, Limeira e Ribeirão Preto. Também encontramos tendências de queda significativas para as temperaturas mínimas de Limeira, Monte Alegre do Sul e Ribeirão Preto.

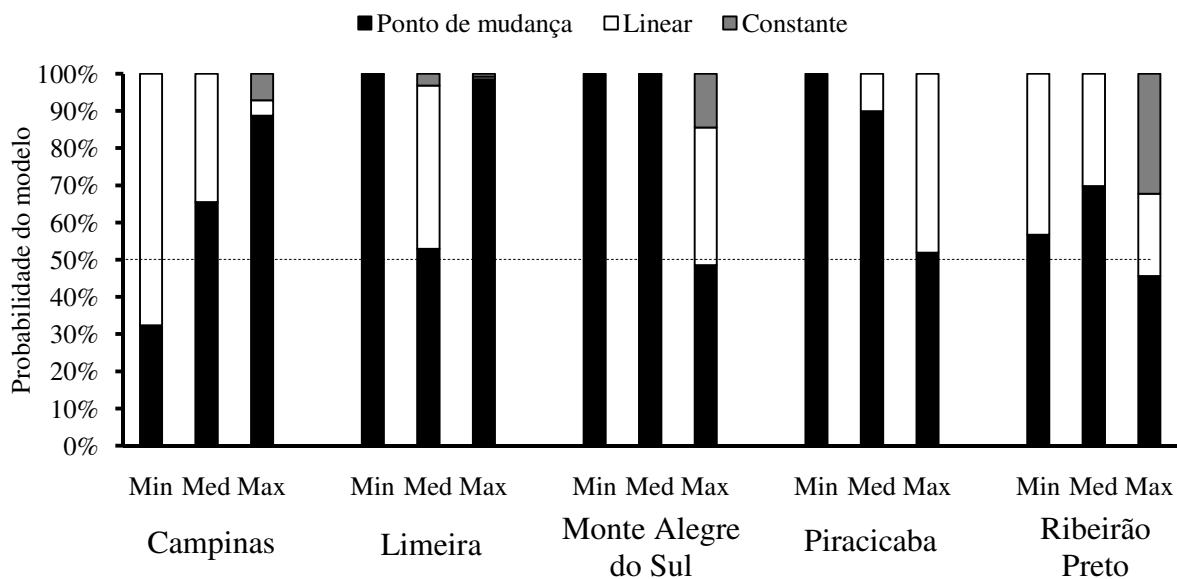


Figura 2: Probabilidades de ocorrência dos modelos de ponto de mudança, linear e constante para as séries de temperaturas mínima (Min), média (Med) e máxima (Max) para os municípios de Campinas, Limeira, Monte Alegre do Sul, Piracicaba e Ribeirão Preto.

Tabela 1: Análise do ponto de mudança, tendência e valor de p para temperaturas mínima, média e máxima de Campinas, Limeira, Monte Alegre do Sul, Piracicaba e Ribeirão Preto (interior do estado de São Paulo, Brasil).

Cidade	Variáveis	Ano	Tendência (°C/década)	Valor de p
Campinas	T. Mínima	-	0,14	0,2061
	T. Média	1968	0,28	p<<0,001
	T. Máxima	1968	0,19	p<<0,001
Limeira	T. Mínima	2006	-1,51	0.0096
	T. Média	2007	0,14	1.56e ⁻⁰⁵
	T. Máxima	1982	0,38	p<<0,001
Monte Alegre do Sul	T. Mínima	1991	-0,58	p<<0,001
	T. Média	1984	-0,21	p<<0,001
	T. Máxima	1953	0,03	2.78e ⁻⁰⁶
Piracicaba	T. Mínima	1976	0,46	0.0946
	T. Média	1976	0,26	0,613
	T. Máxima	1919	0,09	6.09e ⁻⁰³
Ribeirão Preto	T. Mínima	1985	-0,71	p<<0,001
	T. Média	1989	0,26	p<<0,001
	T. Máxima	1982	0,21	p<<0,001

Os anos dos pontos de mudança variaram bastante entre si, mesmo entre as variáveis de temperatura de um mesmo município. No entanto, quase todos os pontos de mudança ocorreram a partir do fim da década de 60. No município de Campinas o ano do ponto de mudança foi o mesmo para temperaturas média e máxima (1968). Em Limeira, a mudança das temperaturas mínima e média ocorreu no mesmo período (2006/2007), assim como em Piracicaba (1976). Ribeirão Preto apresentou os pontos de mudança de todas as variáveis na década de 80. Também foram encontrados dois outliers: o ponto de mudança das temperaturas máximas de Monte Alegre do Sul (1953) e de Piracicaba (1919).

Para uma maior compreensão da análise utilizada, usaremos o exemplo da variável temperatura mínima do município de Piracicaba. Na figura 3 é possível acompanhar (a) a

curva das probabilidades e a ocorrência do ponto de mudança em 1976, assim como (b) as alterações nas curvas do comportamento funcional e (c) tendência a partir do mesmo ano. As figuras referentes a todas as séries estudadas estão disponíveis nos Materiais Suplementares 2 (Campinas), 3 (Limeira), 4 (Monte Alegre do Sul), 5 (Piracicaba) e 6 (Ribeirão Preto).

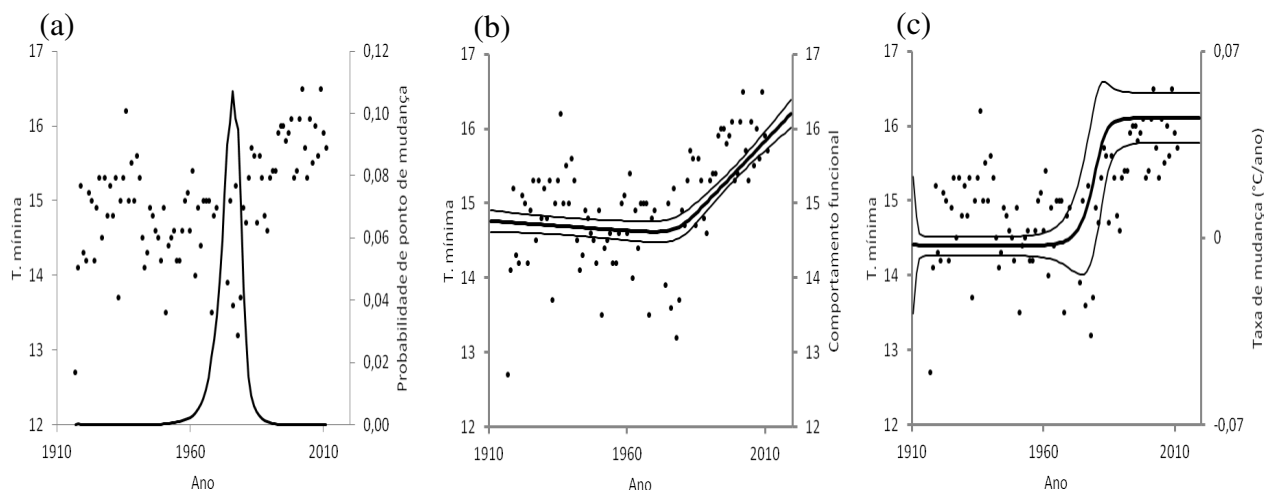


Figura 3 - Curvas referentes a variável temperatura mínima de Piracicaba (a) Probabilidade de ocorrência do ponto de mudança (a linha representa as probabilidades de ocorrência de ponto de mudança). (b) Comportamento funcional (a linha espessa representa o comportamento funcional e as linhas finas representam o desvio padrão). (c) Tendência ao longo dos anos (a linha espessa representa a taxa de mudança e os traços finos representam o intervalo de confiança).

Em relação a temperatura mínima de Campinas, que apresentou uma tendência de aumento linear ao longo dos anos estudados (Figura 4), a análise de regressão mostrou tendência bastante significativos ($r^2 = 0,6799$, P).

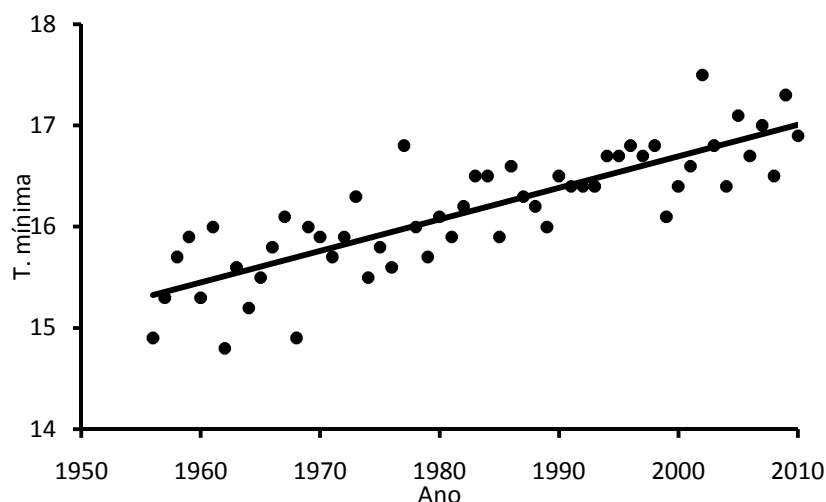


Figura 4: Regressão linear da temperatura mínima na cidade de Campinas, Brasil, no período de 1956 a 2010.

4. Discussão e Conclusões

As análises mostraram que houve uma mudança nas séries estudadas, com uma clara tendência a elevação das temperaturas média e máxima a partir de 1968. Segundo o IPCC (2007), no último século o aquecimento do planeta se deu em dois principais períodos, sendo que o último foi de 1976 a 2000, período que coincide com oito dos quinze pontos de mudança encontrados. Resultados similares também foram encontrados por Blain (2010) na mesma região, utilizando o Teste de Pettitt (Pettitt 1979).

Exceções quanto a este período de ponto de mudança para a região estudada foram observadas em alguns casos. Em Limeira, temperaturas mínima e média tiveram o ponto de mudança no final da série (2006 e 2007, respectivamente). No entanto, através do gráfico de probabilidade (Material Suplementar 3) da temperatura média, encontramos uma elevação na década de 70, que coincide com o pico de probabilidade da temperatura máxima, indicando um outro momento de mudança com menor impacto nessa série.

Em relação a Monte Alegre do Sul, a temperatura máxima teve seu ponto de mudança em 1953, ocorrendo anteriormente ao período detectado para as outras cidades e variáveis analisadas. No entanto, este município também foi o único com tendências significativas de queda das temperaturas mínima e média. Provavelmente essas diferenças são devido a essa cidade possuir uma população muito pequena quando comparada as outras áreas de estudo. Monte Alegre do Sul é também uma “Estância Hidromineral” e, portanto, investe fortemente no turismo ecológico (Prefeitura Municipal de Monte Alegre do Sul 2012), o que pode ser a causa para a tendência de queda das temperaturas.

Finalmente em Piracicaba, a temperatura máxima teve seu ponto de mudança ainda mais antecipado, no início da série (1919). No entanto, existe um ligeiro aumento na curva das probabilidades na década de 70 (Material Suplementar 5), quando ocorreram as mudanças nas séries de temperaturas mínimas e médias, o que indica um outro momento de mudança de menor impacto em um período similar ao da maioria das séries estudadas.

O aumento da urbanização no interior do estado de São Paulo pode estar relacionado às mudanças microclimáticas nas cidades, criação de ilhas de calor e conseqüentemente, aos pontos de mudança encontrados neste trabalho. As décadas de 70 e 80 foram um período importante para o interior do estado de São Paulo devido à descentralização industrial da capital, com destaque para as cidades localizadas ao longo dos principais eixos rodoviários, como Campinas, Limeira, Piracicaba e Ribeirão Preto (Lencioni 2003). Nesse mesmo período, houve um intenso investimento na cana de açúcar (principal cultivo na região estudada) no interior paulista, especialmente nas regiões de Piracicaba e Ribeirão Preto, devido ao incentivo do governo federal ao Programa Nacional do Alcool (Negri 1976).

Outros estudos testando a ocorrência de pontos de mudança em séries temporais de clima do Hemisfério Norte encontraram mudanças em épocas (anos) próximas aos pontos de mudança deste estudo. Mohr & Kunz (2012) encontraram pontos de mudança no início da década de 90 e por volta de 2005 para diversas regiões da Alemanha. Jiang (2011) encontrou pontos de mudança em 1979 e 1998 para a região norte da China. Finalmente, Schleip *et al.* (2009) analisou médias globais coletadas através de sondas na troposfera, e encontrou altas probabilidades de mudança em 1985 e 1995. Nas cidades brasileiras aqui estudadas não foi encontrado um ponto de mudança comum a todas as cidades, mas diversos pontos de mudança em um mesmo período (1970 a 1990). Esse resultado indica que a região pode ter sofrido alterações climáticas locais, que podem estar ligadas ao desenvolvimento das cidades estudadas ou ainda a outros tipos de mudanças (como alteração na estrutura da vegetação do entorno das áreas, por exemplo).

Em relação à análise das tendências para os próximos anos, encontramos correlações bastante significativas com o aumento da temperatura nas próximas décadas na região de Campinas, Brasil. No entanto, não encontramos tendências significativas de aumento da temperatura mínima em nenhuma das cidades estudadas, sendo que quatro delas apresentaram tendência à diminuição desta variável. Em relação à temperatura média, encontramos tendências altamente significativas de aumento de temperatura em três das cidades estudadas, com um aumento de aproximadamente 0,23°C por década. Monte Alegre do Sul apresentou

tendência de queda para essa variável. Todas as cidades apresentaram tendências altamente significativas de aumento da temperatura máxima, com um aumento médio de 0,18°C por década, sendo que Campinas, Limeira e Ribeirão Preto foram os com maiores tendências de aumento.

Blain *et al.* (2009, 2010) encontrou tendências opostas as encontradas neste trabalho para a mesma região e períodos similares, provavelmente devido a diferença de metodologia. No entanto, Dufek & Ambrizzi (2006) também encontraram uma tendência de elevação de temperatura mínima e máxima para o estado de São Paulo. Essas diferenças apontam a necessidade de maiores estudos para a identificação de tendências climáticas.

Nosso estudo mostrou que a região estudada apresenta vários pontos de mudança, o que pode potencialmente estar ligado a mudanças locais, como a intensa urbanização do interior do Estado São Paulo neste período. A localização dos pontos de mudança é muito importante para a compreensão da dinâmica climática do município, assim como de processos ecológicos dependentes do clima, como a fenologia de espécies vegetais e animais e movimentos de animais migratórios.

5. Referências Bibliográficas

- Alexander, L.V.; Zhang, X.; Peterson, T.C.; Caesar, J.; Gleason, B.; Tank, A.M.G; Haylock, M.; Collins, D.; Trevin, B.; Rahimzadeh, F.; Tagipou, A.; Rupa Kumar, K.; Revadekar, J.; Griffiths, G.; Vincent, L.; Stephenson, D.; Burn, J.; Aguillar, E.; Taylor, M.; New, M.; Zhai, P.; Rusticucci, M.; Vasquez-Aguirre, J.L. (2006) Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J Geophys Res* 111:1-22. doi: 10.1029/2005JD006290
- Beckage, B.; Joseph, L.; Belisle, P.; Wolfson, D. B.; Platt, W. J. (2007) Bayesian change-point analyses in ecology. *New Phytol* 174:456-467. doi: 10.1111/j.1469-8137.2007.01991.x
- Berliner, L. M.; Levine, R. A.; Shea, D. J. (2000) Bayesian climate change assessment. *J Climat* 13:3805–3820.
- Blain, G. C. (2010) Precipitação pluvial e temperatura do ar no Estado de São Paulo: periodicidades, probabilidades associadas , tendências e variações climáticas. Thesis, Universidade de São Paulo.
- Blain, G.C.; Picoli, M.C.A.; Lulu, J. (2009) Análise estatística das tendências de elevação nas séries anuais de temperatura mínima do ar no Estado de São Paulo. *Bragantia* 68:807- 815. doi: 10.1590/S0006-87052009000300030
- CEPAGRI / UNICAMP. Clima dos municípios paulistas. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>> Acesso em 12 Nov 2012.
- Dose, V.; Menzel, A. (2004) Bayesian analysis of climate change impacts in phenology. *Glob Change Biol* 10:259-272. doi: 10.1111/j.1529-8817.2003.00731.x
- Dose, V.; Menzel, A. (2006) Bayesian correlation between temperature and blossom onset data. *Glob Change Biol* 12:1451–1459. doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01160.x
- Dufek, A.S.; Ambrizzi, T. (2006) Variabilidade climática da temperatura no Estado de São Paulo. In: Congresso Brasileiro De Meteorologia. Florianópolis.
- Fischer, A. M.; Weigel, A. P.; Buser, C. M.; Knutti, R.; Liniger, M. A.; Schär, C.; Appenzeller, C. (2011) Climate change projections for Switzerland based on a Bayesian multi-model approach. *Int. J. Climatol*. doi: 10.1002/joc.3396
- Gelman A, Carlin J. B., Stern H. S., Rubin D. B. (2003). Bayesian data analysis. Chapman & Hall, Boca Raton
- Hobbs, B. F. (1997) Bayesian Methods for Analysing Climate Change and Water Resource Uncertainties. *J Environ Manag* 49:53-72.
- Hoskins B. J. (2003) Atmospheric processes and observations. *Phil Trans R Soc Lond* 361:1945–1960.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2012). Portal Cidades. <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1> Acesso em Novembro de 2012.

IPCC. (2007) *Climate Change: The Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge and New York

IPCC. (2012) *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Eds: Field, C. B.; Barros, V.; Stocker, T. F.; Qin, D.; Dokken, D. J.; Ebi, K. L.; Mastrandrea, M. D.; Mach, K. J.; Plattner, G. K.; Allen, S. K.; Tignor, M.; Midgley P. M.). Cambridge University Press, Cambridge New York

Jiang, S.; Ren, L.; Yong, B. Singh, V. P.; Yang, X. Yuan, F. (2011) Quantifying the effects of climate variability and human activities on runoff from the Laohahe basin in northern China using three different methods. *Hydrol Proces* 25:2492–2505. doi: 10.1002/hyp.8002

Kalnay, E.; Cai, M. (2003) Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature* 423:528-531.

Katz, R. W. (2002) Techniques for estimating uncertainty in climate change scenarios and impact studies. *Climat Res* 20:167-185.

Kim C, Suh M-S, Hong K-O. 2009. Bayesian changepoint analysis of the annual maximum of daily and subdaily precipitation over South Korea. *Journal of Climate* 22: 6741–6757.

Lapola, D. M.; Schaldach, R.; Alcamo, J; Bondeau, A.; Koch, J.; Koelking, C.; Priess, J. A. (2010) Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. *PNAS*, 107:3388-3393. doi: www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0907318107

Lencioni, S. (2003) *Cisão Territorial da Indústria e integração regional no estado de São Paulo*. In: Gonçalves, M.; Brandão, C.; Galvão, A. (orgs). *Regiões e Cidades, Cidades nas Regiões: O desafio Urbano – Regional*. Editora UNESP; São Paulo.

Menzel, A.; Estrella, N.; Heitland, W.; Susnik, A; Schleip, C.; Dose, V. (2008) Bayesian analysis of the species-specific lengthening of the growing season in two European countries and the influence of an insect pest. *Intern J Biometeorol* 52:209–218. doi: 10.1007/s00484-007-0113-8

Mohr, S.; Kunz, M. (2012) Recent trends and variabilities of convective parameters relevant for hail events in Germany and Europe. *Atmos Res* 123:211-228. doi: 10.1016/j.atmosres.2012.05.016

Negri, B. (1996) *Concentração e desconcentração industrial em São Paulo (1880-1990)*. Editora da Unicamp, Campinas.

Nobre, C. A.; Sampaio, G.; Salazar, L. (2007) Mudanças climáticas e Amazônia. *Cienc. Cult.* 59:22-27.

Pettitt, A. N. (1979) A non-parametric approach to the change-point problem. **J Appl Statist** 28:126-135.

Prefeitura Municipal De Campinas. 2012. <http://www.campinas.sp.gov.br/> Acesso em: Novembro de 2012.

Prefeitura Municipal De Limeira. 2012. <http://www.limeira.sp.gov.br/file/> Acesso em: Novembro de 2012.

Prefeitura Municipal De Monte Alegre Do Sul. 2012. <http://www.montealegredosul.sp.gov.br/> Acesso em: Novembro de 2012.

Prefeitura Municipal De Piracicaba. 2012. <http://www.piracicaba.sp.gov.br/goto/store/index.aspx?SID=Imagenet> Acesso em: Novembro de 2012.

Prefeitura Municipal De Ribeirão Preto. 2012. <http://www.ribeiraopreto.sp.gov.br/principal.php> Acesso em: Novembro de 2012.

R Core Team (2013). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0. <http://www.R-project.org/>.

Robock, A. (2000) Volcanic eruptions and climate. *Reviews of Geophysics* 38:191-219. doi: 10.1029/1998RG000054

Schleip, C.; Menzel, A.; Estrella, N.; Dose, V. (2006) The use of Bayesian analysis to detect recent changes in phenological events throughout the year. *Agric For Meteorol* 141:179–191. doi: 10.1016/j.agrformet.2006.09.013

Schleip, C.; Menzel, A.; Dose, V. (2008) Norway spruce (*Picea abies*): Bayesian analysis of the relationship between temperature and bud burst. *Agric For Meteorol* 148:631–643. doi: 10.1016/j.agrformet.2007.11..

Schleip, C.; Menzel, A.; Dose, V. (2009) Bayesian analysis of changes in Radiosonde Atmospheric Temperature. *Intern J Climatol* 29:629–641. doi: 10.1002/joc.1790

Vincent, L.A.; Peterson, T.C.; Barros, V.R.; Marino, M.B.; Rusticucci, M.; Carrasco, G.; Ramirez, E.; Alves, L.M.; Ambrizzi, T.; Berlato, M.A.; Grimm, A.M.; Marengo, J.A.; Molion, L.; Moncunill, D.F.; Rebello, E.; Anunciação, Y.M.T.; Quintana, J.; Santos, J.L.; Baez, J.; Coronel, G.; Garcia, J.; Trebejo, I.; Bidegain, M.; Haylock, M.R.; Karoly, D. (2005) Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960-2000. *J Climat*, 18:5011-5023. doi: 10.1175/JCLI3589.1

Yau, Y. H.; Hasbi, S. (2013) A review of climate change impacts on commercial buildings and their technical services in the tropics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18: 430-441. doi: 10.1016/j.rser.2012.10.035

MATERIAL SUPLEMENTAR ONLINE

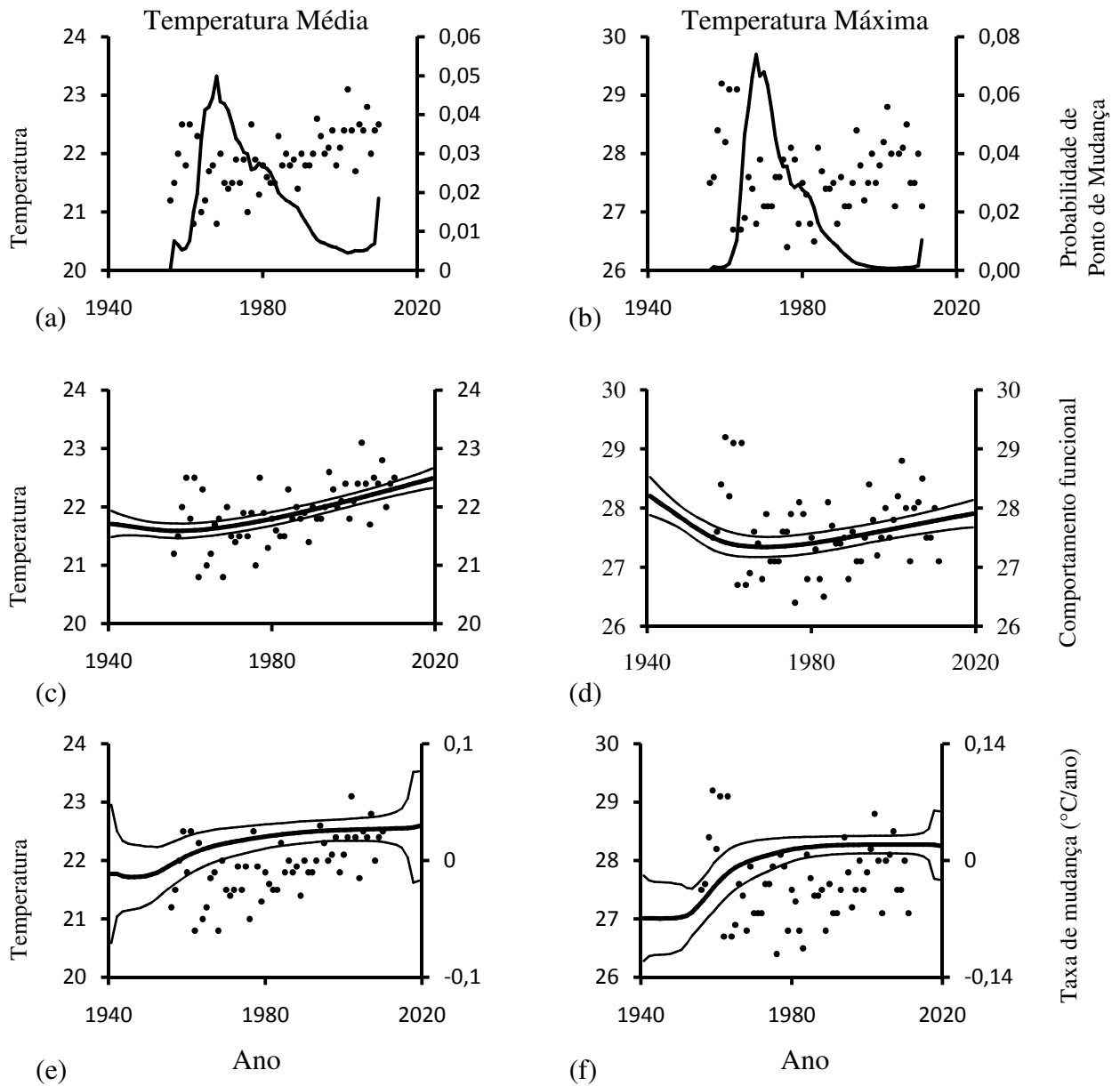
Eigenheer *et al.* 2013. Detecção de pontos de mudança em séries históricas de temperatura através de análises bayesianas. **Theoretical and Applied Climatology**.

Este material suplementar contém figuras e tabelas que complementam o entendimento de nosso trabalho:

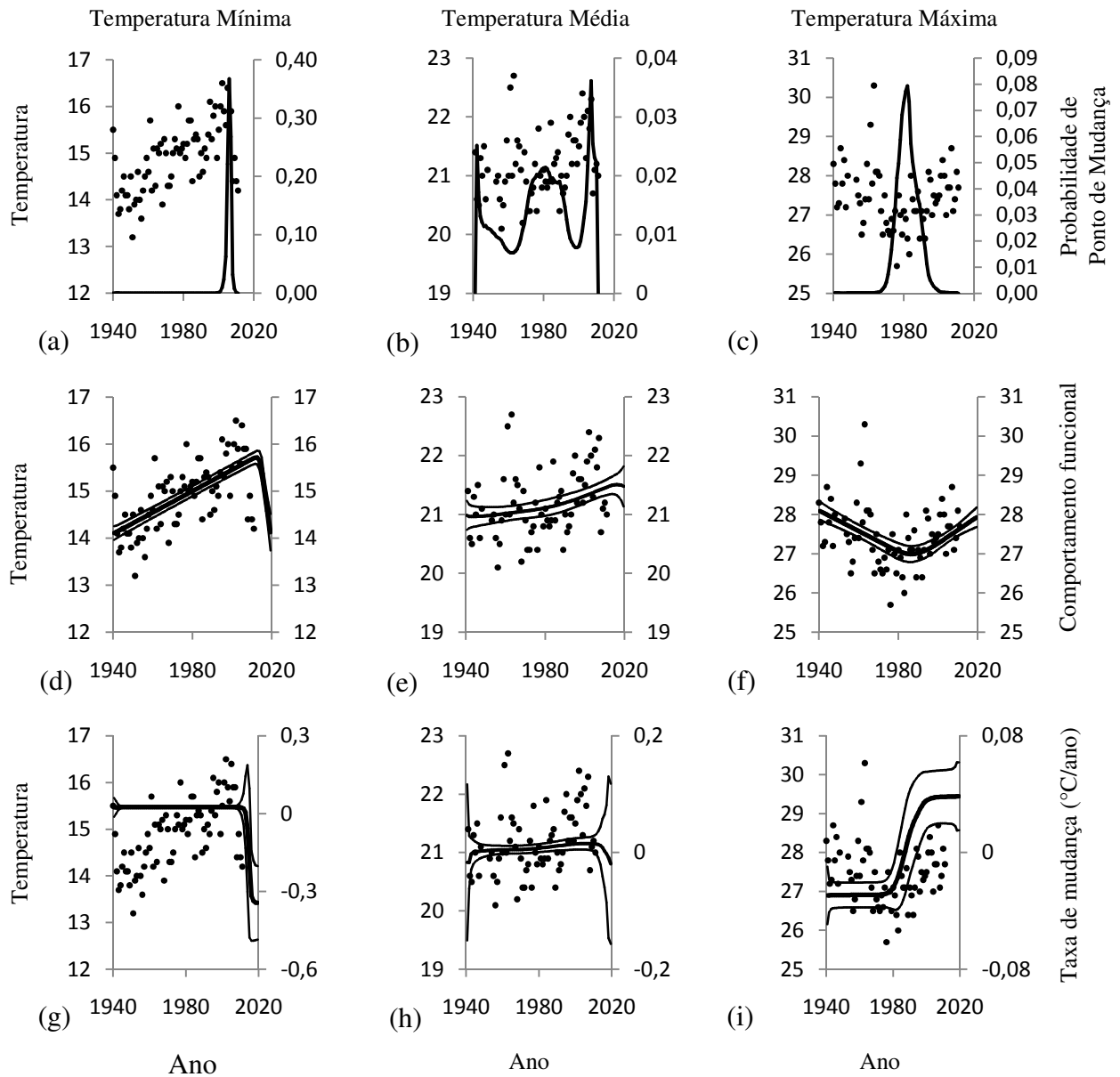
Material Suplementar 1 – Tabela de descrição referente ao período estudado, localização, população, área e altitude dos municípios de Campinas, Limeira, Monte Alegre do Sul, Piracicaba e Ribeirão Preto (IBGE 2010; Prefeitura Municipal de Campinas 2012; Prefeitura Municipal de Limeira 2012; Prefeitura Municipal de Monte Alegre Do Sul 2012; Prefeitura Municipal de Piracicaba 2012; Prefeitura Municipal de Ribeirão Preto 2012)

Municípios	Período das séries	Localização das estações	População (habitantes)	Área (km²)	Altitude (metros)
Campinas	1956-2011	22°54'S 47°05'W	1.064.669	800	680
Limeira	1940-2011	22°27'S 47°24'W	276.022	581	567
Monte Alegre do Sul	1945-2011	22°42'S 46°39''W	7.152	110	750
Piracicaba	1917-2011	22°42'S 47°38'W	364.571	1.376	528
Ribeirão Preto	1943-2011	21°11'S 47°48'W	604.682	651	545

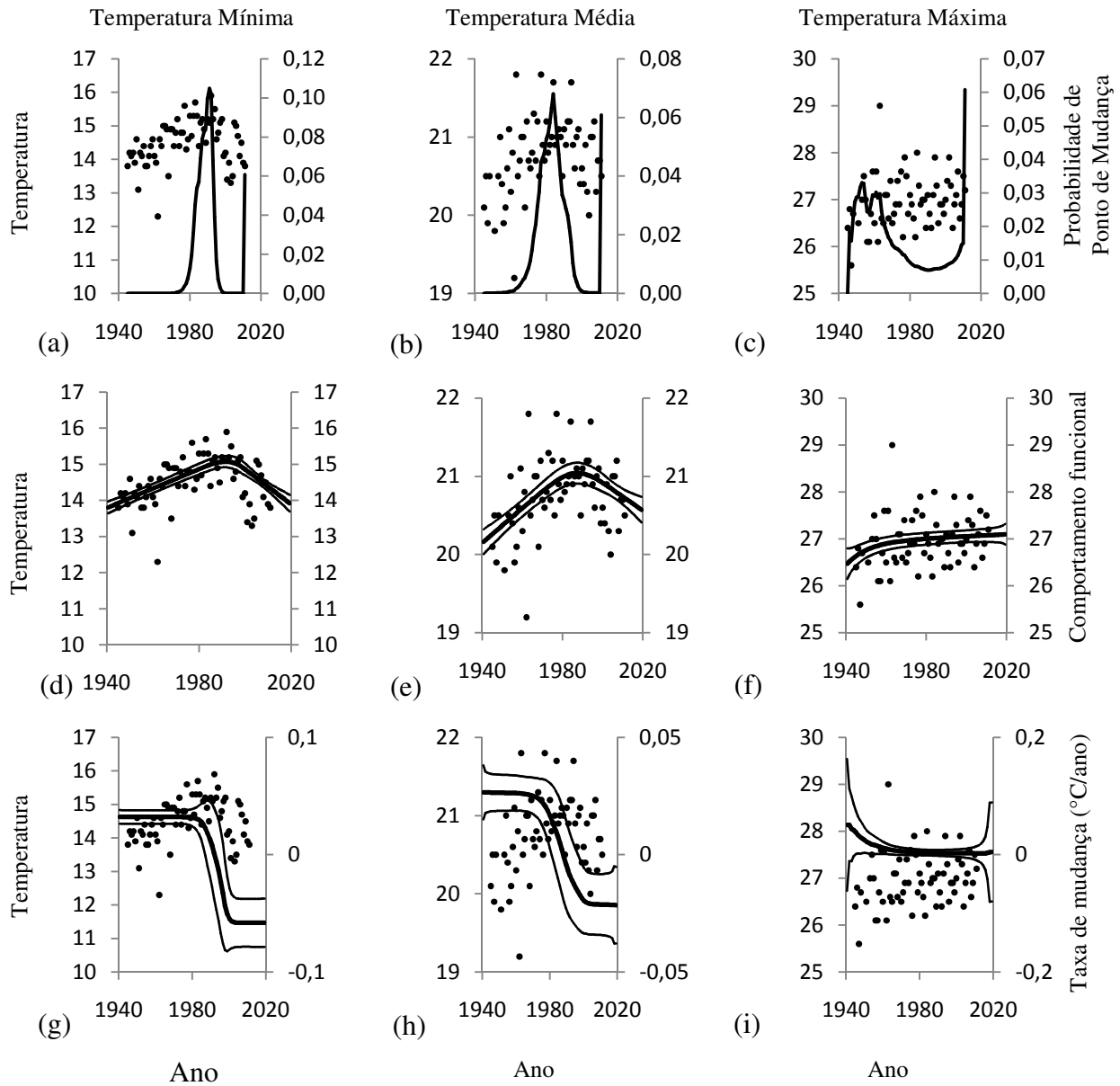
Material Suplementar 2 - Os pontos representam as médias anuais de temperatura para Campinas. Probabilidade de ocorrência do ponto de mudança para temperatura (a) média e (b) máxima (a linha representa as probabilidades de ocorrência de ponto de mudança). Comportamento funcional para temperatura (c) média e (d) máxima (a linha espessa representa o comportamento funcional e as linhas finas representam o desvio padrão). Tendência da temperatura (e) média e (f) máxima ao longo dos anos (a linha espessa representa a taxa de mudança e os traços finos representam o intervalo de confiança).



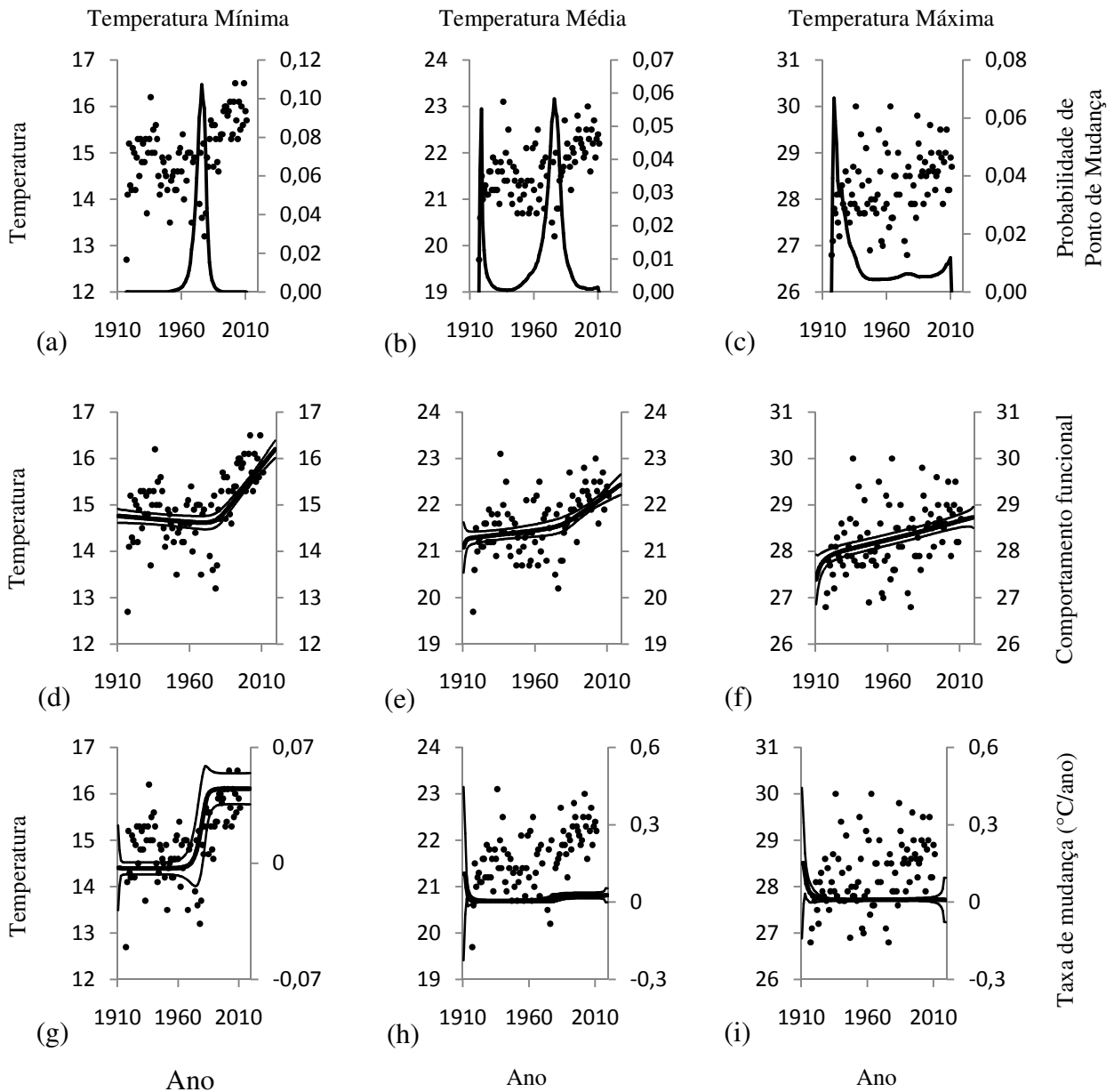
Material Suplementar 3 - Os pontos representam as médias anuais de temperatura para Limeira. Probabilidade de ocorrência do ponto de mudança para temperatura (a) mínima (b) média e (c) máxima (a linha representa as probabilidades de ocorrência de ponto de mudança). Comportamento funcional para temperatura (d) mínima (e) média e (f) máxima (a linha espessa representa o comportamento funcional e as linhas finas representam o desvio padrão). Tendência da temperatura (g) mínima (h) média e (i) máxima ao longo dos anos (a linha espessa representa a taxa de mudança e os traços finos representam o intervalo de confiança).



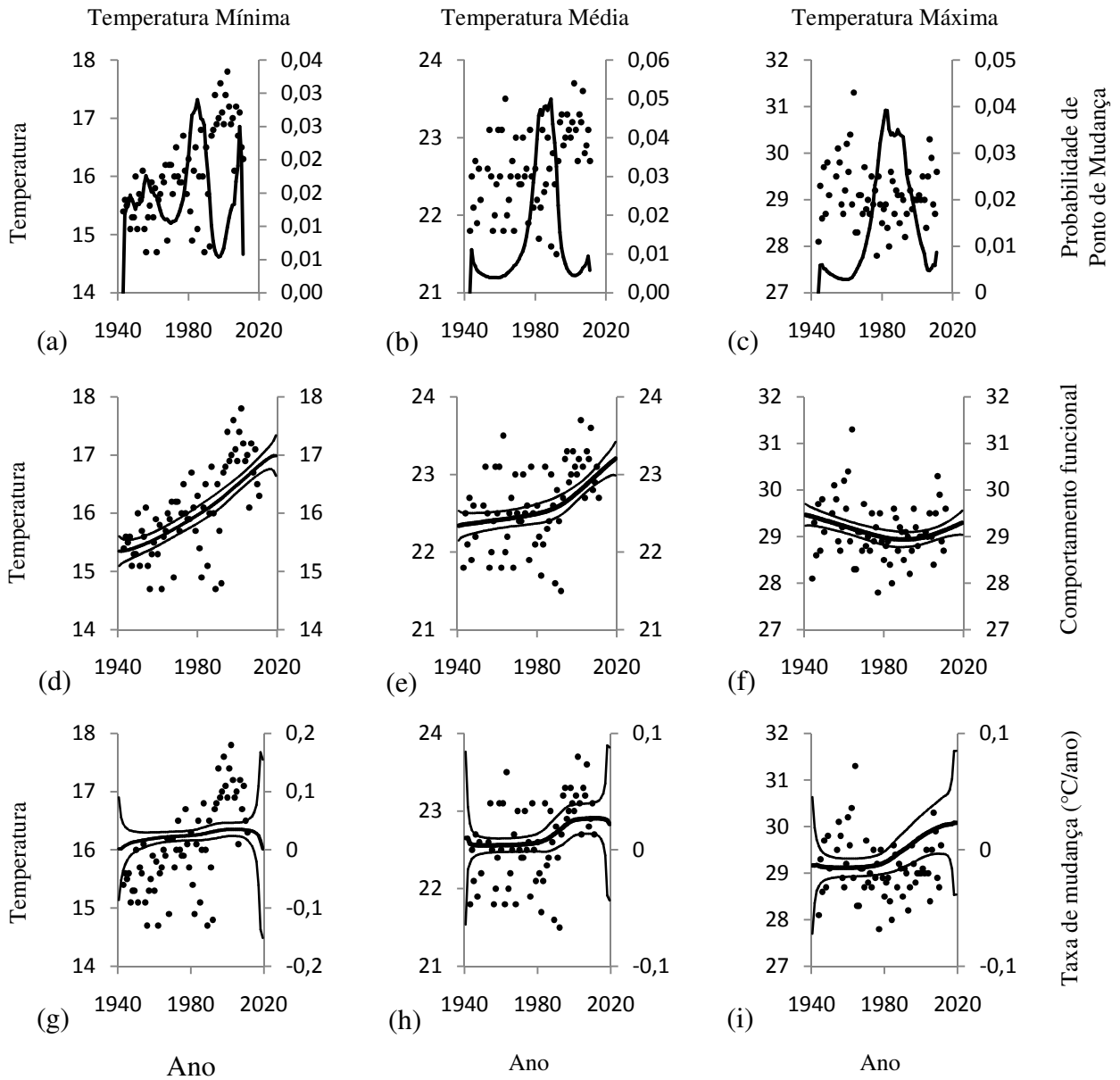
Material Suplementar 4 - Os pontos representam as médias anuais de temperatura para Monte Alegre do Sul. Probabilidade de ocorrência do ponto de mudança para temperatura (a) mínima (b) média e (c) máxima (a linha representa as probabilidades de ocorrência de ponto de mudança). Comportamento funcional para temperatura (d) mínima (e) média e (f) máxima (a linha espessa representa o comportamento funcional e as linhas finas representam o desvio padrão). Tendência da temperatura (g) mínima (h) média e (i) máxima ao longo dos anos (a linha espessa representa a taxa de mudança e os traços finos representam o intervalo de confiança).



Material Suplementar 5 - Os pontos representam as médias anuais de temperatura para Piracicaba. Probabilidade de ocorrência do ponto de mudança para temperatura (a) mínima (b) média e (c) máxima (a linha representa as probabilidades de ocorrência de ponto de mudança). Comportamento funcional para temperatura (d) mínima (e) média e (f) máxima (a linha espessa representa o comportamento funcional e as linhas finas representam o desvio padrão). Tendência da temperatura (g) mínima (h) média e (i) máxima ao longo dos anos (a linha espessa representa a taxa de mudança e os traços finos representam o intervalo de confiança).



Material Suplementar 6 - Os pontos representam as médias anuais de temperatura para Ribeirão Preto. Probabilidade de ocorrência do ponto de mudança para temperatura (a) mínima (b) média e (c) máxima (a linha representa as probabilidades de ocorrência de ponto de mudança). Comportamento funcional para temperatura (d) mínima (e) média e (f) máxima (a linha espessa representa o comportamento funcional e as linhas finas representam o desvio padrão). Tendência da temperatura (g) mínima (h) média e (i) máxima ao longo dos anos (a linha espessa representa a taxa de mudança e os traços finos representam o intervalo de confiança).



Considerações Finais

Este trabalho trouxe importantes contribuições sobre a relação entre a fenologia e o clima urbano em áreas tropicais. Verificamos que, entre as três espécies estudadas em Campinas (Brasil), *Tipuana tipu* foi a que apresentou melhores respostas ao clima urbano, podendo ser utilizada como espécie indicadora para estudos desse tipo em outras cidades. Verificamos que a criação de um novo índice para avaliação da temperatura e a sua relação com o clima urbano e a fenologia deve levar em consideração várias características da paisagem, em diferentes escalas. *Tipuana tipu* foi novamente a espécie que melhor respondeu a esse novo método, confirmando a sua aplicação em estudos relacionados à fenologia e urbanização.

A importância de estudos de ilhas de calor em ambientes tropicais foi reforçada pelos resultados das análises de séries históricas (Capítulo 3), onde não encontramos evidências de mudanças climáticas globais nas séries históricas de Campinas, Limeira, Monte Alegre do Sul e Ribeirão Preto. As mudanças detectadas no clima foram relacionadas aos padrões de mudança no desenvolvimento regional das cidades.