

RESSALVA

Atendendo solicitação da
autora, o texto completo desta tese
será disponibilizado somente a partir
de 03/08/2020.

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E BIODIVERSIDADE

**FENOLOGIA REMOTA E OS PADRÕES DE TROCAS FOLIARES AO LONGO DE UM
GRADIENTE DE SAZONALIDADE**

BRUNA DE COSTA ALBERTON

Tese apresentada ao Instituto de Biociências do Campus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ecologia e Biodiversidade.

Agosto – 2018

BRUNA DE COSTA ALBERTON

FENOLOGIA REMOTA E OS PADRÕES DE TROCAS FOLIARES AO LONGO DE UM
GRADIENTE DE SAZONALIDADE

Tese de Doutorado apresentada ao
Instituto de Biociências da
Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho”, Campus
de Rio Claro, para obtenção do título
de Doutora em Ecologia e
Biodiversidade.

Orientadora: Profa. Dra. LEONOR PATRICIA CERDEIRA MORELLATO

Co-orientador: Prof. Dr. RICARDO DA SILVA TORRES

Rio Claro – SP

2018

581.5
A334f Alberton, Bruna de Costa
 Fenologia remota e os padrões de trocas foliares ao longo de um
 gradiente de sazonalidade / Bruna de Costa Alberton. - Rio Claro, 2018
 252 f. : il., figs., gráfs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de
Bióciências de Rio Claro

Orientadora: Leonor Patricia Cerdeira Morellato

Coorientador: Ricardo da Silva Torres

Agência de fomento e n. de processo: FAPESP: 2014/00215-0,
FAPESP: 2016/01413-5, FAPESP: 2013/50155-0

1. Ecologia vegetal. 2. Fenocâmeras. 3. Sazonalidade. 4. Fenologia
vegetativa. 5. Produtividade do ecossistema. 6. Imagens digitais. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

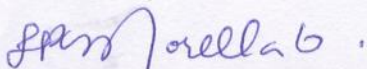
TÍTULO DA TESE: Fenologia remota e os padrões de trocas foliares ao longo de um gradiente de sazonalidade

AUTORA: BRUNA DE COSTA ALBERTON

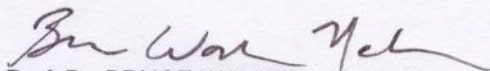
ORIENTADORA: LEONOR PATRICIA CERDEIRA MORELLATO

COORIENTADOR: RICARDO DA SILVA TORRES

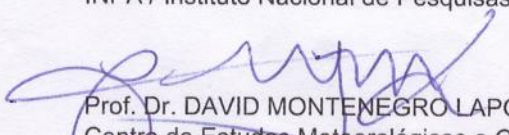
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em ECOLOGIA E BIODIVERSIDADE, área: BIODIVERSIDADE pela Comissão Examinadora:



Profa. Dra. LEONOR PATRICIA CERDEIRA MORELLATO
Departamento de Botânica / UNESP - Instituto de Biociências de Rio Claro - SP




Prof. Dr. BRUCE WALKER NELSON
INPA / Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - AM



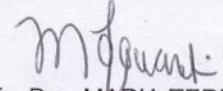
Prof. Dr. DAVID MONTENEGRO LAPOLA

Centro de Estudos Meteorológicos e Climáticos Aplicados à Agricultura (CEPAGRI) / Universidade de Campinas - SP



Profa. Dra. SIMONE APARECIDA VIEIRA

Núcleo de Estudos e Pesquisas Ambientais - NEPAM / Universidade Estadual de Campinas - SP



Profa. Dra. MARIA TEREZA GROMBONE-GUARATINI

Núcleo de pesquisa em Ecologia / INSTITUTO DE BOTÂNICA - SÃO PAULO

Rio Claro, 03 de agosto de 2018

À minha família, Pai, Mãe e Lucas

AGRADECIMENTOS

À minha família, que é o meu alicerce e o meu refúgio, onde sei que sempre poderei voltar e ser bem acolhida. Meu pai Antônio, minha mãe Janete e meu irmão Lucas, agradeço ao suporte de cada um e por tudo que representam em minha vida. Ao meu companheiro de vida, amigo, namorado, colega de profissão, Renan, que nunca mediu esforços em me ajudar e me apoiar, sobretudo nos últimos meses de finalização desta tese. É um prazer dividir a vida contigo. Eu amo vocês. Obrigada por tudo.

Agradeço aos meus orientadores, Patrícia e Ricardo, aos quais sou eternamente em débito, por todo o aprendizado, conselhos, lições e network que me foi passado ao longo destes anos de mestrado e doutorado. Gratidão.

Patrícia tem papel fundamental na construção de minha carreira científica ao longo da pós-graduação. Foi ela quem me apresentou as fenocâmeras e me incentivou a desenvolver meus estudos sobre a fenologia remota próxima. Graças à sua visão de carreira, pude aproveitar grandes oportunidades, interagir com excelentes pesquisadores e entrar no universo multidisciplinar da pesquisa acadêmica, que muito me inspira. São inúmeros os motivos para lhe agradecer, não somente como orientadora, mas como uma grande amiga que tive nestes últimos anos. Em especial neste final de tese, minha gratidão pelo esforço em me ajudar nos tópicos de maior dificuldade e pela paciência com todas as correções.

Meu co-orientador, Ricardo Torres, com quem tive a oportunidade de aprender muito e poder contar sempre com sua disposição em me ajudar. Foram muitas reuniões, presenciais ou por Skype, com orientações muito bem direcionadas, esclarecedoras e sempre incentivadoras.

Um agradecimento mais do que especial aos meus amigos. Àqueles de longa data e que ainda permanecem próximos, mesmo que distantes (fisicamente), e àqueles que se tornaram minha família ao longo dos lugares onde vivi e passei nestes últimos anos. Por sorte, tenho muitos, especialmente nesta cidade (Rio Claro), a qual tem sido minha casa na maior parte destes últimos sete anos. A minha amizade inabalável do sul do país, minha amiga e irmã da vida Mainara Cascaes, e minhas amigas “bioloukas”: Thereza Garbelotto, Patricia Correa, Gabriela Thomaz e Beatriz Wessler. Aos meus colegas de laboratório que se tornaram grandes amigos e por muito tempo minha família rio-clarense:

Gabriela Camargo, Vanessa Staggemeier, Nathália Miranda, Daniel Carstensen, Irene Mendoza e Natália Costa, com quem não somente dividi o mesmo laboratório, mas também foi minha grande companheira ao dividirmos o mesmo teto por quase cinco anos. A todos os meus queridos amigos que o forró me trouxe, em especial a Thais Helena Condez e sua família, pela amizade sincera, leve e tão cheia de amor. Um agradecimento especial aos amigos incríveis que fiz durante minha vivência em Boston, os quais foram essenciais para tornar minha vida norte-americana mais leve, mais divertida e um pouco menos fria, em especial à Laura Zoffoli, por sua amizade e companheirismo.

Agradeço ao Laboratório de Fenologia, a todos os membros que já passaram por ele e aos atuais, por sempre proporcionarem um ambiente leve e inspirador para o trabalho, pelas trocas de conhecimentos e colaborações ao longo de todos os encontros e workshops realizados. É realmente um prazer fazer parte deste grupo e um orgulho tê-lo dentro de minha carreira profissional. Agradeço especialmente aos meus queridos amigos e colegas, Bruno Defane e Leonardo Cancian, por todo o suporte técnico ao longo dos trabalhos de campo, processamento das imagens digitais e auxílio em SIG. Agradeço também aos alunos de graduação, os quais tive a oportunidade de auxiliar na orientação de seus trabalhos, e que se interessaram pela fenologia remota próxima me auxiliando no processamento das imagens: Marina Muller, Carolina Crivelin e Rodrigo Lacerda.

Agradeço aos colaboradores na pesquisa desta tese. Ao Professor Dr. Andrew Richardson, por aceitar ser meu supervisor e me receber em seu laboratório durante os 12 meses de estágio na Universidade de Harvard, entre maio de 2016 e maio de 2017. Foi sob a supervisão de Andrew, que aprendi a manipular e processar os dados de alta frequência de fluxo de carbono, bem como associá-los aos dados da fenologia remota próxima das câmeras digitais e estabelecer as primeiras questões ecológicas dentro do trabalho que viria a se tornar o capítulo 3 desta tese. Agradeço ao Professor Dr. Humberto Rocha, da Universidade de São Paulo (USP), por colaborar disponibilizando os dados das estações meteorológicas e os dados de fluxo de carbono das áreas do cerrado Pé-de-Gigante e de Santa Virgínia, bem como pela disponibilidade presencial e remota com a qual vem auxiliando no desenvolvimento desta tese, através de sua experiência nas trocas de fluxos de energia em ecossistemas tropicais. Também agradeço à sua equipe, Emília Brasilio pela compilação e pré-processamento dos dados meteorológicos e de fluxo de carbono, e ao Eduardo Gomes Lopes e Helber

Freitas pelo suporte técnico indispensável nos trabalhos realizados de instalação e manutenção das câmeras digitais nas torres de fluxo. Agradeço por toda colaboração da EMPRABA Semi-árido, em especial à Magna Soelma Bezerra de Moura, por todo o suporte técnico na instalação, manutenção e coleta dos dados da câmera digital na torre de fluxo da área de caatinga, por disponibilizar os dados meteorológicos e de fluxo de carbono, e por colaborar no desenvolvimento dos trabalhos desta tese, contando com sua experiência em ecossistemas áridos.

Agradeço aos pesquisadores que participaram e aos que ainda participam do projeto e-Phenology, com os quais tive a oportunidade de trabalhar, aprender e colaborar. Um agradecimento especial aos professores Jurandy Almeida, Jefersson dos Santos, Fabio Faria, João Comba e Lucas Schnorr, e aos colegas que também desenvolveram suas teses e dissertações dentro do projeto: Greice Mariano, Roger Leite e Alexandre Almeida.

Agradeço ao Departamento de Botânica e a todos os técnicos que auxiliaram nos trabalhos de campo ao longo do doutorado, em especial ao Rafael Consolmagno, que participou ativamente das instalações, manutenções e reparos das câmeras digitais, pelos muitos quilômetros rodados por todas as áreas monitoradas e pela parceria leve e pró ativa sempre presente.

Agradeço ao Instituto Florestal (IF) do Estado de São Paulo, bem como aos dirigentes das unidades, pela liberação concedida de desenvolver as pesquisas desta tese nas áreas da Estação Ecológica de Itirapina, do Parque Estadual do Vassununga (área do cerrado Pé-de-gigante), e no Parque Estadual da Serra do Mar Núcleo Santa Virgínia (área da Mata Atlântica). Também agradeço aos donos da Fazenda São José e do Instituto Arruda Botelho (IAB) por permitir o trabalho de campo realizado em sua fazenda (área de cerrado) em Itirapina.

Agradeço à Seção de Pós-Graduação do Instituto de Biociências da UNESP, pelo suporte ao longo de todos os anos de doutorado, e ao conselho do Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Biodiversidade, pelo suporte, boa relação e abertura estabelecida aos alunos matriculados, no intuito de sempre melhorar as normativas do curso.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelas bolsas de doutorado e de estágio de pesquisa no exterior concedidas (#2014/00215-0, #2016/01413-5); pelo financiamento dos projetos e-Phenology (#2010/52113-5, #2013/50155-0, FAPESP-Microsoft

Research Virtual Institute); e pelo financiamento de projetos paralelos que contribuíram nesta tese (#2007/59779-6, e FAPESP-VALE-FAPEMIG # #2010/51307-0). Ao CNPq pelo apoio dado por meio das bolsas de produtividade de meus orientadores (#306243/2010-5 #306587/2009-2). Ao Programa de Apoio à Pós-Graduação (PROAP) pelo auxílio concedido para participação em eventos científicos durante o período de doutorado.

A maior riqueza
do homem
é sua incompletude.
Nesse ponto
sou abastado.
Palavras que me aceitam
como sou
— eu não aceito.
Não aguento ser apenas
um sujeito que abre
portas, que puxa
válvulas, que olha o
relógio, que compra pão
às 6 da tarde, que vai
lá fora, que aponta lápis,
que vê a uva etc. etc.
Perdoai. Mas eu
preciso ser Outros.
Eu penso
renovar o homem
usando borboletas.
(Manuel de Barros)

RESUMO

O estudo da fenologia vegetal busca monitorar, compreender e prever os ciclos de vida recorrentes das plantas, principalmente influenciados pelo clima. O monitoramento das fenofases vegetativas de brotamento e senescência foliar são essências para a compreensão de processos ecossistêmicos importantes como, a produtividade primária, as trocas de energia entre atmosfera e superfície terrestre, o fluxo de carbono, e a ciclagem de nutrientes. Logo, entender a resposta das plantas ao clima e ser capaz de prever alterações em sua fenologia, é essencial para o entendimento das dinâmicas de comunidades vegetais e da funcionalidade dos ecossistemas em frente a cenários de mudanças climáticas. Nos últimos anos, a busca por novas tecnologias dentro de estudos científicos vem crescendo com o intuito de tornar mais viável e amplo o monitoramento fenológico. Neste trabalho, buscamos incorporar novas tecnologias de observações fenológicas com o uso de câmeras digitais (fenocâmeras) instaladas em campo para o monitoramento de dados fenológicos de brotamento e senescência foliar em ambientes tropicais. Os objetivos gerais deste trabalho de tese, dividida em quatro seções, foram de : (i) compilar informações sobre conceitos e propriedades da técnica de fotografias repetidas (*repeated photograph technic*), criando um protocolo para o uso de câmeras digitais nos trópicos e levantar suas principais contribuições no âmbito na biologia da conservação; (ii) monitorar e descrever os padrões da fenologia vegetativa em diferentes comunidades vegetais sazonais, através dos dados obtidos de imagens digitais e investigar os principais gatilhos ambientais atuando nas diferentes vegetações; (iii) associar dados de fenologia foliar juntamente com dados de produtividade primária bruta dentro de ecossistemas sob diferentes pressões de sazonalidade para um melhor entendimento das respostas entre vegetação-atmosfera mediadas pela fenologia foliar; e (iv) apresentar resultados das principais iniciativas em análises de imagens digitais para o monitoramento da fenologia foliar desenvolvidas dentro da rede de fenocâmeras do projeto *e-phenology*, no âmbito da colaboração *e-science*. As vegetações estudadas neste trabalho estão distribuídas ao longo de um gradiente de sazonalidade de distribuição de chuvas e incluem: uma vegetação de caatinga; três diferentes fisionomias de cerrado que correspondem a um cerrado campo sujo, um cerrado *sensu stricto*, e um cerrado denso; e uma vegetação de Mata Atlântica. Séries temporais relacionadas às fenofases vegetativas foram extraídas do conjunto de imagens digitais coletadas em cada uma das áreas e analisadas dentro do contexto de cada um dos objetivos deste trabalho. Demonstramos que o estabelecimento de uma rede de fenocâmeras é uma poderosa ferramenta para a biologia da conservação, através da capacidade de obtermos dados de alta frequência temporal associados a uma ampla gama de dados ambientais monitorados. Através da aplicação de fenocâmeras pode-se obter novas informações sobre prática de manejo e restauração de ambientes, além de sua potencial contribuição nas esferas de educação ambiental e ciência cidadã. Observamos que a disponibilidade de água e luz no ambiente são os fatores mais importantes para o desenvolvimento foliar ao longo de diferentes comunidades sazonais. Relações hídricas em plantas

foram mais importantes para vegetações mais áridas, como a caatinga, enquanto que a disponibilidade de luz, quantificada através da sazonalidade do comprimento do dia, teve maior influência no gatilho do desenvolvimento foliar nas comunidades de cerrado. No âmbito dos ecossistemas, demonstrou-se uma nova abordagem ao se relacionar a fenologia foliar derivada de câmeras com a produtividade de ecossistemas tropicais. A dinâmica fenológica analisada através da variabilidade de sinais fenológicos encontrados dentro das diferentes vegetações, foram importantes para explicar os padrões temporais de produtividade dos ecossistemas. A compilação de trabalhos realizados através da colaboração *e-science*, apresentados na seção 4, foram de grande importância para o desenvolvimento dos métodos e análises, bem como para o alcance dos resultados obtidos dentro desta tese. Este trabalho oferece uma nova ferramenta para o monitoramento fenológico em vegetações tropicais, e sugere novos desafios a serem desenvolvidos bem como incentiva uma maior abrangência no uso de fenocâmeras a fim de cobrir um maior número de áreas e diferentes tipos de vegetação, além de associar estes estudos com abordagens desenvolvidas em diferentes escalas como as observações diretas, a aplicação de imagens de drones, bem como com as imagens de satélite. A comparação de diferentes escalas espaciais e temporais irá nos ajudar a entender melhor a própria escala de informações provenientes das fenocâmeras em termos de abrangência e detalhamento dos ecossistemas.

Palavras-chave: fenocâmeras, sazonalidade, fenologia vegetativa, produtividade do ecossistema, imagens digitais

ABSTRACT

Plant phenology is a traditional science focused on monitoring, understanding, and predicting recurrent life cycles events, which are mainly related to climate. Leaf development stages are essential plant phenophases for the better understanding of ecosystems processes such as carbon and water fluxes, regulation of productivity, and nutrient cycling. Through the investigation of plant responses to climate and phenological shifts prediction, we can better forecast climatic change effects on vegetation dynamics and prevent loss of ecosystems functionalities. Aiming to become the phenological collection wider and more feasible worldwide, the seek for new technologies has stimulated several research centers of plant phenology monitoring. Here, we incorporated a new technology of field phenological observations using digital cameras for the monitoring of leaf exchanges in tropical vegetations. On this work, divided into four sections, we aimed to: (i) compile information about concepts and properties of the repeated photograph technic, create guidelines for the phenocams setup in tropical vegetation sites, and to provide key contributions of daily imagery monitoring on biological conservation; (ii) to stablish a monitoring of different seasonal vegetations, describing the phenological trends, and identify the environmental cues which are triggering the leaf flushing and senescence for each vegetation type; (iii) analyze the canopy greenness obtained from digital cameras in relation to gross primary productivity measurements, to better understand the role of leaf phenology controlling ecosystem productivity in the tropics; and (iv) present some results of phenocam image analysis research initiatives and tools devised in the context of *e*-Science collaborations and built in the framework of the e-phenology project and the e-phenology network of phenocams. The selected study sites belong to different seasonal biomes, which comprehends areas from caatinga, savanna grasslands, savanna woodlands and Atlantic rainforest. Temporal series representing foliar phenology were extracted from the data imagery of each vegetation site and were analyzed into the context of each section of this work. We demonstrated that the establishment of phenocam networking is a powerful tool for biological conservation through its capability of fine temporal resolution data associated with wide spatial monitoring coverage. Besides, phenocams applications can bring new information for management and restoration practices at several sites and environments and contribute for the education for conservation and citizen science initiatives. We observed that water and light were the most important predictors for the leaf phenological patterns across seasonal vegetation communities. Water-plant relationships were more important for the caatinga community, and light, through day-length seasonality, had more influence in the leafing patterns of the cerrado communities. Regarding the ecosystem, we demonstrated a novel approach to relate leaf phenology to seasonality of tropical ecosystems productivity. The phenological dynamics regarding the variability of species phenological signals, and how they are built in into each contrasting vegetation communities explains drivers of leaf phenology and productivity. A compilation of articles developed through the e-science collaboration, presented in Section 4, were of

great importance for the generation of methods and analytical work, as well as for the results achievements in this thesis. This work will offer a new tool for the phenological monitoring in the tropics, and suggests next challenges to be addressed and the continuity of the e-phenology network and the spread of new cameras covering new vegetation types; the development of bottom-up studies, integrating on-the-ground observations, cameras, drones, and satellites, inter-comparing them and placing camera-derived phenology in its own scale, by understanding how much and what kind of information can be retrieved from ecosystems.

Key words: phenocameras, seasonality, leaf phenology, ecosystem productivity, digital images

SUMÁRIO

INTRODUCTION.....	12
SECTION 1: Introducing digital cameras to monitor plant phenology in the tropics: applications for conservation.....	17
SECTION 2: Leafing patterns and drivers across seasonally dry tropical communities.....	50
SECTION 3: Leaf phenology correlates to gross primary productivity: an inter-comparison across tropical biomes.....	94
SECTION 4: <i>e</i> -Science and the multidisciplinary research built on the integrations of big data ecological research and computational science.....	142
CONCLUSIONS.....	146
REFERENCES.....	148
APPENDIX A: Leafing patterns and leaf exchange strategies of a cerrado woody community.....	150
APPENDIX B: Phenological visual rhythms: Compact representations for fine-grained plant species identification.....	189
APPENDIX C: Time series-based classifier fusion for fine-grained plant species recognition.....	201
APPENDIX D: Fusion of Time Series Representations for Plant Recognition in Phenology Studies.....	211
APPENDIX E: PhenoVis – Visual Phenological Analysis of Forest Ecosystems.....	222
APPENDIX F: Unsupervised distance learning for plant species identification.....	238

1 INTRODUCTION

Plant phenology is a traditional science focused on monitoring, understanding, and predicting recurrent life cycles events, which are mainly related to climate (Morellato et al., 2016). Leaf development stages are plant phenophases responsible for indicating the growth season and for controlling crucial ecosystems processes such as carbon and water fluxes, regulation of productivity, and nutrient cycling (Reich, 1995; Baldocchi et al., 2005). Tropical ecosystems have significant importance in the global carbon budget (Field et al., 1998; Ometto et al., 2005). By understanding phenological patterns of tropical vegetations and what drives leaf production seasonality within tropical communities, we can better forecast climatic change effects on vegetation dynamics and prevent loss of ecosystems functionalities (Polgar and Primack, 2011).

Phenological studies in the tropics preclude the observation of many species across several sites with intense human labor and costs (Alberton et al., 2014; Morellato et al., 2016). The scarcity of long-term monitoring in tropical regions, necessary to understand the effects of global warming on organisms (Abernethy et al., 2018) has stimulated several research centers to seek for new tools of plant phenology monitoring. The near-surface remote phenology consists in the application of sensors in the ground for the monitoring of plant to ecosystem-scale vegetation changes. The use of digital cameras to track leaf exchanges came to fill the gap between the traditional on-the-ground monitoring by human direct observation and remote sensing derived land surface phenology (Richardson et al., 2007; Morisette et al., 2009; Morellato et al., 2016).

The technique of repeated photographs using digital cameras for phenology monitoring, or phenocams, has increased in the last 10 years due its advantages of low cost investment, reduction in size, easy set-up installation, the reduced human labor, increased temporal resolution, and the opportunity of simultaneously monitoring several sites improving the spatial resolution of ground-based phenology monitoring and offering the possibility of handling high resolution data (Crimmins and Crimmins, 2008, Morisette et al., 2009; Graham et al., 2010; Alberton et al., 2017), leading phenocams to a widely range of ecological applications worldwide.

The ongoing addition of new devices, high-resolution data survey, and sensor networks has been improving the quality of data collected in biological studies, but at the same time increasing the

magnitude of scientific data collected. Near-surface monitoring systems in the tropics, for instance, are necessarily complex since the environmental conditions are harsh and the diversity of species is usually high. This leads to a next generation of scientific problems, which will require the establishment of multidisciplinary teams (Hey and Hey 2006). To the process of data retrieval, management, and analysis it will be required the collaboration between ecologists and computer scientists. *e-Science* is about the collaboration of key areas of science, not considered a discipline, but a network of research initiative focused on the specification and implementation of a set of tools and technologies capable of supporting, improving, and speeding up data analysis, knowledge discovery, and decision making (Hey and Hey 2006).

In Brazil, we have the e-phenology Network (<http://www.recod.ic.unicamp.br/ephenology> - As of June 2018), introduced in this thesis, that comprehends the application of digital cameras as tools to detect leaf flushing and senescence across different vegetation types from drylands, grasslands, and cerrado savannas to rainforests. This project is innovative and puts Brazil in the state of the art of near-remote phenology monitoring, already established in areas of temperate forests in northern hemisphere. The e-phenology project also integrates the development of computational tools for the methodological applications of algorithms for data mining and time series analysis (e.g., Almeida et al., 2014; Almeida et al., 2016).

In this context, the present thesis is divided into four sections that all together, aim to present the development of phenocams tools in tropical systems, their application in ecological studies and the integration of e-science insights on peripheral approaches that contributed for this work. Sections are described below.

CONCLUSIONS

In the present thesis, I intended to incorporate a novel approach as a consistent tool for the monitoring of the vegetative phenology in tropical ecosystems. In the first section, I established a first-step protocol with main guidelines for the camera system method and setup in the tropics. We demonstrated that the establishment of phenocam networking is a powerful tool for biological conservation through its capability of fine temporal resolution data associated with wide spatial monitoring coverage. Besides, phenocams applications can bring new information for management and restoration practices at several sites and environments and contribute for the education for conservation and citizen science initiatives.

Next sections (2 and 3), I approached ecological questions to be tested applying repeated digital photographs on tropical ecosystems. In section 2, leaf phenology derived by digital cameras were used in an analytical procedure to unravel the main drivers influencing G_{cc} time series across seasonally dry vegetations. Water and light were the most important predictors for the leaf phenological patterns across the sites. Water-plant relationships were more important for the Caatinga community, and light, through day-length seasonality, had more influence in the leafing patterns of the cerrado communities. An interesting outcome was the increasing variability of phenological signals (leafing behaviors) and predictor-response relationships (distinct smooth functions) across sites where seasonality was less pronounced and/or distinct species life-form were capable of overcoming drought-effects, such as deep root systems trees from woodland cerrado compared to grassy cerrado. Following this idea, section 3 has shown a novel approach to relate leaf phenology to seasonality of ecosystems productivity. The phenological dynamics regarding the variability of species phenological signals, and how they are built in into each contrasting vegetation communities explains drivers of leaf phenology and productivity. Besides, the comparison of tropical biomes under different hydroclimatic conditions is essential to the understanding of ecosystem functionality and access future responses to climate change.

The so-called near-surface remote phenology using digital cameras is an opportunity to obtain an impartial and comparable assessment of leaf seasonal changes in tropical environments and has becoming more and more common for phenological research. The arrivals of novel technologies followed by the advance of e-science methods for dealing with large data sets are changing the scenario

of plant ecology studies, from species to ecosystems. Next challenges to be addressed are the continuity of the e-phenology network and the spread of new cameras covering new vegetation types; and the development of bottom-up studies, integrating on-the-ground observations, cameras, drones, and satellites, inter-comparing them and placing camera-derived phenology in its own scale, by understanding how much and what kind of information can be retrieved from ecosystems. I believe the thesis innovates by providing original ecological research outcomes from an e-science perspective, which led to a unique research profile for a young scientist.

REFERENCES

- ALBERTON, B. et al. Using phenological cameras to track the green up in a cerrado savanna and its on-the-ground validation. **Ecological Informatics**, v. 19, p. 62–70, 2014.
- BALDOCCHI, D. D. et al. Predicting the onset of net carbon uptake by deciduous forest with soil temperature and climate data: A synthesis of FLUXNET data. **International Journal of Biometereology**, v. 49, p. 377-387, 2005.
- CHAMBERS, L.E. et al. Phenological Changes in the Southern Hemisphere. **Plos One**, v. 8, p. 1-12, 2013.
- CRIMMINS, M.A.; CRIMMINS, T.M. Monitoring plant phenology using digital repeat photography. **Environ. Manage**, v. 41, p. 949–958, 2008.
- FIELD, C.B. et al. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. **Science**, v. 281, p. 237–240, 1998.
- GRAHAM, E.A. et al. Public Internet-connected cameras used as a cross-continental ground-based plant phenology monitoring system. **Glob. Change Biol.** v. 16, p. 3014–3023, 2010.
- HEY, T.; HEY, J.e-Science and its implications for the library community. **Libr.Hi Tech**, v. 24, p. 515–528, 2006.
- KEENAN, T. F. et al. Tracking forest phenology and seasonal physiology using digital repeat photography: a critical assessment. **Ecological Applications**, v. 24(6), p. 1478-1489, 2014.
- LOPES, A.P. et al. Leaf flush drives dry season green-up of the Central Amazon. **Remote Sensing of Environment**, v. 182, p. 90–98, 2016.
- MIGLIAVACCA, M. et al. Using digital repeat photography and eddy covariance data to model grassland phenology and photosynthetic CO₂ uptake. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151(10), p. 1325–1337, 2011.
- MARIANO, G., MORELLATO, LPC, ALMEIDA J. ALBERTON, B., CAMARGO, MGG; & TORRES, RS. Modeling plant phenology database: blending near-surface remote phenology with on-the-ground observations. **Ecological Engineering**, v. 91, p. 396-408, 2016.
- MOORE, C.E. et al. Tree – grass phenology information improves light use efficiency modelling of gross primary productivity for an Australian tropical savanna. **Biogeosciences**. v. 14, p. 111–129, 2017.
- MORELLATO, L.P.C.; GRESSLER, E.; CAMARGO, M.G.G. A review of plant phenology in South and Central America. In: M.D. Schwartz (ed.). **Phenology: An Integrative Environmental Science**, Springer, New York, 91-113, 2013.
- MORELLATO, L.P.C. et al. Linking plant phenology to conservation biology. **Biological Conservation**,v. 195, p. 60–72, 2016.
- MORISSETTE, J.T. et al. Tracking the rhythm of the seasons in the face of global change: phenological research in the 21st century. **Front. Ecol. Environ.** v. 7, p. 253-260, 2009.

NAGAI, S. et al. Usability of time-lapse digital camera images to detect characteristics of tree phenology in a tropical rainforest. **Ecological Informatics**, v. 32, p. 91–106, 2016.

OMETTO, J.P.H.B. et al. Amazonia and the modern carbon cycle: Lessons learned. **Oecologia**, v. 143(4), p. 483–500, 2005.

POLGAR, C.A.; PRIMACK, R.B. Leaf-out phenology of temperate woody plants: From trees to ecosystems. **New Phytologist**, v. 191(4), p. 926–941, 2011.

REICH, P.B. Phenology of tropical forests: patterns , causes , and consequences. **Can. J. Bot.** v. 73, p. 164–174, 1995.

RESTREPO-COUBE, N. et al. What drives the seasonality of photosynthesis across the Amazon basin? A cross-site analysis of eddy flux tower measurements from the Brasil flux network. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 182–183, p.128–144, 2013.

RESTREPO-COUBE, N. et al. Do dynamic global vegetation models capture the seasonality of carbon fluxes in the Amazon basin? A data-model intercomparison. **Global Change Biology**, v. 23(1), p.191–208, 2017.

RICHARDSON, A.D. et al. Influence of spring and autumn phenological transitions on forest ecosystem productivity. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 365(1555), p.3227–3246, 2010.

TOOMEY, M. et al. Greenness indices from digital cameras predict the timing and seasonal dynamics of canopy-scale photosynthesis. **Ecological Applications**, v. 25(1), p.99–115, 2015.

WU, J. et al. Leaf development and demography explain photosynthetic seasonality in Amazon evergreen forests. **Science**, v. 351(6276), p.972–976, 2016.

WU, J. et al. The phenology of leaf quality and its within-canopy variation is essential for accurate modeling of photosynthesis in tropical evergreen forests, **New Phytologist**, p.1–14, 2017.